

Coûts marginaux lors de mesures d'efficacité et d'optimisation imposées dans les bâtiments commerciaux (extraits)

Auteurs

Martin Jakob (CEPE, chef de projet)

Andreas Baumgartner (A+W)

Eberhard Jochem (CEPE)

Urs-Peter Menti (A+W / HTA Lucerne)

Andrea Honegger-Ott (CEPE)

Iwan Plüss (HTA Lucerne)

Collaboration (Eclairage)

Stefan Gasser, eTeam, S.A.F.E.

Mandant:

Office fédéral de l'énergie (OFEN), 3003 Berne
ewz-Stromsparerfonds de la Ville de Zurich (cofinancement)
Stromspar-Fonds de Bâle, Office de l'environnement et de l'énergie, Bâle (cofinancement)
Service Cantonal de l'Energie (ScanE), Genève (cofinancement)

Mandataire:

Centre for Energy Policy and Economics (CEPE), EPF Zurich, Zürichbergstr. 18, 8032 Zurich
Amstein + Waltert (A+W), Zurich

Collaboration:

HTA Lucerne, Zentrum für interdisziplinäre Gebäudetechnik (ZIG), Horw
Stefan Gasser, eTeam, Zurich

Auteurs et collaborateurs:

Martin Jakob (CEPE, chef de projet)
Eberhard Jochem (CEPE)
Urs-Peter Menti (A+W / HTA Lucerne)
Andreas Baumgartner (A+W)
Iwan Plüss (HTA Lucerne)
Andrea Ott (CEPE)
Stefan Gasser (eTeam)

Groupe d'accompagnement:

C. U. Brunner (CUB)
O. Brückner (Karl Steiner AG)
H.P. Bürgi (MINERGIE)
Th. Bürki (AEnEC)
L. Dolecek (OFEN)
A. Eckmanns (OFEN, membre correspondant)
R. Meier, Programme de recherche Fondements de l'économie énergétique, direction
L. Gutzwiller, Programme de recherche Fondements de l'économie énergétique, Office fédéral de l'énergie (OFEN)
P. Hofer (Prognos)
M. Tremp (CRB)
A. Trier (AWEL, canton de ZH)
E. Schadegg (Grünberg & Partner), jusqu'à mi-2004
J. van der Maas (canton de GE), dès mi-2004

Impressum titre

La présente étude a été élaborée dans le cadre du Programme de recherche «Fondements de l'économie énergétique» de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Seul(e) le/la chargé(e) de l'étude est responsable du contenu.

Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen · Adresse postale: CH-3003 Berne
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.admin.ch/bfe

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Remerciements | 5 |
| Résumé succinct | 6 |
| Situation initiale, objectifs et méthode d'analyse | 14 |
| Besoins énergétiques des diverses catégories de bâtiments et effets énergétiques induits par les mesures prises | 15 |
| Simulations de bâtiments pour des considérations en matière d'énergie et de confort | 18 |
| Considérations coûts/bénéfices, compte tenu du confort | 26 |
| Relevé des données techniques caractéristiques et des coûts spécifiques | 34 |
| Conclusions finales et recommandations | 35 |
| Recommandations pour l'économie, les intermédiaires, la politique et l'administration | 36 |
| 1. Introduction, problématique et méthode d'analyse | 40 |
| 1.1 Situation initiale et problématique | 40 |
| 1.2 Objectifs | 41 |
| 1.3 Aperçu de la méthode d'analyse | 42 |
| 1.3.1 Catégories de bâtiments | 42 |
| 1.3.2 Méthode de calcul des coûts marginaux | 43 |
| 1.3.3 Etendue et délimitation du projet | 45 |
| 5 Analyse des coûts et profits et considération des coûts marginaux au niveau des éléments de construction et des installations | 47 |
| 5.1 Façades | 47 |
| 5.1.1 Bâtiments neufs | 47 |
| 5.1.2 Bâtiments existants | 48 |
| 5.2 Fenêtres et vitrages | 50 |
| 5.2.1 Vitrages | 51 |
| 5.2.2 Fenêtres des nouveaux bâtiments | 53 |
| 5.2.3 Fenêtres des bâtiments existants | 56 |
| 5.3 Installations de ventilation | 58 |
| 5.3.1 Pose d'une ventilation avec récupération de chaleur | 58 |
| 5.3.2 Amélioration simultanée de l'efficacité électrique et thermique pour les ventilations de bâtiments neufs | 59 |
| 5.3.3 Amélioration simultanée de l'efficacité électrique et thermique pour les renouvellements de ventilations dans les bâtiments existants | 61 |
| 5.3.4 Pose d'un récupérateur de chaleur dans les bâtiments existants | 63 |
| 5.3.5 Renouvellement des RC des anciennes ventilations | 65 |
| 5.3.6 Amélioration du coefficient de performance thermique des récupérateurs de chaleur | 66 |
| 5.4 Aération douce | 66 |
| 5.4.1 Machines frigorifiques plus performantes | 66 |
| 5.4.2 Production de froid avec une différence de température moindre ou avec fluide frigorigène alternatif | 67 |
| 5.4.3 Postrefroidissement avec free cooling | 70 |
| 5.4.4 Refroidissement adiabatique de l'air acheminé dans le bâtiment | 71 |
| 5.4.5 Dégagement de froid | 73 |
| 5.4.6 Planification intégrale et conception | 74 |
| 5.5 Eclairage | 75 |
| 5.5.1 Effets des réglages de lumière pour les éclairages avec tubes fluorescents | 75 |
| 5.5.2 Considérations de rentabilité pour les éclairages avec tubes fluorescents | 79 |
| 5.5.3 Commerce de détail | 87 |
| 5.6 Production de chaleur | 88 |
| 5.6.1 Bâtiments neufs | 89 |
| 5.6.2 Bâtiments existants | 90 |

| | |
|--|------------|
| 6 Coûts/bénéfices au niveau du bâtiment | 92 |
| 6.1 Bâtiments neufs | 92 |
| 6.2 Rénovation des bâtiments existants..... | 101 |
| 6.3 Conclusions | 111 |
| 7. Conclusions finales et recommandations..... | 115 |
| 7.1 Conclusions finales sur le contenu | 115 |
| A propos des conflits d'objectifs entre l'efficacité énergétique et le confort dans les bâtiments commerciaux | 116 |
| Structure des coûts et considérations coûts/bénéfices pour les mesures d'efficacité énergétique..... | 120 |
| Structures du marché et état actuel de la planification énergétique et de la planification des coûts | 122 |
| 7.2 Remarques méthodologiques..... | 122 |
| Limites de l'évaluation des coûts marginaux | 122 |
| Limites de la modélisation des besoins énergétiques et du confort / Outils à l'intention des planificateurs | 123 |
| 7.3 Recommandations pour les milieux économiques, les intermédiaires, les politiciens et l'administration..... | 124 |
| Milieux économiques, notamment milieux immobiliers et concepteurs | 124 |
| Intermédiaires, en particulier adoption de normes, formation et perfectionnement professionnels | 125 |
| Politique et administration..... | 127 |
| Recherche et développement | 129 |

Ce document est un extrait traduit en français du rapport allemand « Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten », à télécharger sous www.bfe.admin.ch. Inscrive simplement un mot-clé du titre (par exemple « Grenzkosten ») sur le lien suivant: [Datenbank allgemeine Publikationen](#)

Remerciements

Le présent rapport a pu être réalisé grâce au financement externe de l'OFEN, des cantons de BS et GE et de l'EZW de la Ville de Zurich (voir aussi mpressum) ainsi qu'aux fonds propres d'Amstein+Walthert (A+W), de la HTA de Lucerne et du CEPE de l'EPF de Zurich. L'équipe du projet remercie sincèrement ces institutions. S'agissant du contenu, le projet se base essentiellement sur les indications et informations fournies par de nombreuses entreprises et institutions. Nous adressons tous nos remerciements à ces entreprises et institutions, ainsi qu'à toutes les personnes concernées. Nous remercions nommément Mesdames et Messieurs Aerne, Bachmann, Baumann, Bebie, Binda, Brückner, Brunner, Bucher, Buchholz, Burger, Camenisch, Canali, Columberg, Dittrich, Frank, Gasser, Gertsch, Ch. Gmür, H. Gmür, Gubler, Haefliger, Hegi, Heiz, Heusser, Hoch, Hofstetter, Hubacher, Jeangros, Joerg, Kaeslin, Kaufmann, Keel, Kegel, Kissel, Koch, Koller, Lenzlinger, Lüdi, Ménard, Mettler, Meyer, Michel, Mom, Moor, Mühlheim, W. Pluess, Prochaska, Rammelt, Rhyner, Ruosch, Schierz, Schmitz, Schönbächler, Schüller, Seifert, Simmler, Sokolean, Sollberger, Stahel, Stähli, Steinemann, Strasser, Sueess, Trösch, Vogt, Volpe, Wellig, Wenger, Widmann, Widmer, Wittlin und Zimmermann.

Nous réitérons nos remerciements aux membres du groupe d'accompagnement dont les inputs et éléments de discussion nous ont toujours été très précieux. Last but not least, la direction du projet adresse un grand merci pour son engagement et sa compétence à l'équipe du projet, à savoir Andrea Honegger-Ott, Andreas Baumgartner, Stefan Gasser, Eberhard Jochem, Urs-Peter Menti et Iwan Plüss, ainsi qu'à ses collègues B. Aebischer, A. Altenburger, U. Flückiger, R. Mielebacher, B. Schrader, J. Stauer, R., D. Tschudy, R. Uetz, R. Schmitz, G. Zweifel.

Résumé succinct

Le projet vise à mettre à jour empiriquement la connaissance des coûts des mesures prises en faveur de l'efficacité énergétique dans les principales catégories de bâtiments commerciaux. L'étude devait porter sur la protection thermique en hiver et en été, sur les techniques de chauffage, de ventilation et de climatisation ainsi que sur l'éclairage. Il s'agissait d'examiner aussi bien la construction neuve que la rénovation, en distinguant entre la consommation d'électricité et celle de chaleur, et en considérant les interactions éventuelles. On a également souhaité évaluer (et si possible chiffrer) de possibles bénéfices additionnels. Ceux-ci ont été identifiés d'après les déclarations relatives à des modifications du confort induites par les mesures d'efficacité énergétique. Enfin, il s'agissait d'émettre des recommandations à l'adresse des intéressés: investisseurs et concepteurs de nouveaux bâtiments, exploitants et propriétaires de bâtiments existants, professionnels de l'enveloppe et des installations du bâtiment et enfin, responsables de la recherche en techniques et en économie énergétiques.

Demande d'énergie et potentiels d'efficacité

Même si les travaux se sont centrés sur les bâtiments de bureaux, leurs résultats étant exprimés sous forme désagrégée peuvent être appliqués à d'autres catégories de bâtiments du secteur des services: écoles, hôpitaux, surfaces de vente. En l'absence de mesures particulières, la consommation spécifique de combustible des constructions neuves se situe entre 140 et 280 MJ/m²_{SRE}a, celle des bâtiments existants entre 430 et 1000 MJ/m²_{SRE}a, voire au-dessus de 1500 MJ/m²_{SRE}a dans certains cas isolés. Dans les bâtiments neufs où les charges internes sont élevées (appareils nécessitant 120 MJ_{el}/m²_{SRE}a), la demande d'électricité est du même ordre (180 à 350 MJ_{el}/m²_{SRE}a), alors qu'elle varie entre 180 et plus de 500 MJ_{el}/m²_{SRE}a dans les bâtiments existants (Tableau R. 1). Or des interventions affectant le bâtiment et ses installations permettent de ramener l'indice de dépense d'énergie électrique dans les bâtiments existants et dans les constructions neuves à un niveau de 170 à 220 MJ_{el}/m²_{SRE}a, selon le train de mesures et la stratégie adoptée (p.ex. avec accent sur le combustible ou sur l'électricité). En vue de réduire de façon significative la demande de courant, il conviendrait d'agir aussi sur la consommation des appareils de bureau, qui représente souvent une part élevée des charges internes. Le potentiel d'économies y relatif se situe entre 40 et 80 MJ_{el}/m²_{SRE}a. Il est possible de faire en sorte que la demande de chauffage avoisine tout juste 90 à 140 MJ/m²_{SRE}a dans les bâtiments neufs et de 100 à quelque 300 MJ_{el}/m²_{SRE}a dans les bâtiments existants, selon le genre de construction. Enfin le recours à la récupération de chaleur et à la pompe à chaleur permet d'éliminer complètement les besoins de combustible restants.

Ces gains ne résultent pas d'un seul type d'interventions, mais d'**un ensemble de mesures combinées**:

- L'isolation thermique, les fenêtres et vitrages à faible valeur U se traduisent par une réduction des besoins de chaleur pouvant atteindre 100 MJ/m²a dans les bâtiments neufs et jusqu'à 400 MJ/m²a dans les bâtiments rénovés, tandis que la ventilation avec récupération de chaleur « vaut » jusqu'à 150 MJ/m²a (tous bâtiments confondus). Quant à l'optimisation de l'exploitation, elle produit entre quelques dizaines et environ 100 MJ/m²a, selon les circonstances.
- Pour l'électricité, un éclairage axé sur l'efficacité énergétique, incluant une modulation liée à la lumière du jour et à la présence de personnes permet des gains d'environ 40 MJ_{el}/m²_{SRE}a dans les bâtiments neufs et de 60 à 120 MJ_{el}/m²_{SRE}a dans la rénovation. On peut obtenir des gains comparables en prenant des mesures directes ou indirectes touchant la ventilation et le refroidissement, par exemple en réduisant les pertes de charge, en adaptant les réglages aux besoins (p.ex. en fonction du CO₂), en maintenant à moins de 70% la proportion des vitrages, en réglant l'action des pare-soleil (p.ex. par température extérieure dépassant 16 à 20°C), en limitant le refroidissement (temp. idéale non inf. à 26°C), en rendant plus efficace la production et la distribution de froid grâce à une différence de température modeste (coeff. performance annuel >5), en tirant parti de l'inertie thermique du bâtiment et en ouvrant les fenêtres pour le rafraîchir.

| | | Bâtiments neufs | | | | Bâtiments existants | | | |
|--|-------------------------------------|-----------------|-----|---------------|-----|---------------------|------|--------------|-----|
| | | Standard | | Good practice | | Avant | | Après rénov. | |
| | | de | à | de | à | de | à | de | à |
| Electricité | Charges int. (app., sans éclairage) | 40 | 120 | 30 | 60 | 40 | 120 | 30 | 60 |
| | Eclairage | 60 | 100 | 25 | 40 | 100 | 160 | 40 | 80 |
| | Ventilation (air pulsé) | 25 | 45 | 15 | 25 | 160 | 290 | 15 | 30 |
| | Refroidissement | 30 | 110 | 10 | 30 | 20 | 50 | 10 | 30 |
| | Total sans pompe à chaleur (*) | 100 | 350 | 80 | 140 | 180 | 530 | 90 | 150 |
| | Chauffage (PAC) | 30 | 100 | 20 | 35 | - | - | 25 | 40 |
| Combustible. | Chauffage air pulsé | 50 | 100 | 15 | 30 | 260 | 400 | 20 | 35 |
| | Autres besoins de chaleur | 90 | 280 | 70 | 120 | 380 | 600 | 80 | 140 |
| | Total combustibles (*) | 140 | 280 | 85 | 140 | 430 | 1000 | 100 | 150 |
| (*) Le total ne correspond pas à la somme des éléments parce que toutes les catégories ne sont pas représentées partout et que les valeurs minimales et maximales ne se combinent pas forcément. | | | | | | | | | |

Tableau R. 1 Plages des indices de dépense d'énergie (consommation finale; MJ/m²a)

Interactions entre besoins de chaleur et d'électricité

Dans l'optique du confort, la réduction des besoins d'électricité et de combustible engendre parfois des conflits d'objectifs, mais elle peut aussi offrir des possibilités de synergie:

- *La synergie* résulte fréquemment du réglage amélioré des équipements de ventilation (en fonction de la production de CO₂ ou de la présence de personnes) et de refroidissement d'un bâtiment (élimination des excès de refroidissement), car ces mesures diminuent tant les besoins de chaleur que ceux d'électricité. La modernisation de l'éclairage accroît certes les besoins de chauffage et éventuellement d'énergie fossile, mais cela dans une mesure relativement modeste; il y a en tous cas gain d'énergie primaire. Il en va généralement de même avec une pompe à chaleur efficace.
- L'isolation thermique poussée de l'enveloppe du bâtiment a des effets tant positifs que négatifs en termes de confort thermique. D'une part celui-ci s'améliore en période froide, notamment en comparaison avec les bâtiments existants non isolés et de façon générale dans les bâtiments à forte proportion de vitrages, parce qu'il y a moins de surfaces froide et de courants d'air glacial. D'autre part, l'isolation thermique d'une façade qui en était privé risque d'en aggraver la surchauffe, surtout dans des locaux déjà critiques, privés de refroidissement actif et passif, et dont il est difficile ou impossible d'ouvrir les fenêtres (ceci n'est pas forcément le cas pour l'isolation thermique des toitures, car l'isolation thermique prévient aussi les gains de chaleur qui ont une importance beaucoup plus élevée aux toitures). Il faut alors recommander le recours à des verres sélectifs (valeur g modeste, comprise entre 0,35 et 0,42, mais bonne transmission de la lumière) et la combinaison des mesures d'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment avec d'autres interventions touchant l'énergie et le confort (refroidissement passif ou actif, réduction des charges internes, notamment au moyen d'un éclairage efficace et bien réglé).
- La protection accrue vis-à-vis du soleil accroît certes le confort thermique et réduit les besoins de refroidissement, mais réclame davantage d'éclairage. On peut largement y remédier au moyen d'un système de refroidissement très efficace, réglé en fonction de la saison. Lorsqu'il ne fait pas très chaud, il faut préférer l'éclairage naturel au détriment de la protection solaire. Si les fenêtres à gain solaire ayant une valeur g élevée (en comparaison du standard à valeur U du verre correspondant) augmentent les gains solaires en période de chauffage, elles ne sont pourtant pas recommandées pour les bâtiments de services, car elles aggravent le risque de surchauffe en été. De leur côté, les fenêtres à protection solaire (faible valeur g) améliorent certes le confort estival, mais elles réclament plus de chauffage et plus d'électricité (éclairage).

Rentabilité des mesures pour plus d'efficacité

La principale conclusion à retenir d'emblée est que la rentabilité de ces mesures dépendra moins du niveau d'efficacité énergétique que **des options prises à l'échelon de l'architecture et de la conception, ainsi que du niveau de confort recherché**. Mentionnons la taille du bâtiment (effets d'échelle), sa forme, les matériaux choisis, le type de façade, la proportion de vitrages, le type de pare-soleil et leur répartition, la ventilation et / ou le refroidissement (ou leur absence). Ainsi la modification de la part de vitrages peut entraîner des surcoûts de $10 \text{ CHF/m}^2_{\text{SRE}}\text{a}$ et davantage, cela pour des retombées relativement modestes sur les besoins d'électricité et de combustible. De même, l'amélioration du confort au moyen du refroidissement et de la ventilation entraîne des surcoûts pouvant atteindre $15 \text{ CHF/m}^2_{\text{SRE}}\text{a}$.

Dans les bâtiments existants, la rentabilité des mesures touchant le bâtiment et les installations dépend non seulement de leur coût et de leur effet énergétique, mais encore – facteur important – **de la situation initiale et de la base de comparaison des coûts**. La comparaison fréquemment faite avec les dépenses courantes (pour l'énergie) n'est pas appropriée, parce que les investissements consentis accroissent la valeur réelle du bâtiment (et la productivité des personnes qui y travaillent). Objectivement, il vaut mieux comparer la rentabilité de deux options, la "réfection" et le "renouvellement énergétique standard", si difficile que soit la définition de leurs bases économiques. L'une et l'autre option révélera des investissements rentables, comme l'indiquent la présentation synoptique Tableau R.2 et les remarques qui suivent. On a comparé les coûts annuels nets et les coûts spécifiques bruts en se référant à des constructions neuves typiques et à la rénovation énergétique, parfois à la réfection. Il existe des différences importantes entre les divers types de mesures, voire à l'intérieur de chacun d'eux, notamment selon la situation de référence¹.

Une **protection thermique plus poussée** de l'enveloppe (isolation renforcée, fenêtres à valeur U réduite) est un facteur décisif d'efficacité énergétique du bâtiment. Avec les prix actuels de l'énergie (0,07 à 0,08 CHF/kWh), les mesures prises à cet effet sont généralement rentables ou du moins, peu onéreuses (surcoûts n'atteignant pas $1\text{--}2 \text{ CHF/m}^2_{\text{SRE}}\text{a}$) jusqu'à des valeurs U de $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ou une épaisseur d'isolation de 20 cm. C'est vrai aussi bien pour la construction neuve que pour les bâtiments existants, notamment si une remise en état s'impose de toute façon, et même, si la façade est simple, en comparaison des dépenses courantes pour l'énergie. Avec une façade complexe, la rénovation énergétique est également rentable par rapport à une rénovation onéreuse, mais non en comparaison de simples mesures d'entretien.

Des éclairages énergétiquement efficaces (réglage compris) sont un facteur décisif d'efficacité énergétique et de confort. Surtout après rénovation d'un bâtiment existant, ils contribuent à la qualité ergonomique de la lumière (pas de scintillement, puissance, couleur de l'éclairage et fidélité dans le rendu des couleurs) et dégagent moins de chaleur. Les mesures à prendre pour cela sont généralement rentables ou n'engendrent que des surcoûts modérés, ne dépassant pas $2 \text{ CHF/m}^2\text{a}$, dans la règle, aussi bien dans la construction que dans la remise en état. Par contre, si l'on s'appuie sur les dépenses courantes pour l'énergie, leur réduction ne compense pas le prix du renouvellement complet de l'éclairage, ce qui explique peut-être la rareté de l'opération.

Le coût élevé de l'utilisation du bâtiment provoque le plus souvent **une forte densité d'occupation et de dotation en appareils**. Il en résulte **d'importantes charges thermiques internes** (p. ex. éclairage moyennement efficace: env. 80 à $100 \text{ MJ/m}^2_{\text{SRE}}\text{a}$, appareils: jusqu'à $120 \text{ MJ/m}^2_{\text{SRE}}\text{a}$). Plus les charges internes résiduelles sont élevées et la protection thermique du bâtiment poussée, plus il est difficile de maintenir un niveau de confort acceptable pendant les périodes estivales ensoleillées et entre-saisons. Les techniques de **refroidissement passif** (*ouverture automatisée des fenêtres ou*

¹ Le Tableau R.2 fait la part belle aux mesures de rénovation, qui rapportent davantage. Mais les résultats obtenus dans la construction neuve peuvent être relativement tout aussi significatifs. Pour mieux comprendre les écarts constatés, on se référera au tableau Z.4 du résumé plus détaillé, p.30.

dispositifs de parapet avec ouvertures pour l'aération) apportent de substantielles améliorations du confort sans nécessiter des équipements de ventilation et de refroidissement. Leurs coûts annuels se situent entre quelque 5 et 10 CHF/m²_{SREA}. Toutefois le refroidissement passif n'est pas toujours possible (selon la situation initiale et l'emplacement du bâtiment) et bien souvent il est insuffisant pour répondre à des exigences élevées de confort thermique (conform. au à la révision de la norme SIA 382/1). Dans certains cas, il conviendrait par conséquent de réexaminer ces exigences lorsqu'elles s'appliquent à des bâtiments non ventilés ni refroidis.

| | Electricité Δ ind. én. _{el} MJ/m ² _{SREA} | Chaleur (consom. final) Δ ind. én. _{comb.} MJ/m ² _{SREA} | Coûts annuels nets (1, 2) CHF/m ² _{SREA} | Coûts spécifiques bruts (1) CHF/kWh _{comb} CHF/kWh _{el} | Effets confort; heures de surchauffe selon limite de la révision de la norme SIA 382/1 (espaces sud) |
|---|---|--|---|--|---|
| Architecture (3) | +15 bis +25 | -50 bis -60 | -15 bis +20 | Non examiné | Non examiné |
| Charges internes: densité d'occupation, appareils plus efficaces | -40 bis -80 | +10 bis +40 | + 30 bis +40 (taux d'occu- pation) (4) | Non examiné | Surchauffe: jusqu'à -200 h |
| Isolation thermique | Négligeable | -100 bis -150 | -0.5 bis +1 | 0.05 bis 0.13 * | Meilleur confort thermique en hiver; surchauffe: +50 à +200 h |
| Fenêtres / vitrages, protection solaire | -20 bis +15 | +20 bis -400 | -1 bis +5 | 0.03 bis 0.2 * | Meilleur confort thermique en hiver; surchauffe: -120 à + 800 h |
| Eclairage | -20 bis -110 | +10 bis +60 | -1 bis +2.5 | * -0.05 bis +0.4 | Meilleure ergonomie éclairage; surchauffe: jusqu'à -200 h |
| Ventilation/refroidissement (efficacité énergétique) | -10 bis -160 | -50 bis -250 | -10 bis + 1.5 | * -0.25 bis + 0.4 (5) | Meilleure qualité de l'air, moindre concentration de CO ₂ surchauffe: + quelques 10 h |
| Ventil./refroid. (confort) | +10 bis +100 | -50 bis +5 | +3 bis +15 | 0.17 bis 0.3 (5) * | Surchauffe: jusqu'à -900 h (-1200 h) |
| Production de chaleur PAC et non én. fossile | +30 bis + 80 | -30% -100% | -0.5 bis +1 | n.a. | - avec des sondes terrestres, quelques centaines d' heures |
| Bois et non én. fossile | Négligeable | En. renouv. et non fossile | +1 bis +2 | n.a. | |
| * néant (1) constr. neuve standard ou rénovation énergétique (réfection partielle), intérêt réel 3% (2) coût combustible 7 ct./kWh, coût électricité 17 ct./kWh (3) part vitrages, choix du matériau, conception (4) appareils supposés sans effets / coûts (5) coûts nettement inférieurs si le confort amélioré était pris en compte Important: <u>on ne peut pas</u> directement additionner les potentiels d'efficacité énergétique des différents secteurs (interactions) | | | | | |

Tableau R. 2 Vue agrégée de l'effet énergétique, des modifications de confort, des coûts spécifiques bruts (CHF/kWh) et des coûts et bénéfices nets (CHF/m²a) des différents types de mesures (sans évaluation économique du gain de confort). Source CEPE et al., tableau Z.4, p. 30

Le refroidissement (actif ou passif) des bâtiments ne peut que prendre de l'importance, notamment *du fait du réchauffement prévisible du climat en Suisse au cours des trois à cinq décennies à venir*. Il conviendrait de tenir compte plus systématiquement de cette perspective dans la construction et dans les investissements en faveur des immeubles existants, afin d'éviter d'avoir à consentir d'inutiles réinvestissements ou d'être confronté à des dépenses d'électricité exagérées ou encore à des blocages sociaux. Le refroidissement actif (air pulsé, éléments de construction thermoactifs, plafond réfrigérant, refroidissement de l'air frais, refroidissement nocturne par ventilation) entraîne des surcoûts qui sont dans la règle de 3 à 15 CHF/m²_{SREA}. Il importe donc d'axer le système sur une efficacité élevée (avec p.ex. une faible charge de chaleur pour l'eau de refroidissement), ce qui est rentable ou n'engendre que des surcoûts modestes (0 à 2 CHF/m²_{SREA}) et permet un refroidissement très efficace (<30 MJ_{el}/m²_{SREA}a, en combinaison avec les mesures indirectes citées plus haut). Ainsi le refroidissement ne jouera pas un rôle excessif par rapport aux autres applications de l'électricité (éclairage, air pulsé, appareils) comme on le croit souvent. Il faut toutefois

relever ici que la consommation d'énergie de refroidissement réagit vivement (augmentation à plus de $100 \text{ MJ}_{\text{el}}/\text{m}^2_{\text{SRE}}\cdot\text{a}$) si l'on néglige les mesures directes et indirectes qui ont été mentionnées.

L'installation de ventilation est à considérer avant tout comme un équipement de confort et d'hygiène de l'air. Dotée d'un récupérateur de chaleur, elle réduit certes la demande nette de chauffage mais ne saurait se justifier économiquement dans la seule perspective de l'efficacité énergétique (coûts marginaux sensiblement supérieurs aux coûts de production de chaleur). L'une des raisons en est que même si sa conception privilégie les impératifs d'hygiène de l'air, la renouvellement de l'air est généralement plus rapide qu'avec l'ouverture des fenêtres (le plus souvent certes insuffisante dans l'optique de l'hygiène de l'air), ce qui réduit l'effet net de cet équipement et des pompes à chaleur alimentées à l'air vicié. Le bien-être exige un refroidissement approprié de l'air frais, sans lequel le confort diminue (menace de surchauffe). Le choix du *forced free cooling* (taux de renouvellement de l'air plus élevé et/ou périodes de fonctionnement plus longues, en particulier pendant les nuits) peut se justifier dans certains cas isolés pour des raisons de coût (possibilité de renoncer à la distribution hydraulique de froid). Cette solution doit toutefois être adoptée après mûre réflexion seulement, car ses besoins de courant risquent de dépasser rapidement ceux d'un bon refroidissement hydraulique. Le coût annuel de l'installation de refroidissement atteint en règle générale $10 \text{ CHF}/\text{m}^2\cdot\text{a}$, un montant plus ou moins indépendant du niveau d'efficacité énergétique atteint. Il importe donc de veiller à avoir de faibles pertes de charge ($<700 \text{ Pa}$), avec des ventilateurs et des moteurs électriques très efficaces, soit un taux d'efficacité élevé ($<0,3 \text{ Wh}/(\text{m}^3/\text{h})$) ainsi que des réglages adaptés aux besoins (en fonction du CO_2). Ces mesures permettent de réduire la consommation d'électricité des bâtiments neufs (gain de 20 à plus de $30 \text{ MJ}/\text{m}^2\cdot\text{a}$, soit jusqu'à deux tiers en moins) comme des bâtiments rénovés (gain de 70 à $130 \text{ MJ}/\text{m}^2\cdot\text{a}$), avec des gains pouvant dépasser $250 \text{ MJ}/\text{m}^2\cdot\text{a}$ dans certains cas. Le recours à des équipements de récupération de chaleur au coefficient de performance amélioré (plus de 85%) est également rentable.

Dans bien des cas, p.ex. dans les bâtiments aux façades complexes ou protégées, aux espaces exigus, la **pompe à chaleur** ou la PAC alimentée à l'air vicié constitue une solution intéressante du point de vue énergétique et technique, permettant d'abaisser la consommation de combustible pour le chauffage. A condition de réaliser une installation très efficace ou de tirer parti des synergies avec le refroidissement du bâtiment, on pourra compenser l'investissement supplémentaire en comprimant les dépenses pour l'énergie et l'exploitation.

Les coûts nets pourraient se trouver sensiblement réduits, voire devenir des bénéfiques si la comptabilisation ajoutait aux moindres dépenses d'énergie le **gain de confort**, évalué économiquement (voir sous-chapitre suivant). Inversement, il faut presque toujours s'attendre à des coûts nets et à des coûts bruts plus élevés si la comparaison se base uniquement sur les dépenses courantes pour l'énergie. Sont rentables les mesures dont le coût spécifique brut est inférieur à la moyenne des prix du combustible ou de l'électricité (moyenne calculée sur la durée de la mesure prise).

Conclusions de l'analyse économique

- (1) Dans les bâtiments utilitaires neufs ou rénovés, il est possible d'**améliorer le confort** et de **réduire sensiblement les besoins de combustible et d'électricité du bâtiment** en prenant des mesures appropriées. Pour abaisser de manière significative l'ensemble de la demande d'électricité, on doit étendre l'effort aux **appareils de bureau**, dont la consommation représente généralement une part importante des charges internes. Des projets bien conçus permettent de réaliser tant des immeubles neufs peu gourmands d'énergie que, dans les immeubles existants, la modernisation énergétique des équipements et de l'enveloppe dans des conditions rentables ou au prix d'un surcoût modeste (0 à quelques $\text{CHF}/\text{m}^2\cdot\text{a}$).

- (2) Les dépenses annuelles (brutes) pour l'énergie sont bien plus fortement influencées par les exigences de confort et les équipements supplémentaires (refroidissement actif, ventilation) et par les choix fondamentaux de l'architecte (type de façade, emplacement du pare-soleil, design architectonique extérieur et intérieur). Les coûts qui y sont liés atteignent entre 10 et quelques dizaines de CHF/m²a. A titre de comparaison: les coûts annuels intégraux des éléments d'un bâtiment du secteur public et commercial (avec les installations) qui déterminent la dépense d'énergie atteignent 50 à 100 CHF/m²a, les coûts totaux de capital et d'exploitation 300 à 400 CHF/m²a et les coûts de personnel approximativement 5000 à 10000 CHF/m²a. Il suffit que des locaux surchauffés ou trop refroidis, ou encore l'air vicié, réduisent la productivité des personnes qui y travaillent pour qu'il faille mesurer à cette aune la valeur de toute intervention touchant la protection thermique ou la demande d'énergie. Le très important bénéfice à attendre des mesures à caractère énergétique dans ces bâtiments est une réalité largement négligée, peut-être parce qu'elle est trop peu connue et n'a par conséquent guère été prise en compte dans l'appréciation des investissements pour l'énergie et des mesures d'organisation.

Conclusions touchant la politique de l'énergie et de la construction

La saisie des coûts et la définition de leurs éléments déterminants n'intéresse pas seulement l'appréciation économique des mesures pour l'efficacité énergétique, mais aussi la politique de l'énergie. Les concepteurs et les entrepreneurs appelés à travailler à la construction ou à la remise en état et à la modernisation des bâtiments travaillent le plus souvent chacun de leur côté. Le maître de l'ouvrage désireux de faire les meilleurs choix énergétiques perd beaucoup de temps à s'informer et à chercher pour finalement décider. Les nombreuses interfaces empêchent la transparence et la compréhension d'ensemble, rendant impossible la comparaison des possibilités d'investissement du fait des délimitations différentes et des coûts connexes souvent non négligeables. Tant la subdivision du travail que la pression de la concurrence font que les prestations doivent coûter le moins cher possible. Cette tendance est toutefois contraire à la nécessité de réduire les coûts du cycle de vie (et partant, de préférer les solutions efficaces au plan énergétique).

Une amélioration plus poussée de l'efficacité énergétique se heurte obstinément à des entraves d'organisation du marché. Ces entraves diffèrent selon les **groupes-cibles** qui en sont affectés.

- *L'amélioration des connaissances* que possèdent les investisseurs, les concepteurs et les entrepreneurs au sujet des possibilités d'investissement passe par beaucoup d'information, une plus grande transparence du marché et la réduction des coûts des transactions. Cinq aspects en particulier méritent d'être encouragés ; ce sont :

| | |
|----|---|
| 1° | <i>les services de conseil au démarrage et à la mise en œuvre</i> fournis aux propriétaires immobiliers (aspects financiers et conceptuels) |
| 2° | <i>les campagnes ciblées de mesure et d'information émanant des producteurs d'équipements techniques, à l'intention des concepteurs et des utilisateurs</i> (comme la campagne « Druckluft » 2006) |
| 3° | <i>les offres classiques de formation et de perfectionnement professionnels, 4° le développement des réseaux locaux d'acquisition de connaissances</i> (analogues aux modèles AEnEC et à energho) pour les sociétés immobilières et les propriétaires de bâtiments commerciaux |
| 5° | <i>l'adoption plus fréquente du label MINERGIE</i> et la mise en œuvre du <i>passport bâtiment</i> en Suisse. Il faut recommander avant tout le financement initial des réseaux locaux, particulièrement payant. Les mesures citées devront être préparées et mises en œuvre par l'administration fédérale et les cantons, en collaboration avec les associations professionnelles, notamment par le biais des normes SIA (adoption et application). A l'ordre du jour, la question de savoir comment accroître l'efficacité des moteurs électriques, ventilateurs, équipements cryogènes, pompes et plans d'installations, et comment promouvoir la conception intégrée, l'optimisation de l'exploitation et la gestion des immeubles. |

- **Les professionnels de l'efficacité énergétique, c-à-d les concepteurs et les fournisseurs de technologies** sont interpellés à l'échelon de l'organisation (du marché), à celui du *développement technique*, de la *diffusion de technologie et de savoir-faire* ainsi que du *marketing*: il importe de faire plus largement connaître les méthodes et standards régissant les commandes et réglages adaptatifs (autodidactiques) pour les bâtiments (p.ex. la ventilation liée à la concentration en CO₂, l'optimisation précoce et complète des besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage avec recours aux prévisions météorologiques) ainsi que le refroidissement haute-performances pour le bâtiment. En termes de marketing, les concepteurs et les fournisseurs doivent associer les solutions proposées à du vécu, à des formes de vie plus saine, à un confort accru (hygiène de l'air, bien-être thermique, ergonomie améliorée de l'éclairage), à une meilleure productivité au travail et à une sorte de prestige. Il faut encore familiariser les investisseurs avec des notions telles que la protection améliorée contre le bruit et contre l'effraction, les moins longues périodes d'attente d'une location ou d'une location-vente, ainsi que la qualité améliorée et les intérêts du crédit diminués du fait de la Convention de Bâle.
- On sous-estime parfois le rôle des **intermédiaires**, qui font baisser les coûts des transactions par *l'adoption de normes et la standardisation* ou qui éliminent d'importantes lacunes du savoir au moyen de la formation et du perfectionnement professionnels. Les normes, standards et benchmarks (p.ex. des normes comme SIA 380/4 ou SIA 382/1 et les exigences MINERGIE) constituent des instruments de décision dans le domaine technique, dont la principale qualité est de distinguer entre les solutions standard et les options axées sur l'efficacité. Normes et benchmarks peuvent s'appliquer aussi bien au système (besoin annuel d'énergie ou coûts spécifiques de l'énergie par m² et par année) qu'au composant isolé (cela pour des raisons d'exécution et pour tenir compte d'un marché où la division du travail et la spécialisation sont très poussées et où dominant les petites entreprises). Normes et recommandations (p.ex. sur les valeurs-limites et les valeurs-cibles) ont une valeur pratique pour les professionnels, qui y trouvent des éléments d'information, des bases de conception et le fondement de contrats de droit civil entre maîtres d'ouvrage et fournisseurs de prestations. Voilà pourquoi il conviendrait que la normalisation, qui relève largement du droit privé (p.ex. les Energycodes SIA) obtienne de l'Etat une aide tendancielle plus élevée qu'aujourd'hui. Les normes ne doivent pas nécessairement être ancrées dans la loi, mais peuvent s'inscrire dans *des instruments de conception et des « tools » d'un emploi relativement facile*. Il faut tendre aussi à multiplier les *publications spécialisées* (comme en a produites jadis le programme RAVEL) fournissant des contenus techniques et des appréciations économiques (p.ex. des coûts sur tout un cycle de vie et des considérations coûts/bénéfices) ainsi que le développement de *benchmarks intégrés* et d'*instruments de conception, de travail et de mise en œuvre* qui facilitent *une vue globale*, qui révèlent les rapports coûts/bénéfices essentiels et sont souvent la condition première de l'optimisation.

Toutes les activités qui viennent d'être recommandées devraient certes relever principalement des organisations économiques elles-mêmes et de certaines entreprises, mais une initiative des pouvoirs publics et l'appui financier et moral de la Confédération, des cantons et des plus grandes communes leur seraient sans doute très bienvenus, car lesdites activités sont d'intérêt public et elles constituent des apports à l'économie globale (emploi, amélioration des potentiels d'exportation, efficience économique).

- **Législation**: les prescriptions techniques et architecturales dans le domaine de la construction, surtout dans le neuf, ont révélé être des instruments tout-à-fait utiles (p.ex. pour l'isolation thermique avec SIA 380/1 et MoPEC). **Il y a un retard à combler dans le domaine de l'électricité.** Les normes 380/4 et 382/1 pourront servir de base. De telles prescriptions influencent indirectement aussi la rénovation de bâtiments et d'installations, où le progrès technique qu'elles induisent est bien souvent pris en compte. Des benchmarks et des standards pourraient valoir des facilités à l'exportation de produits destinés à l'équipement technique des bâtiments. Quant à la mise en œuvre, elle doit être simple et efficace (les travaux en cours pour SIA 380/4 sont à intensifier). De plus, **la mise en œuvre** doit se doubler d'**éléments à caractère incitatif**, par exemple des procédures d'autorisation souples. Mentionnons les modèles pour gros

consommateurs (MoPEC module 8) ainsi qu'une démarche duale (cf. norme SIA 382/1, ZH, GE): lorsque des valeurs aisément mesurables (p.ex. puissance installée, vitesse d'écoulement, ou pour un bâtiment existant, indice énergétique) se situent en dessous d'un certain seuil, on peut se passer de présenter la preuve du besoin ou une autorisation, d'installer le DIFC ou d'établir un plan des mesures à prendre. Il faut examiner aussi l'opportunité d'un renouvellement obligatoire, au terme de périodes de réinvestissement spécifiques pour chaque technologie. La coordination des mesures de mise en œuvre, si possible dans tout le pays, serait de nature à produire des effets d'échelle dans le perfectionnement professionnel et à créer des conditions générales semblables dans les cantons, ce dont le marché libre ne peut que profiter.

- Les **collectivités publiques** (Confédération, cantons et communes) sont propriétaires d'une bonne partie des bâtiments utilitaires. Il conviendrait qu'elles procèdent dans chaque canton à la rénovation ciblée de certains types de bâtiments (p.ex. écoles, bureaux) à titre de **démonstration d'un comportement exemplaire**, condition première d'une politique crédible pour faire passer des exigences élevées dans les domaines de l'énergie et du climat. De leur côté, les entreprises d'approvisionnement en électricité pourraient offrir des tarifs incitatifs (cf. p.ex. EWZ) au moins jusqu'au niveau d'un least cost planning.

Quant aux composants de la bureautique, qui contribuent largement aux charges internes mais qui sont commercialisés dans le monde entier, leur efficacité énergétique devrait figurer plus souvent à l'ordre du jour des organes compétents de l'AIE, des instances de normalisation et de l'UE.

Enfin il incombe aux institutions actives dans *la recherche et le développement* de produire des instruments de conception simples et rapides intégrant les rapports complexes entre protection thermique, charges internes, installations du bâtiment et solutions peu onéreuses que la présente étude a mis en évidence au moyen de simulations d'envergure (p.ex. compléter l'outil SIA pour la ventilation et la climatisation ou le configurateur d'éclairage par des indices de coûts et des modules de rentabilité Good practice). De même, les thèses qui se dégagent de cette étude doivent rapidement trouver place dans les modèles actuels d'économie énergétique: ces thèses sont le bien-être lorsque les charges thermiques augmentent du fait des appareils de bureautique, les températures extérieures qui tendent elles aussi à augmenter (évolution du climat), les besoins croissants de confort des utilisateurs, et les gains de productivité souhaités par les employeurs tant publics que privés.

Résumé

Situation initiale, objectifs et méthode d'analyse

En Suisse, la réduction de la demande énergétique dans le bâtiment recèle de grands potentiels d'efficacité énergétique. S'agissant des bâtiments d'habitation, on dispose dans notre pays de bonnes connaissances sur les potentiels, les coûts et les bénéfices additionnels grâce à de récentes études comparatives (par ex. Jakob 2002, Jakob 2003). Quant aux informations sur les bâtiments du *secteur des services, du commerce et de l'industrie* (désignés ci-après par bâtiments commerciaux), elles sont encore très lacunaires, voire dépassées (Basler et Hofmann, 1992); les résultats relatifs aux bâtiments d'habitation ne s'appliquent que sous réserve aux bâtiments commerciaux. Pour les principales catégories de bâtiments de ce secteur, il convient d'accorder davantage d'importance à la *protection thermique estivale* et aux *aspects de confort*: les charges thermiques internes élevées, la productivité des gens qui travaillent ainsi que le confort des utilisateurs (par ex. clients, patients, participants aux séances) requièrent des normes de confort plus sévères. Il faut donc des références énergétiques différentes et une plus grande palette de mesures avec les interactions éventuelles, en particulier en matière de protection thermique estivale, de refroidissement, de climatisation et d'éclairage.

Compte tenu de cette situation, le projet s'est fixé les *objectifs principaux* ci-après:

- Coûts marginaux selon l'état actuel des coûts: le projet vise à mettre à jour empiriquement la connaissance des coûts marginaux moyens des mesures prises en faveur de l'efficacité énergétique (protection thermique hiver comme été, ainsi que techniques de chauffage, de ventilation, de climatisation, et éclairage) pour les principales catégories de bâtiments commerciaux, tout en faisant la distinction entre la construction et la rénovation.
- Bénéfices additionnels: dans certains cas, on a aussi voulu évaluer, et si possible chiffrer (parfois en francs), de possibles bénéfices additionnels. Ils ont été identifiés d'après les déclarations sur les modifications du confort induites par les mesures d'efficacité énergétique.
- Il s'agissait enfin d'émettre des recommandations à l'adresse des principaux intéressés: investisseurs et concepteurs de nouveaux bâtiments, exploitants et propriétaires de bâtiments existants, professionnels de l'enveloppe et des installations du bâtiment et responsables de la recherche en techniques et en économie énergétiques.

Quant à la *méthode*, l'analyse a porté sur la demande énergétique des bâtiments et sur les mesures prises pour la réduire au niveau des composants individuels (protection thermique et solaire de l'enveloppe du bâtiment, éclairage, ventilation, refroidissement, techniques diverses, par ex. pompes à chaleur) et de la performance globale pour le type de bâtiment correspondant. Les *catégories de bâtiments* se distinguent par leur architecture, leur utilisation, leur mode de construction et leurs installations techniques. On fait notamment la distinction entre bâtiments avec charges internes élevées ou faibles, part des vitrages importante ou modeste, et bâtiments sans ou avec ventilation et/ou refroidissement actif. Les considérations relatives aux coûts s'appuient sur des situations de référence basées sur les normes légales et sur le mode actuel de construction (pour un bâtiment neuf), sur l'état actuel des anciens bâtiments (avant une rénovation) et sur les mesures courantes en matière de remise en état ou de rénovation.

En vue de reproduire correctement les *interactions entre les différents éléments du bâtiment et de la technique*, on a réalisé, pour les différentes combinaisons de bâtiments et de mesures, des simulations annuelles avec le *programme de simulation IDA-ICE*, qui reflète les phénomènes de la physique du bâtiment de chaque instant (pertes, gains et stockage de chaleur, besoins d'éclairage, demande d'électricité pour le refroidissement et l'air pulsé). Il en résulte la consommation annuelle d'énergie répartie entre les différentes formes (électricité, chaleur), les différentes formes d'énergie utile (chauffage, ventilation, refroidissement, éclairage) et les charges internes. Les résultats de cette simulation mettent aussi en évidence l'inconfort thermique et le dépassement de températures agréables (nombre d'heures annuel avec températures intérieures supérieures à une valeur-limite fixée conformément au projet SIA 382/1).

La saisie des coûts pour les mesures d'efficacité énergétique dans le domaine des fenêtres, des vitrages, des isolations thermiques, de l'éclairage, de la climatisation, de la protection solaire et des commandes/réglages a été effectuée par des ingénieurs, concepteurs et fournisseurs de prestations dans le bâtiment sous forme d'indices de coût. S'agissant des installations techniques, on a également pris en compte des alternatives (par ex. lampes de puissances diverses, réglage de lumière, postrefroidissement «classique», aéroréfrigérants hybrides, petits climatiseurs, refroidissement de l'air frais, air pulsé, plafonds réfrigérants, éléments de construction thermoactifs).

Ces études ont finalement débouché sur les calculs des coûts marginaux et des rapports coûts/bénéfices pour les combinaisons de bâtiments et de mesures définies. Les coûts annuels et leur structure (coûts de capital et d'entretien, coûts énergétiques) ont été déterminés en fonction de la saisie des coûts d'investissement (méthode des annuités) et des besoins spécifiques en énergie et en puissance (simulations de bâtiments). Pour évaluer les diverses mesures, les coûts annuels ont été mis en parallèle avec les valeurs de confort, en tenant compte des possibilités de synergie, notamment entre l'isolation thermique et la protection contre la surchauffe ou entre les besoins de chaleur et d'électricité.

Besoins énergétiques des diverses catégories de bâtiments et effets énergétiques induits par les mesures prises

Les catégories de bâtiments ont été définies de manière à prendre en compte la diversité des bâtiments neufs et existants: c'est pourquoi la structure de la demande énergétique est très différenciée en fonction de la configuration architecturale et énergétique des bâtiments. Un train de mesures a été défini sur la base de la situation de référence et représenté de manière à mettre en évidence les effets des diverses stratégies (par ex. enveloppe du bâtiment – puis mesures techniques du bâtiment ou inversement, combustibles – puis mesures relatives à l'électricité ou inversement). Conformément aux simulations, les indices énergétiques (IDE) du chauffage, respectivement des combustibles et de l'électricité, varient considérablement (combustibles; 100 à 1000 MJ/m²a; électricité; 80 à 500 MJ/m²a; cf. Tableau Z.1).

| | Bâtiment neuf | | | | Bâtiment existant | | | |
|--|---------------|-----|---------------|-----|-------------------|-----------|--------------|-----|
| | Standard | | Good practice | | Avant rénov. | | Après rénov. | |
| | de | à | de | à | de | à | de | à |
| Electricité Charges int. (app. sans éclairage) | 40 | 120 | 30 | 60 | 40 | 120 | 30 | 60 |
| Eclairage | 60 | 100 | 25 | 40 | 100 | 160 | 40 | 80 |
| Ventilation (air pulsé) | 25 | 45 | 15 | 25 | 160 | 290 | 15 | 30 |
| Refroidissement | 30 | 110 | 10 | 30 | 20 | 50 | 10 | 30 |
| Total, sans pompe à chaleur (*) | 100 | 350 | 80 | 140 | 180 | 530 | 80 | 160 |
| Chauffage (PAC) | 30 | 100 | 20 | 35 | k.A. | k.A. | 25 | 40 |
| Combustible Chauffage air pulsé | 50 | 100 | 15 | 30 | 260 | 400 (**) | 20 | 35 |
| Autres besoins de chaleur | 90 | 280 | 70 | 120 | 380 | 600 | 80 | 140 |
| Total combustibles (*) | 140 | 280 | 85 | 140 | 430 | 1000 (**) | 100 | 150 |

(*) Le total ne correspond pas à la somme des éléments parce que toutes les catégories ne sont pas représentées partout et que les valeurs minimales et maximales ne se combinent pas forcément.

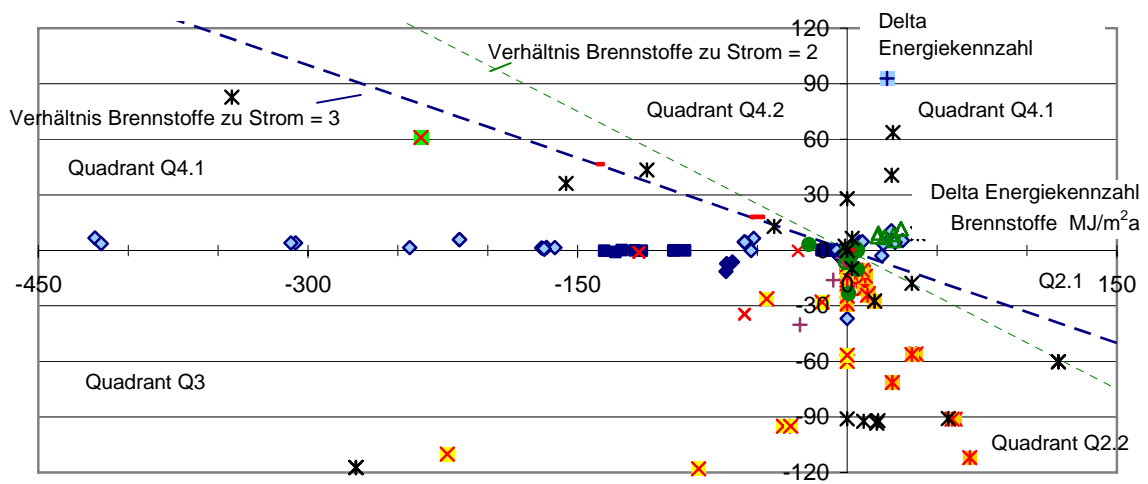
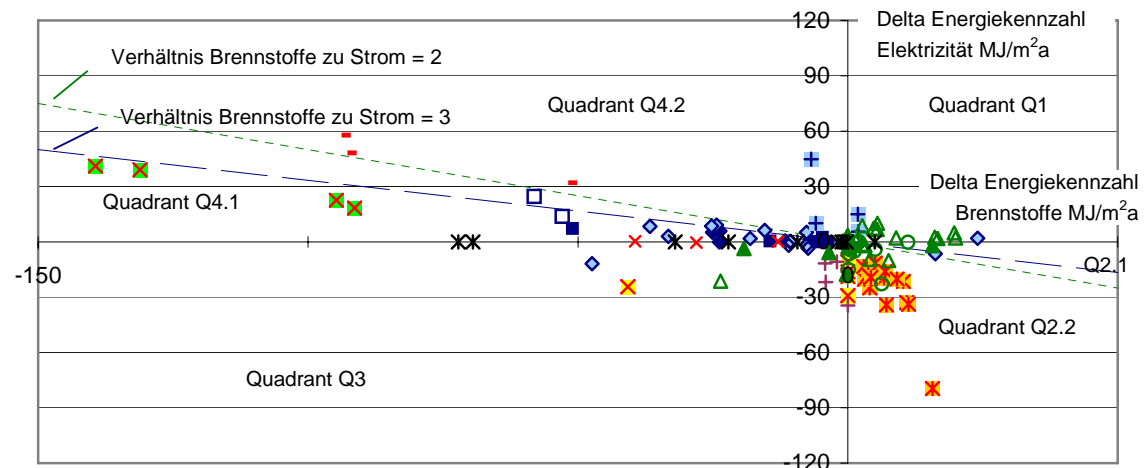
(**) Pour fonctionnement de 24 h, 7 jours sur 7, jusqu'à 1200 MJ/m²a (LA) ou jusqu'à 1750 MJ/m²a (Total combustibles)

Tableau Z.1 Plages des indices de dépense d'énergie (énergie finale) pour bâtiments neufs et existants (MJ/m²a)

S'agissant de la structure de l'indice énergétique, les différences entre les divers types de bâtiments sont aussi considérables. Suivant la constellation, ces différences peuvent déboucher sur des changements dans la classification des prestations énergétiques. Il convient notamment de signaler qu'avec une conception, une exécution et une exploitation optimales du refroidissement du bâtiment (demande de 10 à 30 MJ/m²a), celui-ci ne joue pas un rôle prépondérant dans la consommation d'électricité par rapport aux autres utilisations de courant. Il est tout à fait possible que la demande pour l'éclairage ou l'air pulsé soit plus élevée, surtout dans les bâtiments existants.

Compte tenu de la diversité des bâtiments, les mesures énergétiques potentielles sont également multiples. Selon la catégorie ou l'ampleur de l'intervention, les mesures provoquent des effets énergétiques fortement différenciés (Graphique Z.2). Il existe parfois des conflits d'objectifs entre la réduction de la demande d'électricité et de combustibles (et les besoins de confort ou améliorations du confort), mais cela offre aussi des possibilités de synergie. Sur la base des différentes valeurs exergétiques et économiques des agents énergétiques combustibles et électricité, l'efficacité énergétique des mesures prises a été analysée en fonction du rapport correspondant de substitution et de celui de la production électrique correspondante. En règle générale, celui-ci est d'environ 3 en Europe, mais il pourrait s'approcher de 2 à l'avenir, suivant le renouvellement des centrales européennes. Il convient de privilégier les mesures figurant sous la ligne de séparation correspondante (voir Graphique Z. 2). On distingue les six plages suivantes:

- Quadrant Q3: La demande de combustibles comme celle d'électricité est réduite. Les présentes mesures peuvent être recommandées sans restriction au plan énergétique et exergétique. Les exemples caractéristiques dans ce domaine très efficace énergétiquement sont les exploitations adaptées aux besoins pour la ventilation et le refroidissement du bâtiment (périodes de fonctionnement, quantités d'air adaptées aux besoins, température standard pas trop basse pour le refroidissement) ainsi que le choix plus sélectif de fenêtres équipées de vitrage isolant (valeur U plus faible pour valeur g constante ou plus élevée, et transmission de lumière correspondante) ou pare-soleil correspondants.
- Quadrant Q2.2: Certaines mesures d'efficacité relatives aux applications électriques augmentent la demande de chauffage à cause de l'utilisation plus modérée de l'apport solaire passif ou du plus faible dégagement de chaleur pendant la période de chauffage (par ex. éclairage). Cependant, l'accroissement de la demande de chauffage correspond à peine à la moitié de l'économie de courant. Pour une réduction d'un kWh d'électricité, il faut un supplément de 0.5 kWh de combustible, voire moins. Au niveau de l'énergie primaire, cela équivaut net à un facteur trois à quatre fois inférieur: ces mesures sont donc très efficaces. Certaines mesures relatives aux fenêtres, aux vitrages ou à la protection solaire se trouvent également sur la plage favorable Q2.2.
- Quadrant Q2.1: S'agissant d'autres interventions, la consommation de combustible à prendre en compte est au moins 2 à 3 fois supérieure à l'économie d'électricité. Dans l'optique exergétique pure, ces mesures ne sont pas indiquées, bien que partiellement nécessaires, afin de respecter les exigences du confort thermique.
- Quadrant Q4.1: Inversement, pour certaines mesures relatives à l'enveloppe ou à la technique du bâtiment, c'est l'électricité qui remplace l'énergie thermique ou le combustible. Les exemples caractéristiques de mesures figurant dans la plage recommandable sous la ligne de séparation avec un rapport critique de substitution sont les pompes à chaleur en lieu et place de la chaleur produite avec du combustible, à condition d'exiger une qualité optimale pour la planification, l'exécution et l'exploitation (COPA>3). Dans les bâtiments existants, le remplacement des fenêtres se situe également dans le Quadrant Q4.1, ce qui est généralement aussi le cas pour les bâtiments neufs grâce aux énormes progrès réalisés dans les vitrages. A la limite, on trouve la mesure architectonique concernant la faible part de fenêtres, qui permet de réduire considérablement la demande de chauffage, alors que celle de l'électricité augmente sensiblement suite à la plus forte demande d'éclairage. Egalement à la limite et partiellement en dessus, il y a les équipements (supplémentaires) de ventilation avec récupération de chaleur ou les PAC alimentées à l'air vicié. Au plan exergétique, les équipements de ventilation ne sont conseillés qu'avec une très grande efficacité électrique et un réglage adapté aux besoins (pertes de charges si possible < 700 Pa, consommation d'électricité <0.34 Wh/(m³/h)).

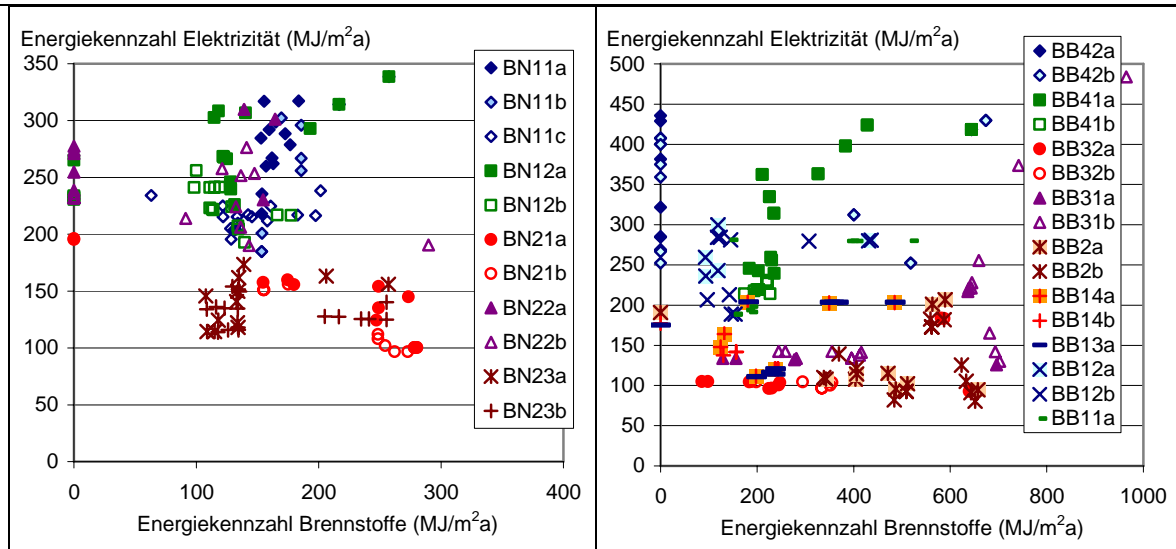


- m01 Fassadenwärmeeisung (geringerer U-Wert)
- ◆ m02 Wärmeschutz-Solarfenster (geringerer oder konstanter U-Wert, konstanter oder höherer g-Wert)
- ◇ m03 Wärmeschutzfenster (geringerer oder konstanter U-Wert, geringerer g-Wert)
- ◇ m04 Solargewinnfenster (höherer g-Wert, U-Wert konstant oder leicht höher)
- ✕ m05 Beleuchtungseffizienzmassnahmen unterschiedlichen Typs
- ✕ m07 Erhöhter thermischer WRG-Wirkungsgrad
- ✕ m08 Höherer Elektrizitätseffizienz bei Lüftung (z.B. gering. Druckverl.) od. Kühlung (z.B. höherer COP)
- + m09 Weniger Gebäudekühlung (z.B. nur Zuluftkühlung statt Kühlelemente, höhere Solltemperaturen)
- + m10 Mehr Gebäudekühlung (z.B. zusätzlich Kühlelemente, tiefere Solltemperaturen)
- △ m11 Verstärkter Sonnenschutz (z.B. automatisierter Einsatz, geringerer g-Wert)
- ▲ m12 Geringerer Sonnenschutz
- m13 Mehr Free-Cooling durch automatisierte Fensteröffnung
- m14 Weniger Free-Cooling durch automatisierte Fensteröffnung
- m15 Höherer Wärmepumpenanteil bei der Wärmeezeugung
- m16 Zusätzliche Lüftung (mit Abluft-WP)
- m17 Zusätzliche Lüftung (inkl. WRG)
- m18 Architektonische Massnahme: geringerer Glasanteil
- ✕ m99 Kombination von mehreren Massnahmen

Graphique Z.1 Effets énergétiques induits par les mesures prises (indice énergétique électricité delta et indice énergétique combustibles) dans la plage bâtiments neufs (en haut) et rénovations de bâtiments (en bas).

- Quadrant Q1: Une partie des interventions entraînent une augmentation de la demande de combustible et de la consommation électrique. Il s'agit en général de mesures de confort, par ex. refroidissement supplémentaire ou mesures de protection solaire, nécessaires notamment dans les bâtiments sans refroidissement, pour répondre aux exigences de confort (en général moins de 30 MJ/m²a).
- En dernier lieu, il faut citer les mesures avec des effets évidents qui, pour l'essentiel, réduisent soit la demande de combustible (par ex. efficacité thermique plus élevée de la récupération de chaleur), soit la consommation d'électricité (par ex. ventilateurs plus efficaces, pompes, pertes de charges plus faibles, COPA plus élevé pour le refroidissement du bâtiment); elles se situent sur l'axe x ou l'axe y.

Les trains de mesures définies pour chaque type de bâtiments représentent une suite cumulée, par ordre croissant, de mesures supplémentaires et/ou plus poussées; en d'autres termes, les effets induits par les différentes mesures se cumulent avec les mesures précédentes. Chaque série de mesures (et la situation de référence) est caractérisée par l'indice énergétique combustible et l'indice énergétique électricité (voir Graphique Z.3, où chaque sigle ou signature correspond à une catégorie de bâtiments). Les évolutions structurelles identifiées font apparaître de grandes disparités. Dans certains types de bâtiments, on note un recul de l'indice énergétique électricité en fonction de l'indice énergétique combustibles décroissant, alors que dans d'autres catégories de bâtiments, la consommation d'électricité en fonction de l'indice énergétique combustibles décroissant est en augmentation.



Graphique Z.2 Indice énergétique électricité en fonction de l'indice énergétique combustibles pour les différentes catégories de bâtiments, soit bâtiments neufs (à gauche) et rénovations de bâtiments (à droite). Les abréviations dans les légendes font référence à la définition des types de bâtiments selon le Tableau 96.

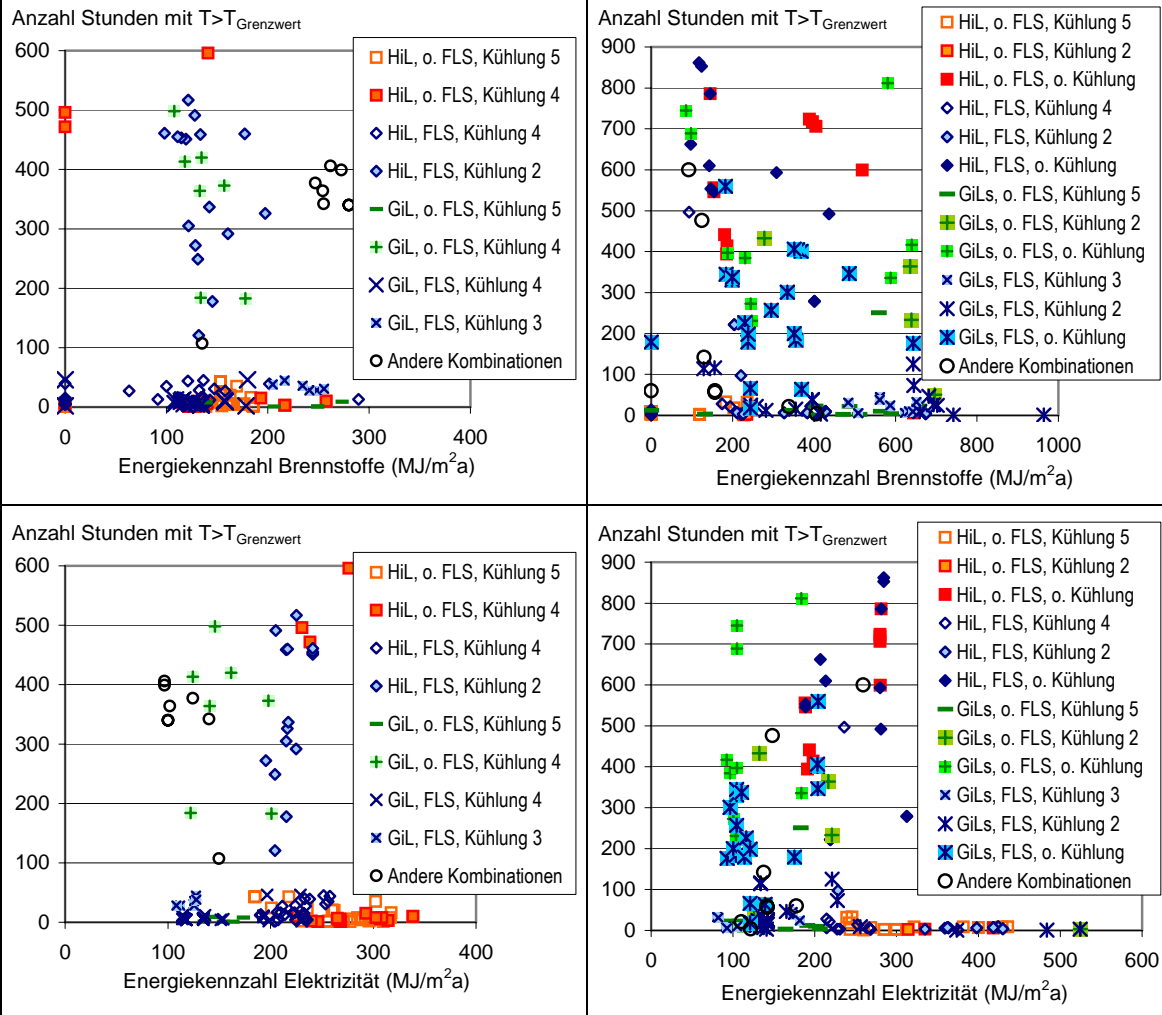
Simulations de bâtiments pour des considérations en matière d'énergie et de confort

Le bâtiment comme un tout

A priori, on pourrait supposer que, pour éviter la surchauffe au semestre d'été, on consomme davantage d'électricité (refroidissement du bâtiment, éventuellement ventilation) et que la surchauffe diminue avec une meilleure protection thermique ou avec des fenêtres neuves équipées de vitrage isolant. L'analyse des résultats des simulations montre cependant que la surchauffe et la consommation d'électricité sont davantage influencées par la configuration des charges internes ainsi que par le refroidissement actif et passif (cf. Graphique Z.4):

- Avec un refroidissement complet (refroidissement de l'air frais et éléments réfrigérants) et une température standard suffisamment basse (par ex. 23°C), les exigences de confort sont respectées. Sans refroidissement, la limite du nombre d'heures à température ambiante élevée est nettement dépassée, que ce soit avec des charges internes élevées ou faibles et avec une consommation électrique élevée ou faible.
- Pour une certaine configuration des charges internes et avec un refroidissement actif et passif, le nombre d'heures à température excessive augmente suite à la surchauffe due à une protection thermique élevée, du moins pour les configurations sans refroidissement complet. Dans les situations sans free cooling (par ex. en ouvrant les fenêtres) et pour les bâtiments avec des charges internes élevées, la hausse est plus marquée que pour les bâtiments avec des charges internes modérées.

Conclusion: Sans refroidissement ou free cooling (par ex. ouverture des fenêtres, dispositifs de parapet, volets d'aération, etc.), le confort thermique ne peut souvent pas être garanti, même en cas de faibles charges. Compte tenu des taux présumés de renouvellement de l'air en fonction des impératifs d'hygiène de l'air, un refroidissement de l'air frais ne peut répondre entièrement aux exigences de confort, que ce soit avec des charges internes élevées ou faibles, sauf s'il est combiné avec le free cooling.



HiL: Hohe interne Lasten GiL: geringe interne Lasten FLS: Controlled window system

Kühlung 5: Kühlung der Zuluft und Kühlelemente, Solltemperatur 23°C

Kühlung 4: Kühlung der Zuluft und Kühlelemente, Solltemperatur 25°C (*)

Kühlung 3: Nur Kühlelemente (Solltemperatur 25°C)

Kühlung 2: Nur Kühlung der Zuluft

(*) bei Kühlung 4 kann die Anzahl Stunden relativ hoch sein, der Diskomfort aber trotzdem gering, denn die Innentemperatur liegt nur 0.5°C oder weniger über dem Anforderungswert

Graphique Z.3 Nombre d'heures de surchauffe (exigences selon projet SIA 382/1) en fonction des indices énergétiques combustibles (diagrammes supérieurs) et électricité (diagrammes inférieurs) pour bâtiments neufs (à gauche) et rénovations de bâtiments (à droite)

Les **charges thermiques internes** des personnes et des appareils électriques influent fortement sur les conditions de confort, non seulement en plein été, mais également durant de longues périodes entre saisons. Ceci vaut non seulement pour les bâtiments à part élevée de vitrages, mais aussi pour les bâtiments existants construits selon un mode et des rapports géométriques identiques à ceux des bâtiments d'habitation. Si l'on veut améliorer les situations inconfortables générant une baisse de productivité, la réduction des charges internes revêt une grande importance (par ex. éclairages très efficaces énergétiquement, PC et autres appareils de bureau économes en énergie). En cas de forte densité d'occupation et partant de dotation en appareils, les mesures compensatoires sont incontournables pour obtenir un confort acceptable: refroidissement actif, équipements de ventilation avec refroidissement nocturne, ouvertures d'aération et dispositifs de parapet, ouverture automatique ou éventuellement manuelle des fenêtres).

Les mesures dans le détail

Comme indiqué plus haut, les interactions entre différentes prestations électriques (par ex. éclairage, appareils de bureau et refroidissement), ou entre protection thermique et confort, sont parfois tellement importantes que l'objectif primaire d'une mesure peut se transformer en son contraire. Dans le détail, on peut tirer les conclusions suivantes:

Les isolations de façades et les plus faibles valeurs U qui en découlent réduisent sensiblement la demande d'énergie thermique, en particulier lors de la rénovation de bâtiments qui n'avaient pas d'isolation thermique auparavant (selon le rapport de surfaces avec la SRE et le standard d'isolation, entre 10 et 25 MJ/m²a pour une construction neuve et entre 100 et 150 MJ/m²a pour un ancien bâtiment). Le prix à payer pour cette réduction des besoins en chaleur est une baisse du confort estival, à moins que le bâtiment bénéficie déjà de mesures compensatoires (par ex. refroidissement) ou que de telles mesures soient prévues (réduction des charges internes, ventilation, ouverture des fenêtres automatisée, refroidissement nocturne, amélioration de la protection solaire, vitrages de valeur g modeste). Le nombre d'heures de températures supérieures à la limite peut s'accroître de quelques douzaines, voire quelques centaines d'heures (voir Graphique Z.5). De tels effets peuvent également apparaître dans les bâtiments neufs.

Fenêtres et vitrages: Au plan qualitatif, les constatations faites précédemment s'agissant des besoins en chaleur et du confort peuvent également s'appliquer au remplacement des fenêtres ou aux vitrages avec des valeurs U moindres (et des valeurs g relativement constantes) (réduction de la chaleur nécessaire jusqu'à 50 MJ/m²a pour nouvelle construction et au moins 400 MJ/m²a lors du remplacement des fenêtres, augmentation des heures de température excessive de quelques centaines d'heures par an). L'accroissement du nombre d'heures de température ambiante excessive peut être réduit ou évité en utilisant des verres avec une valeur g moindre. Les interventions sur les fenêtres ou les vitrages ont aussi des incidences sur les besoins en éclairage et en refroidissement. L'effet net sur la consommation d'électricité est toutefois relativement faible et peut s'avérer positif ou négatif suivant la situation (avec -15 à +12 MJ_e/m²a). Les fenêtres spéciales à gain solaire (valeur g>55%) et les vitrages spéciaux antisolaires (valeur g<40%) ne sont recommandables que dans des cas particuliers (s'agissant des vitrages, par ex. à cause de l'efficacité électrique dans les bâtiments à forte proportion de vitrages, sans protection solaire variable suffisante, ou à cause de la protection contre la surchauffe dans les bâtiments sans refroidissement).

La **proportion des vitrages** influe également sur les besoins en éclairage et la demande d'énergie de refroidissement, ainsi que sur la chaleur nécessaire et la surchauffe estivale. En fonction de la forte proportion de vitrages, la demande d'énergie thermique augmente généralement de manière significative (par ex. de 50 à 60 MJ/m²a en augmentant la part de fenêtres de 50% à 80%, compte tenu des plus mauvaises propriétés d'isolation thermique des fenêtres et des effets supplémentaires des ponts thermiques). Par contre, la demande nette d'électricité recule généralement si la part de vitrages augmente (15 à 25 MJ_e/m²a), car la réduction de l'énergie d'éclairage est plus importante que l'augmentation de l'énergie de refroidissement (voir également SIA D0176). La condition préalable est de disposer d'un éclairage adapté aux besoins (manuel ou réglable), d'une protection solaire placée entre les verres ou à l'extérieur et d'un refroidissement moyennement ou très efficace. Mais une proportion très élevée de vitrages (70% et plus) peut entraîner d'importantes surconsommations d'énergie, si l'on note des écarts par rapport au standard concernant la protection solaire et l'ouverture des fenêtres (par ex. à cause des utilisateurs) ou l'exploitation des installations de refroidissement et de ventilation. Par ailleurs, une part élevée de vitrages crée une

situation peu confortable, même si la température ambiante satisfait aux exigences, car les rayonnements excessivement chauds (jours ensoleillés) ou froids des surfaces et les courants d'air glacial donnent une sensation désagréable.

A l'intersection entre la demande d'énergie de refroidissement et celle pour l'éclairage se trouve la **protection solaire**, qui influe aussi indirectement sur les besoins en chaleur. Ici, il s'agit de faire une distinction entre protection solaire statique (vitrages à faible valeur g) et protection solaire dynamique (stores, lamelles). L'avantage de la protection statique est que le contact visuel avec l'extérieur est meilleur et plus long, et que les incidences d'une protection solaire dynamique ouverte – peut-être par inadvertance – sont moindres. Un avantage supplémentaire de la protection solaire dynamique est qu'elle réagit mieux aux conditions variables (extérieures ou intérieures), alors qu'elle réduit plus fréquemment le contact visuel avec l'extérieur. Les mesures de protection solaire réduisent le nombre d'heures de températures excessives dans les bâtiments non refroidis ou insuffisamment refroidis (dans la règle jusqu'à 200 h/an). Dans les bâtiments refroidis à forte proportion de vitrages, le confort thermique est amélioré à cause du rayonnement plus faible. S'agissant de la consommation d'électricité, une protection solaire renforcée (valeur g et valeurs seuils moindres) génère, selon la constellation du bâtiment, un léger accroissement (0 à 10 MJ/m²a) dans les bâtiments sans, ou avec refroidissement très efficace, car la demande plus élevée pour l'éclairage l'emporte sur la réduction de l'électricité pour le refroidissement. Dans les bâtiments dotés d'un refroidissement actif consommant beaucoup d'énergie et moyennement ou faiblement efficace, la réduction est faible (0 à 20 MJ/m²a, voir également Graphique Z.2). La demande d'énergie thermique supplémentaire oscille généralement entre 10 et 20 MJ/m²a (en supposant des critères constants pour l'utilisation de la protection solaire sur toute l'année). Conclusion: la protection solaire devrait être dotée d'un système de réglage dynamique avec priorité à l'éclairage naturel et réduction de l'énergie pour l'éclairage en hiver et entre-saisons (condition préalable: réglages d'éclairage ou utilisateurs agissant en toute conscience) et priorité à une protection solaire très efficace pendant une longue succession de journées ensoleillées en plein été). Le domaine de la protection solaire dynamique recèle certes d'énormes potentiels d'efficacité et de confort, mais il nécessite encore la poursuite de la recherche et du développement, ainsi que le transfert des connaissances dans la pratique.

L'éclairage est l'exemple typique d'une prestation énergétique multifonctionnelle: l'objectif primaire de l'éclairage est une puissance d'éclairage convenable, la répartition harmonieuse de la densité d'éclairage, un ombrage naturel, une couleur adéquate de l'éclairage, la fidélité dans le rendu des couleurs, mais également le respect des exigences (par ex. protection antireflet et protection contre l'éblouissement direct, absence de scintillement); les objectifs secondaires sont concernés l'architecture intérieure (par ex. représentativité, qualité du design, accents optiques). Par ailleurs, l'éclairage a des incidences énergétiques multidimensionnelles (qualité de la lumière, diffusion de la chaleur, besoins de refroidissement). En matière d'énergie et de confort thermique, l'éclairage revêt une importance considérable notamment dans les immeubles de bureaux et dans d'autres types de bâtiments.² Ceci vaut en particulier pour les anciens éclairages et lorsque l'éclairage naturel est limité (besoins en électricité pour l'éclairage 100 à 150 MJ/m²a). Grâce aux progrès techniques et professionnels (planification, lampes et appareils auxiliaires plus économiques, concepts adaptés aux besoins et régulateurs de lumière), la consommation d'électricité peut être sensiblement réduite dans la nouvelle construction (globalement, en combinaison avec une protection solaire adéquate, de 25% à 70% ou de 20 à 60 MJ/m²a), mais en particulier lors de rénovations (globalement de 40% à 70% ou de 40 à 80 MJ/m²a). Certaines mesures isolées permettent de réaliser des gains de 15 à 35 MJ/m²a (nouvelle construction) ou de 15 à 50 MJ/m²a. Ces gains sont possibles grâce à des puissances installées moindres (moins de 10 W/m² au lieu de 15 à 18 W/m²), à la diminution des heures de pleine charge (réduction de quelques centaines d'heures par an) ou à la combinaison des deux facteurs. Les éclairages efficaces énergétiquement génèrent aussi des bénéfices énergétiques indirects en réduisant la consommation d'électricité pour le refroidissement (il en résulte un effet supplémentaire des mesures affectant l'éclairage de 10% à 30%). Les mesures relatives à l'éclairage améliorent grandement le confort thermique, notamment dans les bâtiments sans refroidissement: le nombre d'heures d'occupation à des températures trop élevées recule de 50 à 300 h/an (soit une semaine à plus d'un mois de travail).

² Dans les bâtiments avec charges internes moindres, l'éclairage représente une part prépondérante, alors que dans les bâtiments avec charges internes élevées, la contribution marginale de l'éclairage revêt une importance particulière lors d'un confort précaire.

Équipements de ventilation avec récupération de chaleur: L'utilité première des installations de ventilation est de garantir un air ambiant de bonne qualité, surtout lorsque l'aération par les fenêtres est insuffisante (bureau collectif ou à grande surface, auditoriums, éventuellement salles d'école, situation bruyante ou exposition à la pollution), tandis que l'objectif secondaire est la réduction des besoins en chaleur (en général, de 50 à 80 MJ/m²a). Si elles sont correctement réglées, les installations de ventilation contribuent également à diminuer le nombre d'heures de températures excessives. C'est aussi le cas, sans refroidissement actif de l'air frais, pendant les longues périodes entre saisons et durant une partie de l'été. Avec un renouvellement d'air et des périodes de fonctionnement adaptés aux besoins, une nouvelle installation consomme normalement 20 à 40 MJ/m²a pour l'air pulsé, moins de 10 à 20 MJ/m²a si l'installation est particulièrement efficace, et 7 à 20 MJ/m²a pour le refroidissement de l'air frais. Au niveau de l'énergie et de la technique de réglage, il est déconseillé d'augmenter le renouvellement d'air au-delà des impératifs d'hygiène de l'air. Dans des cas particuliers, il s'agit d'examiner si les systèmes de refroidissement à eau ou les petits climatiseurs offrent des avantages énergétiques. En général, il faut exiger des pertes de charges aussi faibles que possible, un réglage adapté aux besoins (lié à la concentration de CO₂ ou à la présence de personnes) et des ventilateurs très efficaces; même pour les nouvelles installations, ce potentiel d'efficacité technique représente à lui seul 30% à 50%.

Renouvellement des équipements de ventilation: Bien qu'une partie importante des ventilations des anciens bâtiments aient été renouvelées ou dotées après coup de récupérateurs de chaleur, ce secteur recèle encore des potentiels d'efficacité énergétique tant pour la chaleur que pour l'électricité. Lors du renouvellement des installations de ventilation, le potentiel technique d'économie d'électricité peut atteindre 50 à 80%, compte tenu de pertes de charges moindres et de ventilateurs plus performants. Avec un réglage adéquat des périodes de fonctionnement, ce potentiel est de 70 à 100 MJ/m²a. On peut également réduire la demande énergétique des installations existantes grâce à des mesures d'optimisation énergétique, c'est-à-dire en adaptant les périodes de fonctionnement et le courant volumique d'air. En règle générale, cela permet de réduire la consommation d'électricité pour l'air pulsé de un à deux tiers (selon les circonstances, de 30 à 120 MJ/m²a) et les besoins en chaleur de 50 à 250 MJ/m²a.

Si un **refroidissement de l'air frais** (éventuellement avec déshumidification) existe avant le réinvestissement, le renouvellement d'une installation de ventilation offre un autre potentiel d'efficacité en **adaptant aux besoins** les taux de renouvellement de l'air et les températures de l'air frais. La plupart du temps, les taux de renouvellement de l'air des anciennes installations dépassent largement les normes d'hygiène de l'air (dans la règle, double ou triple). La consommation d'énergie de refroidissement diminue parallèlement à la réduction des taux de renouvellement de l'air (à condition d'avoir les mêmes températures d'air frais). Selon les valeurs de référence, la consommation électrique pour le refroidissement de l'air frais peut s'abaisser de 50 MJ/m²a à 10 à 20 MJ/m²a. Cependant, si l'on réduit le taux de renouvellement de l'air des ventilations avec refroidissement de l'air frais, le confort thermique peut s'aggraver (surchauffe), ce qui nécessite éventuellement des mesures compensatoires (par ex. plafonds réfrigérants ou air pulsé). Au plan énergétique, il faut faire la distinction entre ventilation et refroidissement dans une nouvelle construction ou lors d'une rénovation d'envergure.

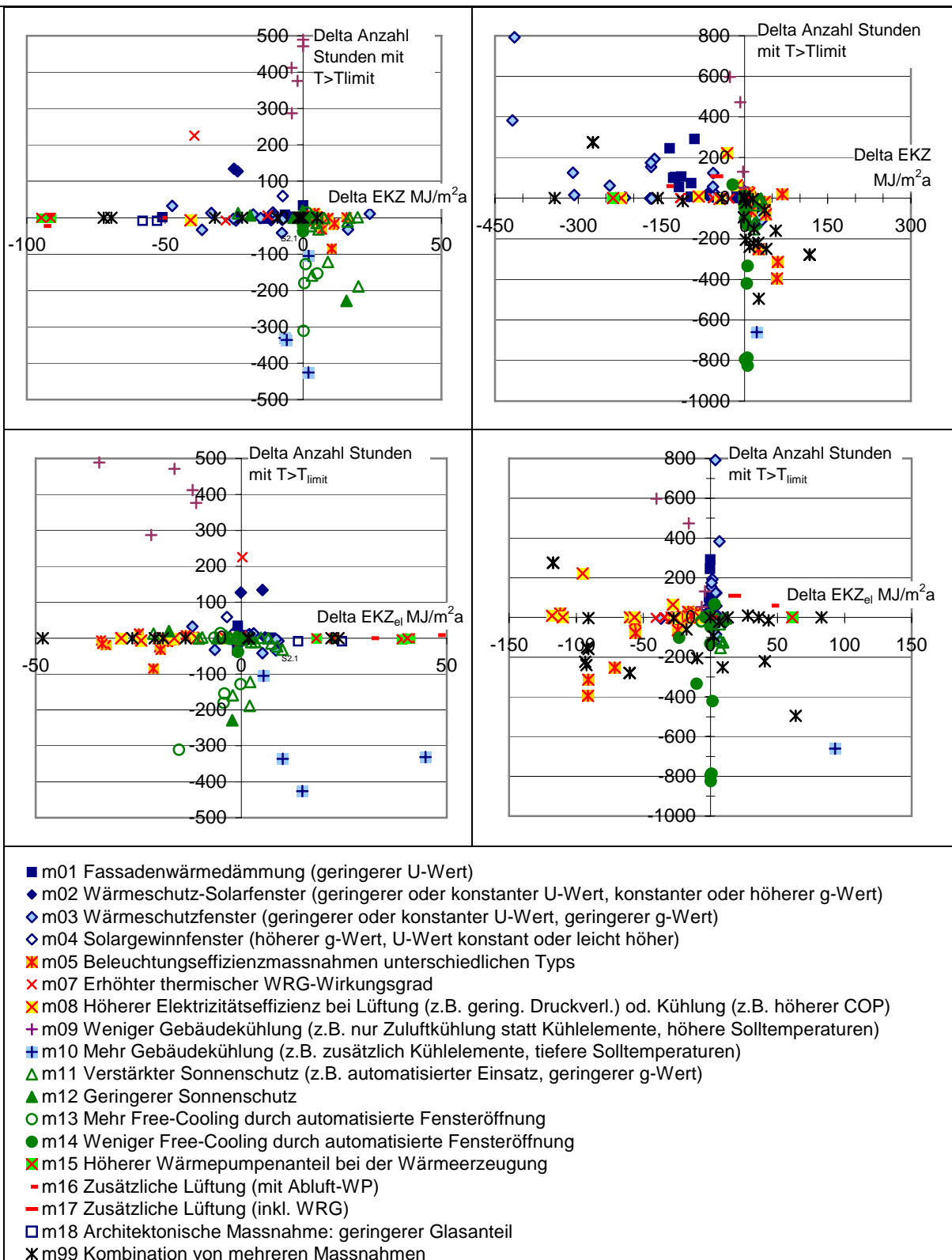
Le **refroidissement du bâtiment** joue un rôle prépondérant pour garantir le confort thermique ou pour remédier à un nombre élevé d'heures de température ambiante excessive. Dans les bâtiments où la proportion de vitrages est moyenne ou forte et où les charges thermiques sont moyennes ou élevées, il est impossible de répondre aux critères de SIA 381/1 si l'on ne dispose pas d'une forme ou l'autre de refroidissement actif ou passif du bâtiment. Ce n'est pas en plein été que le refroidissement consomme le plus d'énergie, mais entre-saisons. Une construction avec beaucoup de vitrages comporte déjà un risque de surchauffe pendant les journées ensoleillées d'hiver. Sans aération par les fenêtres, le refroidissement du bâtiment, en termes d'énergie utile (besoins d'énergie thermique à évacuer, c'est-à-dire avant la production par l'installation de refroidissement) consomme de 100 à 250 MJ_{util}/m²a, surtout dans les bâtiments à forte proportion de vitrages, avec protection solaire inadéquate et charges internes élevées. Pour les bâtiments relativement bien isolés (standard nouvelle construction), cette valeur correspond à la consommation d'énergie utile du chauffage du bâtiment (150 à 250 MJ_{util}/m²a). En l'occurrence, il convient de donner une haute priorité à la réduction de l'énergie de refroidissement et aux installations de refroidissement très performantes. Dans ces cas, compte tenu des COPA de 2 à 3 très répandus aujourd'hui, les besoins en électricité oscillent entre 80 et 120 MJ_é/m²a. Le potentiel d'économie d'énergie finale est néanmoins considérable et souvent sous-estimé par une majorité des gens. Avec des installations et concepts moyennement efficaces en liaison avec des mesures relatives au bâtiment (protection solaire, vitrages), la consommation d'énergie finale pour le refroidissement oscille «seulement»

entre 30 et 60 MJ_{eq}/m²a (sans déshumidification), même dans les bâtiments à forte proportion de vitrages et avec charges internes élevées, alors qu'elle se réduit encore de moitié avec une part modérée de vitrages. L'influence des utilisateurs du bâtiment, une déshumidification importante ou la réalisation d'installations médiocres peuvent toutefois modifier cette image de manière significative, raison pour laquelle il faut prévoir des mesures techniques. Il s'agit notamment d'une production et distribution de froid de haute performance (c'est-à-dire une différence dynamique de température modérée entre la distribution et le postrefroidissement, l'utilisation d'aéroréfrigérants humides), de l'exploitation du froid «provenant directement» de l'air extérieur (avec des températures extérieures plus basses qu'à l'intérieur), d'un réglage adapté aux besoins, d'une déshumidification modérée, ainsi que d'un réglage coordonné du refroidissement, de la protection solaire et de l'éclairage. La consommation d'énergie finale pour le refroidissement peut être réduite à 20 MJ/m²a, voire moins, pour les installations performantes (COPA 4 à 5) en combinaison avec les mesures affectant le bâtiment et pour les installations haute performance (COPA 7 à >20) en l'absence de telles mesures.

Ouverture automatisée des fenêtres, dispositifs de parapet, free cooling: Les simulations de bâtiments mettent en évidence l'effet positif important de l'ouverture réglable des fenêtres, tant sur la protection contre la surchauffe que sur les besoins de refroidissement: le nombre d'heures de températures intérieures excessives recule de quelques centaines, voire de près de mille heures par an. L'ouverture automatisée des fenêtres permet de réduire la consommation d'énergie de refroidissement de 50% à 70%, soit de 30 à 60 MJ_{eq}/m²a selon les cas; il faut relever qu'une part importante de l'énergie de refroidissement est utilisée entre-saisons. Malgré l'évaluation peut-être trop optimiste de l'effet positif de l'automatisation lors des simulations, (air entrant trop froid au niveau du confort, les façades se réchauffent et l'air entrant est plus chaud que la température météorologique extérieure), les résultats montrent les énormes potentiels d'efficacité énergétique et de confort de l'ouverture automatisée des fenêtres et du refroidissement avec le froid «provenant directement» de l'air extérieur. L'ouverture peut se programmer pendant les heures marginales et pendant la nuit, et le froid de l'air extérieur peut aussi s'utiliser avec les volets et ouvertures d'aération, les dispositifs de parapet ainsi que les installations de refroidissement et/ou de ventilation (voir plus haut). A signaler encore que, dans bien des cas, ces mesures ne suffisent pas à elles seules pour satisfaire aux exigences élevées de confort.

Réglages: Les flux d'énergie dans les bâtiments commerciaux sont soumis à une forte dynamique et interaction. Aujourd'hui, les techniques de mesures, de capteurs et de régulations pourraient très bien prendre en compte cette dynamique et ces interactions, mais elles ne sont jamais ou que rarement appliquées. Mais souvent le réglage se base sur des valeurs-seuils momentanées et prend rarement en compte les autres domaines de la technique du bâtiment ou l'inertie du bâtiment. Il n'existe pas de concepts de réglage qui intègrent les paramètres actuels et futurs tels qu'utilisation et météorologie (prévisions incluses). Il convient de promouvoir les commandes et réglages en réseau, précoces et adaptatifs, qui n'agissent pas contre, mais avec la physique du bâtiment, et sur le comportement des utilisateurs.

Dans la pratique, les installations énergétiques, notamment en matière de synergie, ne se comportent pas toujours aussi idéalement que le montrent les calculs des simulations. S'agissant notamment du refroidissement du bâtiment, la consommation de courant peut s'élever rapidement, par ex. suite à un réglage inadéquat ou erroné (valeurs standards trop basses ou trop hautes, refroidissement et chauffage simultanés). Le «stand-by» fréquent dans les bâtiments (la nuit et les week-ends) joue aussi un rôle non négligeable. C'est pourquoi les **mesures d'optimisation énergétique** sont extrêmement importantes, aussi bien lors de la mise en service des installations dans un bâtiment neuf ou après une rénovation, qu'à intervalles réguliers pendant l'exploitation courante. Concernant par ex. les équipements de ventilation, on peut souvent réduire la consommation d'énergie en réduisant les pertes de charges ou le courant volumique d'air.



Graphique Z.4 Incidences des mesures prises sur le nombre d'heures de température ambiante excessive en fonction des effets énergétiques induits par ces mesures (indice énergétique delta combustibles, diagrammes supérieurs, et indice énergétique delta électricité, diagrammes inférieurs) pour bâtiments neufs (à gauche) et rénovations de bâtiments (à droite).

Considérations coûts/bénéfices, compte tenu du confort

Le coût total annuel (coûts de capital, d'entretien et d'énergie) varie en fonction du *niveau d'efficacité énergétique atteint, du niveau de confort et entre les différentes catégories de bâtiments*, la variation entre les divers types de bâtiments étant plus grande que celle basée sur les différents niveaux d'efficacité énergétique (voir Graphique Z.6). Ceci est notamment la conséquence de décisions fondamentales au niveau architectural et conceptuel. Il s'agit entre autres de la taille du bâtiment (effets à échelle) et de la forme du bâtiment, du choix des matériaux, de la conception des façades, de la part des vitrages, du type de protection solaire, de la ventilation et/ou du refroidissement. Ces décisions fondamentales influent sensiblement plus sur le niveau des coûts que l'efficacité énergétique. Une augmentation de 50% à 80% de la proportion des vitrages entraîne par exemple un surcoût de 10 CHF/m²a pour les coûts de capital, alors que les incidences sur la demande d'électricité et de combustibles sont relativement faibles.

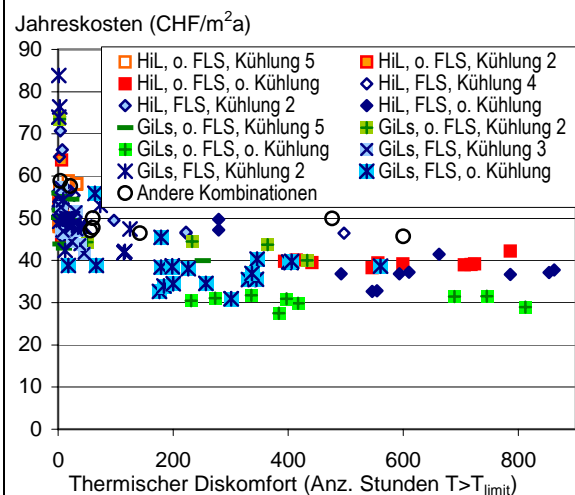
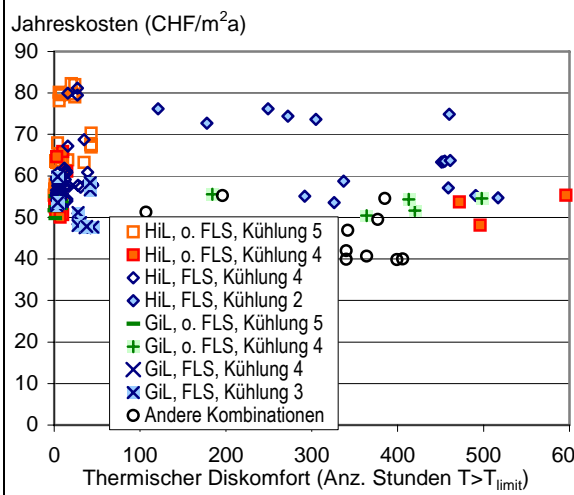
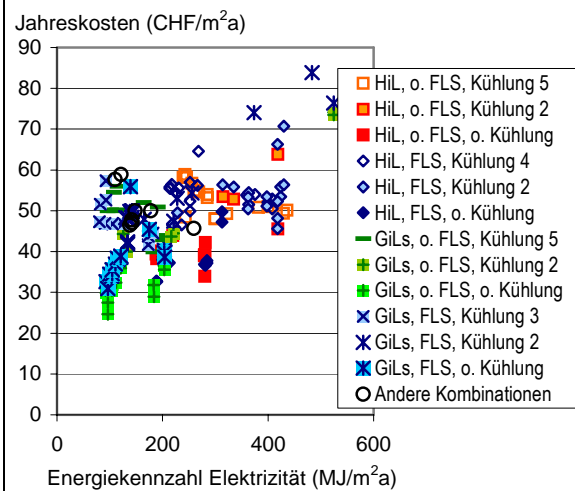
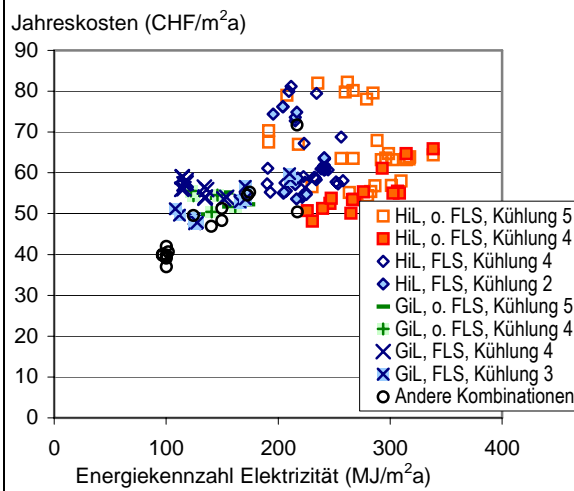
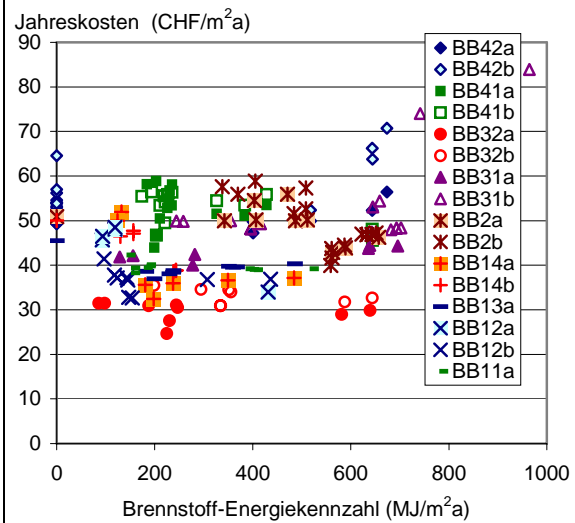
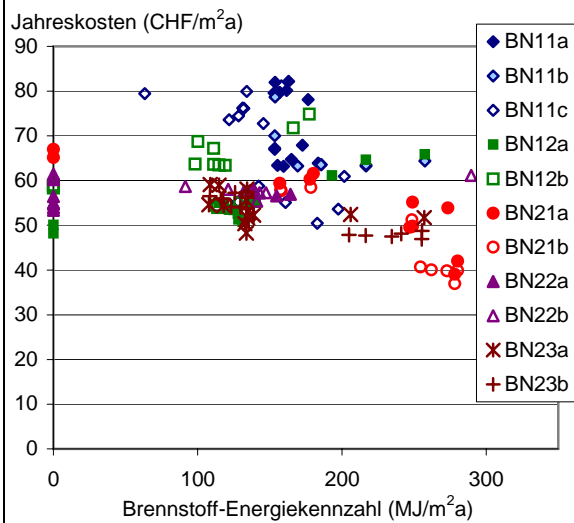
Par ailleurs, les coûts annuels sont fortement dépendants du *confort thermique* atteint. Les coûts annuels des bâtiments satisfaisant aux exigences de confort (moins de 100 heures avec une température intérieure en dessus du seuil prescrit) sont nettement supérieurs à ceux des bâtiments ne répondant pas à ces critères (diagrammes inférieurs du Graphique Z.6³). Ceci concerne en particulier les bâtiments existants, car, lors d'une nouvelle construction, il faut généralement supposer des mesures de confort pour répondre aux exigences. Les coûts annuels d'un refroidissement (supplémentaire) se montent à quelque 10 CHF/m²a et ceux d'une ventilation supplémentaire également. Les coûts d'électricité des charges internes (appareils, sans éclairage) ont une influence directe sur les coûts annuels (les coûts d'électricité s'élèvent à 5.5 CHF/m²a au lieu de 1.8 CHF/m²a) et indirecte (surcoûts de capital, d'entretien et d'énergie pour le refroidissement, ceux de l'énergie pouvant atteindre 5 CHF/m²a).

S'agissant des bâtiments existants, les coûts annuels sont fortement dépendants des *catégories fondamentales de référence* «dépenses courantes pour l'énergie», «entretien», «maintenance», «remise en état» et «rénovation». Comparativement aux deux premières catégories de référence, les mesures d'efficacité énergétique ne sont souvent pas rentables, ou alors seulement dans des conditions favorables, alors que des mesures d'efficacité énergétique plus poussées peuvent souvent s'avérer tout à fait rentables comparativement à une rénovation qui s'impose de toute façon. Les exemples typiques sont le remplacement des fenêtres, l'isolation thermique pour les façades complexes, le renouvellement de l'éclairage, qui ne sont pas rentables comparativement aux dépenses courantes pour l'énergie et aux simples travaux de maintenance et d'entretien. Cependant, s'il faut de toute façon remplacer les fenêtres, rénover les façades ou renouveler l'éclairage à cause de la durée de vie et pour des questions techniques ou esthétiques, les standards d'efficacité renforcés comme une valeur U moindre et un renouvellement de l'éclairage lié à la présence de personnes ou à la lumière du jour sont généralement rentables. Conclusion: les investissements consentis en faveur de l'efficacité énergétique et représentant une part importante de renouvellement et de réinvestissement par rapport à la situation actuelle ne sont souvent pas rentables comparativement aux dépenses courantes, mais le sont nettement comparativement aux remises en état (énergétiquement non efficaces).

³: Remarque: la température standard définie pour le refroidissement se situe vers «Refroidissement 4», partiellement un peu en dessus de la limite prescrite (jusqu'à 0.5 C). Le nombre d'heures de dépassement de température peut être relativement élevé, mais pendant la plupart de ces heures, le dépassement de température est faible (0.5 C ou moins).

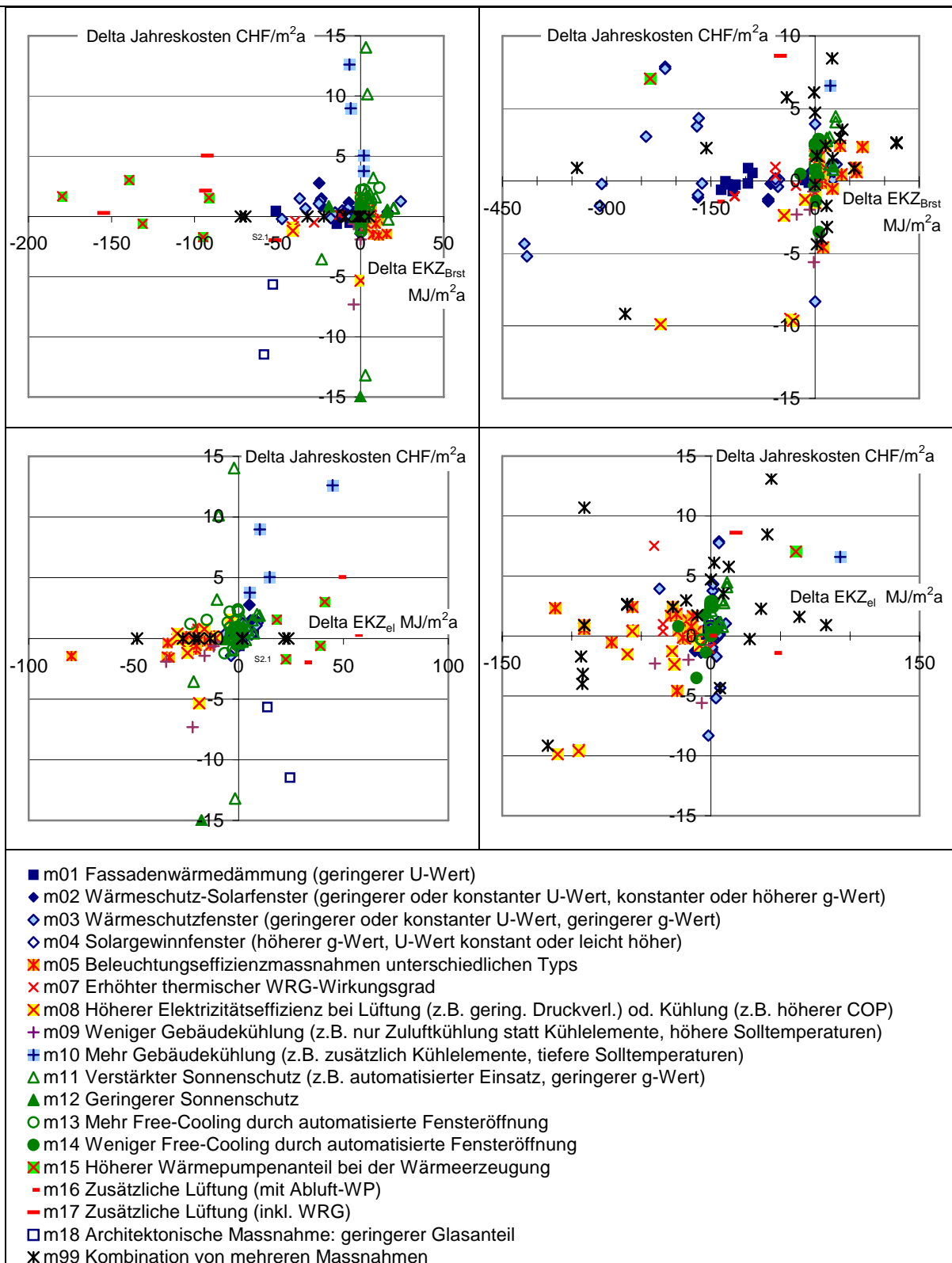
Dans l'analyse des compensations entre les coûts annuels et ceux des facteurs d'influence demande de combustibles, consommation d'électricité et confort, il faut relever que, si l'on compare deux catégories, les coûts sont aussi toujours dépendants d'un ou de deux des autres facteurs d'influence. S'agissant du rapport entre la *demande* spécifique *de combustibles* et les *coûts annuels* au niveau du bâtiment, on peut faire les constatations suivantes:

- Les frais de chauffage des bâtiments commerciaux (environ 0.4 à 1.2 CHF/m²a) sont très peu élevés comparativement aux frais d'électricité, mais surtout aux coûts de capital de tels bâtiments. Le potentiel d'économie des *frais* de chauffage est donc relativement faible aussi (comparé aux autres frais); c'est pourquoi on ne leur prête guère d'attention. Avec des solutions énergétiquement plus efficaces, les coûts de capital plus élevés peuvent toutefois être compensés par les coûts énergétiques moindres. A quelques exceptions près (voir ci-dessous), le coût total annuel pour une certaine catégorie de bâtiments en fonction de la plus faible demande de combustibles est plus ou moins constant. Certaines mesures entraînent un petit surplus ou une petite réduction des coûts de l'ordre de -3 à 2 CHF/m²a (voir Graphique Z.6 et Graphique Z.7, diagrammes supérieurs). En d'autres termes, la plupart des mesures d'efficacité énergétique visant à réduire la demande de chauffage sont rentables ou au seuil de la rentabilité. Ceci concerne en particulier les mesures affectant l'enveloppe du bâtiment (fenêtres incluses), mais aussi l'installation d'un récupérateur de chaleur avec un coefficient de performance thermique amélioré (pour une ventilation existante ou planifiée) et les mesures d'optimisation énergétique.



HiL: Hohe interne Lasten GiL: geringe interne Lasten FLS: Fensterlüftungssystem
 Kühlung 5 bzw. Kühlung 4 (*): Kühlung der Zuluft und Kühlelemente, Solltemperatur 23°C bzw. 25°C (*)
 Kühlung 3: Nur Kühlelemente (Solltemperatur 25°C) Kühlung 2: Nur Kühlung der Zuluft
 (*) bei Cooling 4 liegt die Innentemperatur liegt nur 0.5°C oder weniger über dem Anforderungswert

Graphique Z.5 Coûts annuels en fonction de l'indice énergétique combustibles (diagrammes supérieurs), de l'indice énergétique électricité (diagrammes du milieu) et de l'inconfort thermique pour bâtiments neufs (à gauche) et rénovations de bâtiments (à droite)



Graphique Z.6 Augmentation et réduction des coûts annuels des mesures prises en fonction de leurs effets énergétiques (indice énergétique delta combustibles, diagrammes supérieurs, ou indice énergétique delta électricité, diagrammes inférieurs) pour bâtiments neufs (à gauche) et rénovations de bâtiments (à droite).

- On note en partie des réductions relativement importantes du coût total annuel, notamment avec les mesures d'optimisation énergétique. Ces mesures peuvent générer des réductions considérables des coûts annuels, surtout pour les bâtiments existants (1 à environ 15 CHF/m²a, dans certains cas plus de 20 CHF/m²a); mais pour les bâtiments neufs, la diminution n'est pas négligeable non plus (jusqu'à 5 CHF/m²a).
- Certaines mesures visant à réduire la demande de chauffage sont liés à une augmentation plus sensible des coûts annuels. Ces derniers sont dus aux pompes à chaleur remplaçant des chauffages fossiles (jusqu'à +4 CHF/m²a; à noter que les PAC permettent aussi de réduire les coûts annuels nets), aux PAC alimentées à l'air vicié ou encore aux équipements de ventilation (5 à 10 CHF/m²a). Il convient ici de préciser que l'objectif primaire des installations de ventilation est de garantir une bonne qualité de l'air (concentration moindre de CO₂ et d'odeurs) et que la réduction de la demande de chauffage doit être considérée comme un bénéfice additionnel.
- Certaines fluctuations des coûts n'entraînent pas de grandes modifications dans la demande de combustibles. Il s'agit en l'occurrence de mesures touchant à l'électricité et au confort.

On peut faire des constatations analogues s'agissant du rapport entre la demande spécifique d'électricité et les coûts annuels: parallèlement à l'accroissement de l'efficacité électrique (IDE_{ei} moindre), le coût total annuel dans le cadre d'une même catégorie de bâtiments est relativement constant ou génère un surcoût relativement modeste (dans la règle 0 à 2 CHF/m²a). Si l'on compare les différents types de bâtiments, l'IDE_{ei} est fortement dépendant des charges internes des appareils (40 à 120 MJ/m²a). On observe également que, dans certains bâtiments où les besoins en électricité et les coûts sont bas, les exigences de confort thermique ne sont pas respectées (bâtiments sans ou dotés d'un refroidissement modeste), c'est-à-dire que des besoins en électricité et des coûts moindres supposent une baisse de confort (et éventuellement des pertes de productivité). Les mesures de substitution de combustibles telles que PAC ou ventilations avec récupération de chaleur provoquent également une hausse (et non pas une baisse) de l'IDE_{ei}. En fait, les mesures supplémentaires entraînent un surplus ou une diminution de coûts, mais ne modifient pas substantiellement la consommation électrique. Il s'agit ici de mesures d'efficacité énergétique affectant les combustibles ou de décisions fondamentales en matière de conception (par ex. type de façades, part des vitrages) telles que mentionnées plus haut.

Comme le montre le tableau synoptique Z.4, s'agissant des effets énergétiques, des effets confort et des coûts, on constate de grandes disparités entre les différents types de mesures. Même dans le cadre d'une certaine catégorie de mesures, les différences sont considérables, selon la mesure considérée et la situation de référence (nouvelle construction, rénovation, remise en état, dépenses courantes). Pour mieux comprendre: sont rentables les mesures dont les coûts nets sont négatifs ou dont les coûts spécifiques bruts sont inférieurs au futur prix des combustibles ou de l'électricité (calculé sur la durée de la mesure prise). La plupart des domaines recèlent des potentiels d'efficacité énergétique rentable, parfois considérables, en particulier dans le cycle de réinvestissement et pour les bâtiments neufs. Les autres mesures déboucheraient sur des coûts nets bien inférieurs, voire aussi sur des bénéfices nets, si, dans l'analyse de la rentabilité, on ne prenait pas seulement en compte la réduction des coûts énergétiques, mais également le bénéfice confort (voir pour exemple le parallèle dans le prochain sous-chapitre).

En raison des conflits d'objectifs entre l'efficacité énergétique et le confort, il y a pour chaque catégorie de bâtiments, tant pour la nouvelle construction que pour la rénovation, des trains de mesures efficaces en matière de coûts et d'énergie qu'il faut privilégier par rapport à d'autres séries de mesures parce qu'elles respectent les exigences de confort (cf. Tableau Z.5).

| Types de mesures | Description des mesures | Type bât. ⁽¹⁾ | Electricité IDE _{el} Δ MJ/m ² SREA | Chaleur finale combust., chauff. distance IDE _{Comb} Δ MJ/m ² SREA | Confort; Nbre heures de surchauffage (<u>espace sud</u>) | Situat. Référ. ⁽¹⁾ Coûts annuels nets (CHF/m ² a) | Situat. Référ. ⁽¹⁾ Coûts spécifiques bruts CHF/kWh _{comb} /kWh _{el} |
|-----------------------|--|--------------------------|---|---|---|--|---|
| Utilisation | Densité d'occupation moindre | | | | jusqu'à -200 h | + 30 bis +40 | |
| Architecture | Part de vitrages moindre (50, non 80%) | | +15 à +25 | -50 à -60 | non examiné | -5 bis -8 | |
| | Type de façades (matérialisation) | | | | non examiné | -15 bis +20 | non applicable (n.a.) |
| Isolations thermiques | IT 0.3 W/m ² K au lieu d'aucune IT ⁽²⁾ | A | moindre | -100 à -150 | +50 à +200 h | DC: Reé: -0.5 bis +1 | DC: 0.08 à 0.2 * Reé: 0.05 à 0.15 * |
| | IT 0.2 W/m ² K au lieu de 0.3 W/m ² K | N, A | moindre | -10 à -25 | jusqu'à + 50 h | SN, RE: | SN, RE: 0.08 bis 0.13 / |
| Fenêtres | Fenêtres Ug=1.1 au lieu de 2.2-3.0 W/m ² K | B | -15 à +12 | -170 à -400 | Forte amélioration hiver; surch. Jusqu'à + 800 h | DC: +4 bis+8; Reé: +0 bis+5 | DC: 0.17 bis 0.17 * Reé: 0.09 bis 0.18 * |
| | 3-vitrage au lieu de 2-vitrages isolant | N, A | -12 à +10 | -10 à -50 | jusqu'à +130 h | SN; RE: -1 bis +2 | SN, RE: 0.03 bis 0.2 * ⁽³⁾ |
| | Verre antisolaire au lieu de simple VIS | N, A | -0 à -12 | +10 à +25 | jusqu'à -120 h | +1 bis + 2.5 | non calculé (n.c.) |
| Eclairage | Modernisation éclairage existant y.c. détect. Présence et/ou réglage lum. natur. | B | -40 à -110 | +20 à +60 | Ergonomie éclairage améliorée: surch. → -200 h | DC; +1 bis +3 MA: -1 bis +1 Reé: | DC/M: * -0.05 bis +0.5 Reé: * -0.05 bis +0.2 |
| | Eclairage haute performance y.c. R.. | N | -20 à -70 | +10 à + 30 | <i>jusqu'à -100 h</i> | -0.2 bis +2.5 | * / 0.13 bis 0.4 |
| | Détect. présence et/ou réglage lum. natur. | N, A | -20 à -50 | | <i>jusqu'à -100 h</i> | SN; RE: -1 bis -0.2 | SN, RE * 0.06 bis 0.15 |
| Ventilation | Mesures d'optimisation énergétique | A, N | -30 à -100 ⁽⁴⁾ | -50 à -250 ⁽⁴⁾ | + quelques 10 h pour ⁽⁹⁾ | A: → -10, N: → -2 | * - bis 0.2 |
| | Renouvellement complet de la ventilation | A | -70 à -160 ⁽⁴⁾ | -60 à -250 ⁽⁴⁾ | + quelques 10 h pour ⁽⁹⁾ | DC; -12 bis +1.5 MA: | |
| | Ventilation avec RC/PAC air vicié ⁽²⁾ | A, N | +20 à +40 / ⁽⁵⁾ | -50 à -80 | + quelques 10 h | +7.5 bis +9 | 0.17 bis 0.3 * |
| | RC haute performance | A, N | < +5 | -40 à -80, -15 à -40 | + quelques 10 h | Tous -2.5 bis 0.5 | SN, DC 0.03 bis 0.1 / * |
| | Pertes charges moindres (DC supérieures) | A, N | -10 à -15 | aucune ind. | aucune ind. | SN, RE: +0.5 bis +1 | SN, RE * 0.3 bis 0.4 |
| | Réglage adapté aux besoins (par ex. CO ₂) | A, N | -10 à -25 | aucune ind. | non examiné | SN, RE: -1 bis -1.5 | SN, RE n.a. -0.3 bis -0.2 |
| Aération douce | Refroidissement avec élém. réfrigérants | A, N | +30 à +60 ⁽⁶⁾ | +0 à +10 | jusqu'à -900 h (-1200h) | +10 bis +15 | n.a. (mesure confort) |
| | Refroidissement de l'air frais | A, N | +7 à +20 ⁽⁷⁾ | +0 à +10 | jusqu'à -400 h | +3 ⁽⁸⁾ | n.a. (mesure confort) |
| | Renouv. Équipement cryogène (standard) | A | -10 à -50 ⁽⁹⁾ | -50 à +5 ⁽⁹⁾ | + quelques 10 h pour ⁽⁹⁾ | DC: → +7, RE:..... | |
| | Refroidissement haute performance | N, A | -10 à -80 | k.A. aucune ind. | | | * <0.2 |
| | Système d'aération par les fenêtres | A, N | négligeable | +0 à +10 | jusqu'à -900 h | + 5 à +10 | n.a. (mesure confort) |
| Protection solaire | Protection solaire renforcée | | -20 à +10 | -25 bis +20 | jusqu'à -200 h | -1 à +3 | n.c. |

| Types de mesures | Description des mesures | Type bât. ⁽¹⁾ | Electricité IDE _{el} Δ MJ/m ² SREA | Chaleur finale combust., chauff. distance IDE _{Comb} Δ MJ/m ² SREA | Confort; Nbre heures de surchauffage (<u>espace sud</u>) | Situat. Référ. ⁽¹⁾ Coûts annuels nets (CHF/m ² a) | Situat. Référ. ⁽¹⁾ Coûts spécifiques bruts CHF/kWh _{comb} /kWh _{el} |
|-----------------------|------------------------------------|--------------------------|---|---|---|--|---|
| Charges internes | Appareils plus économes en énergie | A, N | -40 à -80 | +10 bis +40 | jusqu'à -200 h | non examiné | non examiné |
| Production de chaleur | PAC au lieu de chauffage fossile | A, N | +30 à + 80 | -100% | aucune ind. | -0.5 à +1 | |

(¹) A: Ancien bât., N: Nouveau bât., SN: Standard nouv. bât., DC: dépenses courantes, Reé: Remise en état, RE: Rénovation énergétique (²) IT: Isolation therm., RC: Récupér. chaleur
(³) dans cert. cas → 0.3 CHF/kWh (vaut aussi pour châssis améliorés) (⁴) Selon circonstances -qqes 100 MJ/m²a (⁵) dont 50% pour installations performantes
(⁶) pour solutions efficaces 20 MJ_{el}/m²a, avec forte part vitrages → 120 MJ_{el}/m²a (⁷) sans air pulsé (⁸) pour ventilation existante (⁹) y.c. réduction taux de renouv. d'air

Tableau Z.2 Aperçu des effets énergétiques, des modifications du confort et des coûts induits par les différents types de mesures (Source CEPE et al).

| | Principales règles de planification et d'investissements (sélection) |
|---|---|
| Bâtiments neufs et bâtiments existants | <ul style="list-style-type: none"> - Les isolations thermiques et les fenêtres à vitrages isolants sont des éléments clés pour les bâtiments énergétiquement efficaces. Compte tenu des prix actuels de l'énergie, les mesures correspondantes sont généralement rentables (notamment en comparaison de remises en état non énergétiques) ou ne provoquent qu'un surcoût modeste (moins de 1 à 2 CHF/m²a avec une isolation thermique jusqu'à une valeur U de 0.2 W/m²K ou une épaisseur d'isolation de 20 cm et jusqu'à une valeur g de 0.5 W/m²K.). - Les fenêtres à gain solaire avec une valeur g élevée (comparées au standard pour toute valeur U du verre) visant à améliorer les gains solaires pendant la période de chauffage ne sont pas indiquées dans les immeubles de bureaux, car elles augmentent le risque de surchauffe pendant le semestre d'été. - Les verres antisolaires (avec faible valeur g) améliorent certes le confort pendant l'été, mais augmentent sensiblement la demande de chaleur (avec une protection solaire identique) <i>et</i> la consommation d'électricité, aussi dans les bâtiments refroidis (davantage d'éclairage avec régulateur d'éclairage). - Les éclairages et régulateurs d'éclairage performants sont un élément clé pour les bâtiments économes en énergie et avec confort thermique. La plupart des mesures correspondantes sont généralement rentables ou ne provoquent qu'un surcoût modeste, normalement de 0 à 2 CHF/m²a (surtout si l'on tient compte des frais d'entretien de l'ancien éclairage du bâtiment existant). - Plus les charges thermiques internes (non réductibles) sont élevées, plus l'installation d'un refroidissement actif devient incontournable pour maintenir le confort nécessaire, notamment en dehors de la période de chauffage. Le surcoût d'un refroidissement actif peut atteindre 10 CHF/m²a. Les équipements cryogènes requièrent des installations de haute performance, (par ex. différence de température moindre entre l'eau de refroidissement et le postrefroidissement, utilisation du «froid provenant directement de l'air extérieur»), ce qui est rentable ou peut être réalisé avec un surcoût modeste (0 à 2 CHF/m²a). - L'installation d'une ventilation avec récupération de chaleur (RC) est recommandée pour des questions de confort lors de forte densité d'occupation et de possibilités restreintes d'aération par les fenêtres, mais ne se justifie pas au plan économique pour le <u>seul</u> motif de l'efficacité énergétique (coûts marginaux nettement supérieurs aux coûts de production de chaleur): le RC (aussi avec PAC alimentée à l'air vicié) peut réduire sensiblement la demande de chaleur, cependant moins que prévu, car le renouvellement d'air adapté aux besoins est généralement supérieur à l'aération habituelle par les fenêtres (souvent insuffisante dans l'optique de l'hygiène de l'air). Frais spécifiques: jusqu'à 10 CHF/m²a. - S'agissant des ventilations existantes ou nécessaires au niveau de l'hygiène de l'air, il faut exiger des pertes de charges aussi faibles que possible (mesure de la demande d'électricité pour l'air pulsé), c'est-à-dire des vitesses de l'air moindres et des ventilateurs et moteurs électriques très performants. Les récupérateurs de chaleur haute performance (plus de 85%) sont rentables. - Une ouverture automatisée des fenêtres ou des dispositifs de parapet avec ouvertures d'aération permettent d'améliorer sensiblement le confort (sans l'installation d'une ventilation ou d'un équipement cryogène). En effet, à l'exception de quelques pointes dans l'année, l'air extérieur est plus frais que la température ambiante (coûts annuels de la mesure jusqu'à 8 CHF/m²a). - Dans les bâtiments à façades complexes ou protégées, les pompes à chaleur sont des solutions judicieuses au plan énergétique et technique pour remplacer les combustibles consacrés au chauffage. Avec une installation performante ou l'exploitation des synergies du refroidissement du bâtiment, l'augmentation des coûts d'investissement peut être compensée par la réduction des coûts énergétiques et coûts d'exploitation. |
| Bâtiments existants | <ul style="list-style-type: none"> - Dans les bâtiments avec charges internes élevées et sans refroidissement actif, la protection thermique aggrave la surchauffe pendant l'été, surtout si cette surchauffe était déjà jugée critique avant la mesure, ce qui nécessite donc des mesures compensatoires. |

| | |
|------------------------|---|
| Bâtiments neufs | - Une forte densité d'occupation, fréquemment liée à une forte dotation en appareils, génère une augmentation des charges thermiques internes. Sans refroidissement actif (plafonds réfrigérants, air pulsé, éléments de construction thermoactifs, refroidissement de l'air frais, éventuellement refroidissement nocturne), il est quasiment impossible de respecter les exigences de confort estival, même dans les bâtiments avec faible proportion de vitrages, éclairage de haute performance et très bonne protection solaire. |
|------------------------|---|

Tableau Z.3 Règles de planification et d'investissements visant à minimiser les conflits d'objectifs entre confort ambiant et efficacité énergétique dans les bâtiments commerciaux (Source CEPE et al.)

Résultat: Moyennant une approche méthodique adéquate, les solutions d'efficacité énergétique dans les bâtiments neufs ou les rénovations énergétiques des équipements et de l'enveloppe des bâtiments existants sont rentables ou ne provoquent qu'un surcoût modeste (0 à quelques CHF/m²a). Les dépenses annuelles (brutes) pour l'énergie sont bien plus fortement influencées par les exigences de confort, les installations générant des bénéfices additionnels (refroidissement actif, ventilation) ou les décisions fondamentales au niveau de l'architecture (type de façades, emplacement de la protection solaire, design de l'architecture intérieure). Elles oscillent entre 10 et quelques dizaines de 10 CHF/m²a. Pour comparaison: dans les bâtiments commerciaux, les coûts annuels complets des éléments et équipements significatifs en matière d'énergie varient entre 50 et 100 CHF/m², les frais accessoires des bâtiments entre 300 et 400 CHF/m² et les frais de personnel entre 5000 et 10000 CHF/m². Si la productivité des personnes actives ne diminue que de quelques pour-mille à cause de locaux surchauffés ou insuffisamment refroidis, toute mesure de protection thermique ou de technique énergétique devra être axée sur le maintien de la productivité. Aujourd'hui, on ignore presque totalement l'existence des bénéfices additionnels considérables générés par les mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments commerciaux, peut-être pour la bonne raison que les effets dus à une température ambiante désagréable ou à des courants d'air qui influent sur la productivité sont quasiment inconnus et n'ont pratiquement encore jamais été intégrés dans une évaluation économique.

Relevé des données techniques caractéristiques et des coûts spécifiques

Dans le cadre du présent projet, on a enregistré une multitude de coûts et élaboré des indices de coût spécifiques (voir chap. 4). Ces indices servent de base aux calculs des coûts et profits ci-après, mais peuvent également être utilisés par des tiers pour des études de variantes et des considérations coûts/bénéfices fondamentales. En l'occurrence, on renonce à donner des détails sur lesdits indices, car leur contenu n'a d'importance que lors de leur application à un cas isolé ou pour les considérations coûts/bénéfices (voir ci-dessous).

Les indices de coût se rapportent toujours à des valeurs de référence adéquates, si bien qu'ils peuvent s'appliquer à un grand nombre de bâtiments. Ces valeurs sont généralement des rapports de surfaces, des puissances d'installations ou puissances nécessaires, des courants volumiques d'air, etc. Concernant la plupart des indices de coût, on fait une distinction entre différentes évolutions ou différents niveaux de qualité en vue de l'estimation des coûts marginaux (par ex. coûts en fonction de la valeur U, du rendement ou d'autres mesures d'efficacité énergétique). Pour une partie des éléments de coûts, les considérations de coûts marginaux affectent principalement différents éléments de coûts et non pas un seul et même élément (par ex. PAC au lieu de chauffage fossile). Les indices de coût concernent aussi bien les éléments d'investissements que les mesures de maintenance et d'entretien ainsi que les mesures d'optimisation énergétique. Dans la majorité des cas, les variantes énergétiquement plus efficaces pour une même prestation énergétique entraînent des coûts (initiaux)

plus élevés. Les chap. 5 et 6 traitent dans quelle mesure ces coûts peuvent être compensés par une réduction des dépenses courantes, en particulier des coûts énergétiques.

La saisie des coûts et l'élaboration des indices de coût ne servent pas exclusivement à l'évaluation économique des mesures d'efficacité énergétique pour les bâtiments commerciaux, mais elles sont aussi instructives pour les processus décisionnels actuels et les imperfections du marché:

- Les planificateurs et entrepreneurs impliqués dans la construction de bâtiments neufs et dans la remise en état ou rénovation de bâtiments existants travaillent en général chacun de leur côté et sans efforts d'intégration.
- Bien que l'analyse des entraves ne fasse pas explicitement l'objet de la présente étude, la saisie des coûts a montré que la division du travail et la petite taille des entreprises impliquées constituaient une entrave inhérente au système. La division du travail incite à fournir les prestations demandées moyennant des coûts d'investissement les plus bas possibles. Mais le principe de la minimisation des coûts d'investissement entre en conflit avec la baisse des coûts du cycle de vie et, partant, avec les mesures d'efficacité énergétique, car celles-ci nécessitent en général des coûts d'investissement plus élevés.
- La division du travail crée également de nombreuses interfaces entre les différents entrepreneurs. Pour le maître d'ouvrage en quête de solutions d'efficacité énergétique, cette situation génère des coûts élevés en matière d'information et de recherche. La division du travail et les interfaces réduisent la transparence des coûts, rendent plus complexe la comparabilité des diverses options d'investissements, compte tenu des différentes délimitations et des coûts «connexes» souvent non négligeables, et empêchent les investissements dans les rénovations, qui pourraient être réalisées à un prix jusqu'à 30% inférieur grâce aux méthodes les plus récentes de mesurage et de planification (Jochem par ex. 2005, p. 105–113).
- Nombreuses sont les mesures combinant énergie et confort ou affectant uniquement le confort. D'autres mesures comme par ex. les équipements de ventilation influent simultanément sur la consommation d'énergie et sur le confort (qualité de l'air, thermique), ce qui complique les analyses des coûts et profits ou les rend impossibles par manque d'éléments de base.
- Les incidences (économiques) d'un air frais constant et d'une température ambiante agréable sur la productivité des personnes actives dans les bâtiments commerciaux sont quasiment inconnues et donc toujours exclues de l'estimation économique des investissements en techniques énergétiques et des mesures organisationnelles.

Ce sont donc les entraves d'organisation du marché qui constituent le principal obstacle à une efficacité énergétique plus poussée. Ces entraves se différencient selon les groupes-cibles.

Conclusions finales et recommandations

Conclusions finales sur le contenu

Les conclusions relatives au contenu concernent tout particulièrement les conflits d'objectifs entre l'efficacité énergétique et le confort/la productivité dans les bâtiments commerciaux. L'évaluation des solutions touchant aux investissements a déjà été traitée dans le détail aux chapitres précédents. Il s'agit, une fois encore, de mettre ici en évidence les résultats suivants dans l'optique de la politique énergétique et climatique:

- (1) Tant dans les *bâtiments neufs* que dans les *bâtiments existants* commerciaux, les mesures adéquates peuvent sensiblement améliorer ou réduire le niveau de confort, la demande de combustibles et la consommation d'électricité *du bâtiment*. Pour réduire de façon significative la consommation *globale* d'électricité, il conviendrait aussi d'intégrer dans les mesures la demande d'électricité des appareils de bureau (technologies de l'information et de la communication, TIC),

qui représente souvent une part importante de la consommation d'électricité et des charges internes.

- (2) S'agissant des *bâtiments existants*, la rentabilité des mesures relatives au bâtiment et aux installations ne dépend pas seulement des coûts des mesures et de leurs effets énergétiques, mais aussi grandement de la *situation initiale et de la base de comparaison des coûts*. Si la base de comparaison, fréquemment utilisée, des dépenses courantes (pour l'énergie) peut expliquer les faibles taux des rénovations, elle n'est toutefois pas appropriée parce que les investissements consentis accroissent la valeur réelle du bâtiment (et de la productivité des personnes qui y travaillent). Bien que la base de référence économique soit difficile à définir dans deux cas, la «remise en état» ou la «rénovation énergétique standard», la procédure en tant que base de comparaison est objectivement raisonnable. Les deux cas permettent d'identifier des options ou paquets d'investissements rentables.
- (3) Le délai d'amortissement (pay-back time) exigé, souvent relativement court et utilisé pour les seules décisions d'investissements, est une mesure de risque pour le reflux du capital investi; il ne donne aucune indication sur la rentabilité des mesures d'investissements qui a une importance considérable, compte tenu des durées d'utilisation prolongées (15 à 50 ans) (par ex. isolation du toit ou des façades, moteurs électriques, ventilateurs et compresseurs haute performance, concepts d'installations, équipements de ventilation avec récupération de chaleur, production combinée de froid et de chaleur). Il est absolument urgent d'informer de manière intensive tous les groupes d'investisseurs pour les bâtiments commerciaux, si l'on veut éviter des développements totalement erronés dans l'optique de la politique climatique en raison des durées d'utilisation prolongées. Il s'agit en l'occurrence d'un cas typique de «stranded investments» pour les prochaines décennies.
- (4) Dans les *analyses* antérieures *en matière d'économie énergétique*, on ne faisait pas la distinction entre les données sur les coûts et celles sur l'efficacité énergétique, et on ne se focalisait pas sur les conflits entre efficacité énergétique et confort/productivité des personnes actives dans les bâtiments commerciaux, comme c'est maintenant le cas dans la présente étude. Les éléments disponibles actuellement concernant l'effet de substitution entre la demande de chaleur et la consommation électrique (très disparates selon les différents types de mesures) n'étaient pas fondés empiriquement, et la différence entre remise en état et réinvestissement rentable selon une technique moderne met en lumière ces potentiels d'efficacité non exploités (les «low hanging fruits») qui, jusqu'à présent, étaient généralement quantifiés sur la base des estimations des modèles utilisant le principe du bottom-up en matière d'économie énergétique.
- (5) Compte tenu de la multitude d'indices et d'exigences dans les bâtiments commerciaux, le calcul des coûts marginaux à des fins d'analyse en matière d'économie énergétique est complexe et aussi difficilement réalisable à cause de la haute sensibilité; des simplifications s'imposent. Le classement effectué ici est une première démarche importante pour mieux prendre en compte que précédemment des données disparates.

Recommandations pour l'économie, les intermédiaires, la politique et l'administration

L'objectif principal de la présente étude n'était pas une analyse approfondie des entraves et de la politique. Cependant, les travaux ont permis d'étudier les innovations dans les bâtiments commerciaux avec leurs différents groupes d'utilisateurs et d'investisseurs, de planificateurs et d'entrepreneurs; ils ont donné certaines indications pour des recommandations aux acteurs de la politique énergétique et de l'innovation ainsi qu'aux propriétaires de bâtiments qui affectent tous les secteurs économiques, collectivités publiques incluses:

- (1) La *connaissance lacunaire* des possibilités d'investissements rentables chez les investisseurs, planificateurs et entrepreneurs, ainsi que la forte division du travail chez les fournisseurs de prestations dans le bâtiment, provoquent souvent des frais de recherche et d'information élevés; les processus décisionnels à plusieurs niveaux (au sein d'une même entreprise et entre les entreprises) avec le critère décisionnel discutable des coûts d'investissement moindres ou des courts délais d'amortissement poussent les responsables de l'énergie à la résignation. Pour avoir une meilleure information, une plus grande transparence du marché et une réduction des coûts des transactions, il faut davantage:
- les services de conseil au démarrage et à la mise en œuvre fournis aux propriétaires immobiliers (aspects financiers et conceptuels),
 - *les campagnes d'information et expositions ciblées des producteurs d'équipements techniques à l'intention des concepteurs et des utilisateurs* (comme la campagne «Druckluft» 2006), en particulier pour un éclairage économe en énergie, des moteurs électriques, équipements de ventilation, installations de refroidissement du bâtiment et d'équipements cryogènes, pompes et concepts d'installations haute performance, ainsi que pour une planification intégrée, des mesures d'optimisation énergétique et la gestion des immeubles.
 - comme complément/alternative aux offres *classiques* de formation et de perfectionnement professionnels, le *développement des réseaux locaux d'acquisition de connaissances* (analogues aux modèles énergétiques de SuisseEnergie ou de l'AEnEC et au programme energho) pour les sociétés immobilières et les propriétaires de bâtiments commerciaux (financement d'encouragement recommandé, outil décuplant l'effet multiplicateur par rapport au conseil au démarrage).
 - Mise en œuvre, *aussi en Suisse*, du *passport bâtiment* mis en œuvre dans les Etats membres conformément à la directive de l'UE.

Ces mesures d'optimisation visant à améliorer la transparence du marché devraient être initiées par l'administration fédérale et des cantons et mises en œuvre en collaboration avec les intermédiaires de l'économie immobilière ainsi que les concepteurs et techniciens du bâtiment.

- (2) *Marketing*: Il importe que les professionnels de l'efficacité énergétique, c'est-à-dire les concepteurs et les fournisseurs de technologies, associent leurs solutions techniques à du vécu, à des formes de vie plus saine, au confort, à la productivité des utilisateurs des bâtiments commerciaux et au prestige social. Il faut également prendre en compte les notions de profit économique des bénéfices additionnels (par ex. confort accru, ergonomie améliorée de l'éclairage, meilleure productivité du travail et du capital, protection améliorée contre le bruit et l'effraction, moins longues périodes d'attente d'une location ou d'une location-vente, qualité améliorée du fait de la Convention de Bâle II).
- (3) On sous-estime parfois le *rôle des intermédiaires*, en particulier quand ils font baisser les coûts des transactions par l'adoption de normes et la standardisation ou quand ils comblent d'importantes lacunes de savoir grâce à la formation et au perfectionnement professionnels. C'est pourquoi on formule des recommandations sur les normes, standards et benchmarks.
- Les normes, standards et benchmarks (par ex. des normes comme SIA 380/4 ou SIA 382/1) constituent des outils de décision dans le domaine technique, surtout parce qu'ils font la distinction entre les solutions standards et les options axées sur l'efficacité. Normes et benchmarks peuvent s'appliquer aussi bien au système (besoins annuels d'énergie ou coûts spécifiques de l'énergie par m² et par année) qu'aux composants isolés (cela pour tenir compte d'un marché où la division du travail et la spécialisation sont très poussées et où dominent les petites entreprises).

- Les normes et recommandations servent également de base aux prescriptions qui devraient être coordonnées au plan national et de plus en plus au plan international. Les normes et standards pourraient offrir des avantages pour l'exportation des produits techniques.
- Normes et recommandations (par ex sur les valeurs-limites et les valeurs-cibles) ont une valeur pratique pour les professionnels qui y trouvent des éléments d'information, des bases de conception et le fondement de contrats de droit civil entre maîtres d'ouvrage et fournisseurs de prestations; les normes et recommandations ne doivent pas nécessairement être ancrées dans la loi, mais peuvent s'inscrire dans des *outils de conception et des «tools» d'un emploi relativement facile*.
- Le développement de *benchmarks intégrés* et d'*outils de conception* auxquels peuvent recourir les architectes, les concepteurs orientés vers la technique et les planificateurs des coûts.

Les normes basées essentiellement sur le droit privé devraient au moins continuer à bénéficier du soutien actuel de l'Etat.

- (4) En plus des lacunes de savoir, on note un déficit de *documents de travail et d'outils de calcul* qui déterminent les principaux rapports coûts/bénéfices et qui sont souvent la condition première de l'optimisation. Il faut multiplier les *offres de formation et de perfectionnement* – sur plusieurs années et de manière intensive, mais aussi les cours de perfectionnement à moindre coût –, les *publications spécialisées* (comme en a produites jadis le programme RAVEL) fournissant des contenus techniques et des appréciations économiques (considérations des coûts sur tout un cycle de vie et des coûts/bénéfices) et les *outils de travail et outils de calcul*.
- (5) Il importe également de développer les standards et outils techniques régissant les commandes et réglages adaptatifs (autodidactes) pour les bâtiments commerciaux, par ex. la ventilation liée à la concentration de CO₂, l'optimisation précoce et complète des besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage, avec recours aux périodes d'utilisation, au comportement de l'utilisateur et aux prévisions météorologiques.
- (6) Même si toutes les activités recommandées devraient relever principalement des organisations économiques elles-mêmes et de certaines entreprises, une initiative des pouvoirs publics et un soutien financier et conceptuel de la Confédération, des cantons ou des grandes communes, seraient sans doute bienvenus, car lesdites activités sont d'intérêt public et elles constituent des apports à l'économie globale (emploi, amélioration des potentiels d'exportation, efficience économique).
- (7) De ce point de vue, mais aussi dans l'optique d'un least cost planning du futur approvisionnement énergétique, les entreprises d'approvisionnement en électricité, dont la plupart appartiennent aux collectivités publiques, pourraient offrir des tarifs incitatifs (par ex. rabais liés à des conventions d'objectifs, cf. EWZ.).
- (8) Les prescriptions techniques et architecturales dans la construction, particulièrement pour les bâtiments neufs, se sont avérées des outils extrêmement utiles. Elles ont aussi un effet indirect non négligeable sur les bâtiments existants, où le progrès technique qu'elles induisent est bien souvent pris en compte pour la rénovation du bâtiment et des installations. Comparativement aux prescriptions relatives à l'isolation thermique, il y a un retard à combler dans le domaine de l'électricité, pour lequel il faudrait fixer des exigences concernant l'éclairage, la ventilation et le refroidissement.
- (9) Il importe que les exigences précitées soient conçues de telle sorte qu'elles produisent un effet non négligeable, qu'elles soient facilement applicables pour les organes d'exécution et les concepteurs et qu'elles présentent une grande souplesse de planification. Ceci serait réalisable grâce à une démarche duale avec d'une part les directives sur les puissances installées spécifiques et d'autre part – en cas de non-respect des directives – le recours à la preuve du besoin, à l'assujettissement à autorisation ou au renouvellement obligatoire (cf. SIA 382/1 et procédure du canton de ZH pour la climatisation/ventilation, module 8 du MoPEC pour gros consommateurs,

canton de GE s'agissant de l'enregistrement de la consommation/pas d'obligation d'installer un DIFC, mais obligation de participer à des concepts énergétiques). La coordination des mesures de mise en œuvre, si possible dans tout le pays, serait de nature à produire des effets d'échelle dans le perfectionnement et au niveau des coûts.

- (10) Les collectivités publiques (Confédération, cantons, communes) sont propriétaires d'une bonne partie des bâtiments administratifs. Il conviendrait qu'elles procèdent dans chaque canton à la rénovation ciblée de certains types de bâtiments (par ex. écoles, bureaux) à titre de *démonstration d'un comportement exemplaire*, condition première d'une politique crédible pour faire passer des exigences élevées dans les domaines de l'énergie et du climat.
- (11) Compte tenu du *réchauffement prévisible du climat en Suisse dans les trois à cinq prochaines décennies*, de l'accroissement des charges thermiques (appareils de bureautique, plus forte densité d'occupation) et du renforcement de la protection thermique dans les anciens bâtiments, la ventilation et le refroidissement des bâtiments commerciaux gagneront en importance. Cette évolution devrait être mieux prise en compte pour les nouvelles constructions et les réinvestissements dans la technique du bâtiment, afin d'éviter des investissements ultérieurs inutiles ou des frais d'électricité plus élevés. A tous les niveaux, il importe de promouvoir la protection contre la surchauffe (charges internes moindres grâce à l'éclairage haute performance, à la part modérée de vitrages, à la protection solaire et aux stratégies de réglage adéquat) ainsi que le refroidissement du bâtiment adapté aux besoins, économe en énergie et avec recours aux possibilités thermodynamiques (différences de température réglables et moindres, utilisation du froid provenant directement de l'air extérieur et de sondes terrestres).
- (12) Quant aux composants de la bureautique, qui contribuent grandement aux charges internes et à la consommation d'électricité dans les bâtiments commerciaux, mais qui sont commercialisés dans le monde entier, leur efficacité énergétique devrait figurer plus souvent à l'ordre du jour des organes compétents de l'AIE et de l'UE.
- (13) Il incombe aux institutions actives dans la recherche et le développement de produire des instruments de conception simples et rapides intégrant les rapports complexes entre protection thermique, charges internes, installations du bâtiment, exigences de confort et solutions peu onéreuses que la présente étude a mis en évidence au moyen de simulations d'envergure.
- (14) Les thèses qui se dégagent de cette étude doivent rapidement trouver place dans les modèles actuels d'économie énergétique: elles concernent principalement le bien-être, lorsque les charges thermiques augmentent du fait des appareils de bureautique, les températures extérieures qui tendent elles aussi à augmenter (évolution du climat), les besoins croissants des utilisateurs et les gains de productivité souhaités par les employeurs tant publics que privés.

1. Introduction, problématique et méthode d'analyse

1.1 Situation initiale et problématique

En Suisse, la réduction de la demande énergétique dans le bâtiment recèle d'énormes potentiels d'efficacité énergétique. S'agissant des bâtiments d'habitation, on dispose dans notre pays de bonnes connaissances sur les potentiels, les coûts et les bénéfices additionnels grâce à de récentes études comparatives (par ex. Jakob 2002, Jakob 2003). Quant aux informations sur les bâtiments du *secteur des services, du commerce et de l'industrie*, elles sont encore très lacunaires, voire dépassées (Basler et Hofmann, 1992). Mais les potentiels d'utilisation rationnelle de l'énergie sont également considérables dans ce secteur. En effet, 65 PJ (soit environ 90% de la demande de combustibles ou plus de 50% de la consommation d'énergie finale) du secteur des services sont consacrés au chauffage des bâtiments; dans le secteur industriel, près de 30 PJ (soit environ 30% de la demande de combustibles ou 20% de la consommation d'énergie finale de l'industrie) sont utilisés pour le chauffage. Par ailleurs, dans les bâtiments commerciaux, la consommation de courant pour l'aération, la climatisation et l'éclairage est très importante; mais là aussi, il existe de grands potentiels d'efficacité, ce que ne manquent pas de signaler tous les ingénieurs et professionnels de l'énergie et de la construction. A l'avenir, l'exploitation de ces potentiels gagnera encore en importance en termes d'économie énergétique et de politique environnementale (forte dépendance au pétrole, menaces des prix de l'énergie, loi sur le CO₂, protocole de Kyoto, polluants atmosphériques, etc.). C'est pourquoi, il faut savoir comment va évoluer le rapport coûts/bénéfices des mesures de technique énergétique pour les différentes catégories et utilisations des bâtiments. A cela s'ajoute la longue période des cycles de renouvellement de l'enveloppe du bâtiment qui, compte tenu des hausses prévisibles du prix des combustibles d'ici 20 à 30 ans, incite rapidement à de mauvais placements (lost opportunities) si la protection thermique est insuffisante.

Dans le cadre du projet des FEE «Coûts marginaux des mesures d'efficacité énergétique supplémentaires aux bâtiments d'habitation», le CEPE a effectué des analyses sur les coûts marginaux et les coûts moyens lors de mesures d'économie d'énergie imposées dans les bâtiments d'habitation (bâtiments neufs, rénovations) (Jakob, Jochem et al. 2002). Voici ce que ces études ont démontré:

- En fonction de l'augmentation de l'efficacité énergétique, l'évolution des coûts est tout d'abord horizontale, mais pour atteindre le standard MINERGIE ou le standard MINERGIE-P, il faut prévoir un certain surcoût net; c'est-à-dire après déduction de la baisse de coûts due à la demande d'énergie moindre.
- Il importe de procéder à une évaluation économique complète pour soutenir convenablement les décisions d'investissements et pour éviter des erreurs d'appréciation en matière d'économie énergétique. Souvent, on ne prend en compte que les coûts immédiats du projet et les bénéfices énergétiques, tout en ignorant d'une part les *coûts de transactions* supplémentaires (Ostertag 2003) et d'autre part les bénéfices additionnels d'ordre financier (Jochem 2001; Jochem et Madlener 2004; Ott et al., 2006).
- En *appliquant les technologies* et les offres de «*best practice*», on peut réduire les surcoûts directs de manière significative. De plus, si l'on prend en compte les futures augmentations potentielles des prix de l'énergie pendant les longs cycles de renouvellement ainsi que les bénéfices additionnels réalisables, une partie des mesures de protection thermique et d'efficacité énergétique dans les bâtiments d'habitation peut s'avérer rentable.

Pour diverses raisons, les résultats obtenus pour les bâtiments d'habitation ne s'appliquent que sous réserve aux *bâtiments du secteur des services, du commerce et de l'industrie*. Du fait de leurs fonctions très disparates, les bâtiments commerciaux doivent être considérés comme *sensiblement plus hétérogènes*. C'est pour cette raison, que la SIA distingue 12 catégories de bâtiments pour ce

secteur. S'agissant des bâtiments commerciaux, les techniques et principes de construction et les types d'installations sont différents; il existe aussi d'autres exigences concernant l'utilisation et d'autres rapports de physique du bâtiment (par ex. proportions volumes/surfaces, équipement, occupation, charges internes, renouvellement d'air exigé, options pour les installations techniques).

Pour la plupart des catégories de bâtiments commerciaux, on attache beaucoup plus d'importance à la *protection solaire en été (protection contre la surchauffe) et aux besoins de confort*. Ceci génère d'autres standards énergétiques et des mesures plus diversifiées avec les interactions correspondantes, en particulier dans le domaine de la protection solaire estivale, du refroidissement, de la climatisation et de l'éclairage. Les bâtiments commerciaux se distinguent également des bâtiments d'habitation au niveau des paramètres déterminants pour les calculs de rentabilité (durée de vie moindre, taux d'intérêts plus élevés pour les bâtiments privés). Il faut donc s'attendre à ce que les rapports coûts/bénéfices évoluent qualitativement de manière très différente. Par ailleurs, l'évaluation économique des bénéfices additionnels revêt une tout autre importance, car l'amélioration du climat thermique intérieur, la réduction des nuisances sonores extérieures, une meilleure qualité de l'air et une bonne qualité de l'éclairage ont une influence directe sur les principaux facteurs de production tels que la productivité au travail, la satisfaction des collaborateurs et des utilisateurs des bâtiments ainsi que des clients.

1.2 Objectifs

Compte tenu de la situation initiale décrite plus haut, il s'agit d'établir empiriquement dans quelle mesure le recours à des mesures supplémentaires de protection thermique et d'efficacité énergétique et l'utilisation d'énergies renouvelables peuvent générer une économie nette des coûts ou un surcoût net, et de démontrer dans quelle mesure l'intégration de bénéfices additionnels non énergétiques pourrait modifier les rapports coûts/bénéfices. Voici dans le détail les *objectifs clés* du projet:

- *Coûts marginaux selon l'état actuel des coûts*: le projet vise à mettre à jour empiriquement la connaissance des coûts marginaux moyens des mesures prises en faveur de l'efficacité énergétique (protection thermique en hiver et en été, ainsi que techniques de chauffage, de ventilation, de climatisation, et éclairage) pour les principales catégories de bâtiments commerciaux, tout en faisant la distinction entre la construction et la rénovation. L'étude portera sur les composants individuels et sur l'ensemble du bâtiment, c'est-à-dire sur la consommation totale d'énergie, y compris la ventilation, la climatisation et l'éclairage.
- *Good and best practice*: lors du relevé des coûts d'investissement et autres coûts d'exploitation, il importe de veiller à la dispersion des données des différents fournisseurs de prestations, mais également aux valeurs des exemples de good and best practice.
- *Bénéfices additionnels*: dans certains cas, il s'agit aussi d'évaluer, et si possible de chiffrer (parfois en francs), les possibles bénéfices additionnels. Ils seront par ex. identifiés d'après les déclarations sur l'accroissement du confort induit par les mesures d'efficacité énergétique.
- Le projet vise enfin à *émettre des recommandations à l'adresse des principaux intéressés*: investisseurs et concepteurs de nouveaux bâtiments, exploitants et propriétaires de bâtiments existants, professionnels de l'enveloppe et des installations du bâtiment et responsables de la recherche en techniques et en économie énergétiques (en particulier perspectives énergétiques de l'OFEN).

1.3 Aperçu de la méthode d'analyse

Le présent projet est basé sur la méthode utilisée dans le projet intitulé «Coûts marginaux des mesures d'efficacité énergétique supplémentaires aux bâtiments d'habitation» (Jakob, Jochem et al. 2002) et sur les thèses partiellement applicables qui se dégagent dudit projet. A part ces parallèles, la méthode a été affinée pour pouvoir prendre en compte les conditions particulières des bâtiments commerciaux. Elle comprend les points clés ci-après:

- Les considérations des coûts marginaux se fondent sur les situations de référence relatives aux normes de construction prescrites par la loi (bâtiments neufs), à l'état actuel des anciens bâtiments (avant une rénovation) et aux procédures courantes aujourd'hui pour les remises en état et les rénovations.
- On définit alors les caractéristiques et les types de bâtiments commerciaux pour le secteur des services et de l'industrie en fonction de la consommation globale d'énergie en Suisse, des potentiels d'efficacité, des situations de référence et des types de mesures possibles, ainsi que les points forts conformément à l'importance des différents potentiels (cf. Chap. 2).
- On calcule les effets énergétiques induits par les mesures en matière d'énergie et de technique du bâtiment ainsi que leur impact sur le confort thermique au moyen d'un programme de simulation dynamique pour la physique du bâtiment (IDA – ICE, voir EQUA Simulation AB, 2002).
- On relève les éléments de coûts spécifiques et impossibles à transposer du projet coûts marginaux pour bâtiments d'habitation (par ex. surfaces vitrées et toitures des bâtiments du secteur des services et bâtiments de fabrication, installations techniques de ventilation et de climatisation) et on détermine les coûts marginaux bruts pour les différents éléments de construction (cf. Chap.4).
- Pour chaque type d'installation, domaine de la technique du bâtiment, élément de construction et catégorie de bâtiment d'importance, on applique et on intègre les éléments de coûts spécifiques et les bénéfices énergétiques à l'ensemble du bâtiment, en tenant compte des interactions qui en découlent, notamment entre la protection thermique en hiver et en été ou entre les besoins en chaleur et la demande d'électricité (cf. Chap. 5 et 6).

1.3.1 Catégories de bâtiments

Contrairement aux bâtiments d'habitation, le secteur des bâtiments commerciaux se caractérise par une plus grande hétérogénéité, s'agissant des proportions de surfaces, des charges internes et de la situation initiale relative aux besoins de renouvellement de l'air. On peut donc s'attendre à ce que l'évolution des coûts marginaux de mesures comparables prises dans différentes catégories de bâtiments puisse varier, en particulier quand les courbes des coûts se réfèrent à la surface de référence énergétique (SRE) et quand il faut prendre en compte les charges internes. Dans l'optique d'une des applications principales des thèses du projet, les perspectives énergétiques de l'OFEN ont été prises en compte pour la classification des bâtiments; par rapport à la grille quantitative, elles donnent déjà les premières indications pour définir les points clés potentiels des bâtiments commerciaux. Dans le secteur des services, les immeubles de bureaux représentent la plus grande part de surfaces (avec 16%), alors que dans le secteur industriel, ce sont les bâtiments d'exploitation (20%), voir Tableau 1. Fait frappant: la part de bâtiments inoccupés est aussi relativement élevée (11%).

| Bâtiments de bureau | Ecoles | Hôpitaux/Homes | Commerce | Industrie hôtelière | Autres bâtiments | Maisons de transport | Secteur des services |
|----------------------|--------------------------|----------------|---------------------|---------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| 16% | 10% | 7% | 8% | 6% | 12% | 3% | 62% |
| Bâtiments de bureaux | Bâtiments d'exploitation | | Bâtiments inoccupés | | | Secteur industriel | |
| 5% | 20% | | 11% | | | 36% | |

Tableau 1: Aperçu des parts de SRE des catégories de bâtiments commerciaux (secteur industriel, secteur des services, sans les bâtiments agricoles). Source: Wüest & Partner, (Analyses ex-post OFEN), état 2001

Les points suivants ont aussi été pris en considération pour la classification:

- Rapports de surfaces caractéristiques (part de vitrages élevée, moyenne ou faible sur les façades),
- Types différents d'enveloppes ou de concepts du bâtiment: construction massive ou légère,
- Renouvellement naturel (aération manuelle par les fenêtres) ou automatique de l'air, avec différents taux d'utilisation annuels de RC, avec ou sans refroidissement de l'air frais,
- Charges internes moindres ou élevées des personnes et des appareils,
- Eclairage standard ou éclairage haute performance (manuel ou automatique),
- Distinction entre bâtiments neufs et bâtiments existants (rénovations) ainsi que
- Distinction entre les différentes périodes de construction pour le parc immobilier.

On peut s'attendre à ce que toutes les catégories de bâtiments, avec toutes les marques distinctives, n'aient pas la même importance au plan de l'économie énergétique. Par exemple, bien des surfaces de bureaux ou autres affectations du secteur des services, de construction plus ancienne, se trouvent dans des bâtiments semblables aux bâtiments d'habitation, avec une part relativement faible de vitrages et sans ventilation, alors qu'on rencontre des parts élevées de vitrages et des ventilations (seulement) dans les grands bâtiments de construction relativement «récente». Compte tenu entre autres des restrictions de budget pour le projet, la première démarche de l'analyse consiste à identifier les principales combinaisons et à définir les domaines clés (cf. Chapitre 2.3).

La multitude des cas à prendre en considération s'accroît encore d'une dimension, lorsqu'il s'agit d'appliquer les différentes mesures potentielles aux catégories de bâtiments retenues. Ici également, il est possible de mettre des priorités ou de faire un choix, car il est inutile de calculer toutes les variantes pour le gain de connaissances escompté. Le choix des points forts se base sur une pratique de rénovation typique et sur des concepts d'investissements optimisés qui doivent constituer un élément central des conclusions finales et des recommandations.

1.3.2 Méthode de calcul des coûts marginaux

Les coûts marginaux (spécifiques) de l'efficacité énergétique supplémentaire (ou du recours accru aux énergies renouvelables) mettent le surcoût des mesures ou installations correspondantes en relation avec les bénéfices énergétiques additionnels correspondants. Selon les objectifs, les notions de «supplémentaire» ou de «sur-» se rapportent à une situation de référence ou au niveau énergétique précédent d'une amélioration successive par étapes de l'efficacité énergétique. La situation de référence à définir est dictée par le questionnement.

Les méthodes de calcul des coûts marginaux des différents secteurs se présentent comme suit:

- Définition des situations de référence: sont prises en compte les situations de référence «standard actuel nouvelle construction», «remise en état typique» et «rénovation typique». Conformément à la définition du terme établie dans le secteur du bâtiment, une remise en état ne comporte pas d'améliorations énergétiques, mais remet simplement certains éléments de construction ou équipements dans leur état originel (par ex. ravalement et peinture des façades, remplacement du monobloc de ventilation par un modèle équivalent), alors que la rénovation d'un élément de construction fait bénéficier cet élément de la technique la plus moderne et comprend par ex. une isolation thermique ou une ventilation haute performance avec amélioration de la récupération de chaleur.
- Calcul des effets énergétiques: le calcul des effets énergétiques induits par les mesures prises s'effectue à deux niveaux: au niveau de l'élément de construction, l'effet énergétique induit par une mesure affectant l'enveloppe du bâtiment résulte par ex. de la modification des valeurs U et g et de la modification correspondante des pertes de transmission ou des gains solaires. Les ponts thermiques, dont l'importance grandit parallèlement à l'augmentation de l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment, sont pris en compte conformément aux catalogues de ponts thermiques publiés entre-temps. Au niveau du bâtiment, le calcul s'effectue généralement au moyen d'un modèle de simulation dynamique pour la physique du bâtiment (IDA-ICE, comme DOE II). Cette simulation permet de prendre en compte les interactions entre les mesures énergétiques affectant l'enveloppe ou les installations du bâtiment et les différentes charges internes et externes ainsi que les différents modes de construction. On prend également en considération les données empiriques concernant les calculs des programmes de simulation dynamique du bâtiment tirées d'ouvrages de référence (Brunner et al., 2003). Les mesures visant à réduire les besoins en chaleur pendant l'hiver sont aussi examinées quant à leurs effets énergétiques pour la protection thermique estivale (et inversement), tandis que les bénéfices additionnels correspondants ou les mesures compensatoires nécessaires (par ex. pour garantir un confort minimal) sont aussi intégrés aux calculs. On procède notamment à une modélisation endogène des rapports entre la protection solaire et la demande de refroidissement et d'éclairage. Les effets énergétiques d'utilisation ou d'amélioration des installations, en particulier des ventilations et récupérateurs de chaleur, résultent des spécifications techniques et des indices typiques d'exploitation (par ex. périodes d'occupation et de fonctionnement, taux effectifs ou nécessaires de renouvellement de l'air).
- Calculs de rentabilité: dans un premier temps, les coûts d'investissement sont affectés aux coûts annuels selon la méthode des annuités. Compte tenu des coûts d'exploitation potentiellement variables (sans coûts énergétiques), on calcule alors les coûts marginaux en divisant la différence de coûts par la différence de bénéfices. Conformément aux deux dimensions du questionnement ou de l'application des résultats, on procède à deux évaluations des coûts marginaux: s'agissant des coûts marginaux du projet (économiquement = coûts moyens), le calcul de la différence des diverses variantes de l'augmentation d'efficacité énergétique se base toujours sur la même variante de référence. Dans l'évaluation «proprement dite» des coûts marginaux (selon la définition économique), les coûts marginaux représentent la pente (dérivation) de la fonction des coûts, et la différence se calcule alors par rapport au niveau précédent d'efficacité énergétique. Pour des raisons pratiques et compte tenu de la discrétion de plusieurs types de mesures, la fonction des coûts est l'objet de rares démarches. Pour des questions de transparence, ces calculs s'effectuent en premier chef au niveau de l'élément de construction et au niveau du bâtiment sans la prise en compte des interactions avec les installations techniques (= coûts marginaux bruts). Dans un second temps, on prend également en considération la réduction des coûts à court et à long terme au niveau des installations (coûts marginaux nets). Les résultats ainsi obtenus peuvent alors être mis en parallèle avec les coûts de la chaleur (=coûts énergétiques/rendement).

- *Intégration des bénéfices additionnels (co-bénéfices)*: les calculs de rentabilité présentés au paragraphe ci-dessus doivent encore prendre en compte d'autres éléments de bénéfices et de coûts, pour autant qu'ils soient déterminants. S'agissant des bénéfices, il convient de citer les bénéfices non énergétiques, soit les bénéfices additionnels (co-bénéfices): un confort accru, notamment concernant le bien-être thermique en été et entre saisons, une meilleure qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment, une meilleure protection contre les bruits extérieurs et contre les effractions, éventuellement de moins longues périodes d'attente d'une location ou d'une location-vente dans les immeubles de bureaux et une qualité améliorée après 2006 (Convention de Bâle II), etc. Les incidences des mesures prises sur le bien-être thermique sont quantifiées grâce aux calculs de simulation du bâtiment avec le programme IDA - Indoor Climate and Energy (IDA-ICE, voir EQUA Simulation AB, 2002) (PPD, nombre d'heures en dehors du domaine confort). Pour les utilisateurs des bâtiments, ce confort amélioré se traduit par une plus grande productivité des employés et partant, pour les bailleurs ou vendeurs de bâtiments, par des revenus locatifs et des prix de vente plus élevés. L'évaluation économique de ces bénéfices est représentée à titre d'exemple pour quelques cas typiques.

L'intégration des coûts de transactions contribuerait grandement à une meilleure compréhension du comportement actuel en matière d'investissements et de rénovations. Les investisseurs doivent notamment assumer les coûts de transactions lorsqu'ils veulent réaliser des mesures énergétiques allant au-delà des normes en vigueur et générant des frais supplémentaires. Ces frais concernent l'information et la recherche, la concertation et la prise de décision au sein de l'entreprise et éventuellement les conseils externes. Ils représentent une part importante du coût total d'investissements, en particulier lors d'investissements relativement modestes. S'agissant de la méthode, ces coûts de transactions pourraient être relevés lors d'un sondage écrit ou téléphonique; l'approche top-down donne également une estimation approximative de ces coûts, en mettant en parallèle les dépenses des entreprises pour leurs activités AEnEC et les bénéfices énergétiques. Pour des questions de temps, ces estimations ne sont pas documentées dans le présent rapport. Pour des exemples choisis, on se référera aux études correspondantes d'ISI (Ostertag 2003, Jochem, Gruber 2003).

1.3.3 Etendue et délimitation du projet

Globalement, l'objet de la présente étude est vaste et complexe, surtout si l'on veut obtenir un résultat en profondeur. Vu le budget restreint, il faut mettre des priorités. Voici donc les points traités en première priorité:

- Mesures d'efficacité énergétique affectant l'enveloppe du bâtiment: protection thermique et contre la surchauffe en hiver et en été, avec prise en compte de l'optimisation énergétique (par ex. réglage de la protection solaire) en plus des mesures architecturales proprement dites.
- Mesures d'efficacité énergétique concernant le renouvellement de l'air et le refroidissement ainsi que l'éclairage: amélioration des éclairages et équipements de ventilation, climatisation et récupération de chaleur (RC) existants, ainsi que pose de nouvelles installations de ventilation et climatisation, et autres mesures pour régler le renouvellement de l'air, avec diverses efficacités.
- Les interactions entre les mesures d'efficacité énergétique affectant l'enveloppe du bâtiment et celles concernant le renouvellement de l'air, le refroidissement et l'éclairage, font l'objet d'une analyse spécifique, par ex. les besoins d'éclairage et de refroidissement avec différents types de vitrages et différentes stratégies de protection solaire.
- Les calculs de simulation du bâtiment donnent non seulement des indications sur la demande énergétique, mais aussi sur le confort dans le bâtiment ou dans les différents locaux. Les modifications de ce confort, selon les cas, servent de base à l'évaluation des bénéfices additionnels.

- Bâtiments neufs: pour un nombre limité de types de bâtiments, différents concepts de nouvelle construction sont analysés par rapport à leurs coûts et bénéfices. Il s'agit avant tout de la méthode de construction squelette, de la construction massive, de la planification intégrale, de diverses variantes de protection thermique estivale (architecture, techniques de ventilation et de climatisation classiques, éléments de construction thermoactifs, etc.)
- Mesurage, réglage, dispositif de commande: les mesures affectant le mesurage, le réglage et le dispositif de commande peuvent s'avérer très importantes en tant que telles, mais surtout en liaison avec certains types de mesures spécifiques pour les façades avec une part élevée de vitrages. Mais les coûts de ces mesures peuvent varier fortement comparativement aux bénéfices qui en découlent, selon qu'il s'agit de grands ou petits bâtiments, ou équipements.

Les points traités en seconde priorité sont les suivants:

- Le comportement de l'utilisateur et les charges internes sont intégrés dans les analyses en tant que paramètres, mais sans considérations sur les coûts et bénéfices de mesures telles que «meilleure exploitation des charges internes», «réduction ciblée des charges internes» (par ex. grâce à l'acquisition d'appareils énergétiquement efficaces) ou «changement du comportement de l'utilisateur».
- Energies renouvelables: les interactions entre les mesures affectant l'enveloppe du bâtiment et les installations avec énergies renouvelables ont déjà été analysées pour les bâtiments de petite ou moyenne grandeur dans le projet des coûts marginaux pour bâtiments d'habitation, raison pour laquelle le présent projet se focalise sur les énergies renouvelables des grandes installations de pompes à chaleur ou de bois-énergie.
- Production et distribution de chaleur: on part de l'idée que, compte tenu des renouvellements des installations de chauffage qui s'imposeront de toute façon au cours des prochaines années, la production et la distribution de chaleur répondront toujours aux exigences techniques les plus récentes, sans que les autorités prennent des mesures supplémentaires (amélioration autonome).

Ne fait pas partie du projet l'agrégation des courbes des coûts marginaux au plan suisse. Cette agrégation nécessiterait des bases empiriques (une adaptation de l'enquête sur les bâtiments d'habitation Jakob et al., 2003, ou l'élargissement et l'actualisation de Weber et al. 1999) et des hypothèses de scénarios sur les parts de rénovations énergétiques des bâtiments et des installations dans le cycle de réinvestissements pour les différentes catégories de bâtiments, ainsi que sur les taux des nouvelles constructions, remises en état, rénovations et démolitions; actuellement, l'OFEN se livre à ce genre de considérations dans ses perspectives énergétiques.

Compte tenu de la multitude de catégories de bâtiment et de mesures d'efficacité énergétique, il a fallu sélectionner quelques exemples représentatifs. C'est pourquoi, lors des conclusions finales, on devra absolument se demander dans quelle mesure les résultats obtenus peuvent être généralisés et quels sont les domaines qui requièrent des investigations supplémentaires.

5 Analyse des coûts et profits et considération des coûts marginaux au niveau des éléments de construction et des installations

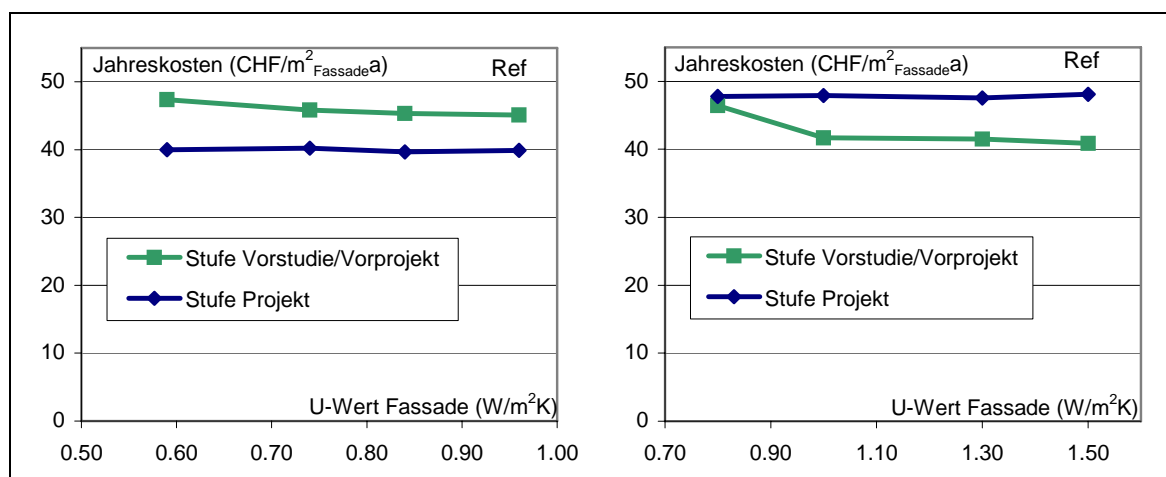
5.1 Façades

Les premières indications sur la rentabilité des normes énergétiques renforcées pour les façades sont fournies par les coûts annuels et les coûts marginaux bruts approximatifs, basés sur le coût des façades et les pertes de transmission, c'est-à-dire en négligeant la dynamique de la physique du bâtiment ainsi que les interactions au niveau de l'énergie et des coûts. Dans ce chapitre, on néglige en particulier les influences de la protection thermique sur les gains solaires et sur la «chaleur libre», les incidences éventuelles sur les besoins en électricité ainsi que les répercussions sur les coûts (par ex. coûts de production de chaleur moindres lors du renouvellement simultané de l'installation de chauffage ou lors de la planification intégrée pour une nouvelle construction). En négligeant les effets de la physique du bâtiment, on a tendance à sous-évaluer les coûts marginaux (car on surestime les effets énergétiques, alors qu'en négligeant les interactions au niveau des coûts, on tend à surestimer les coûts marginaux).

S'agissant des coûts marginaux bruts relatifs à l'énergie utile, on néglige également les pertes de transformation et de distribution de la production et distribution de chaleur (elles doivent être incluses dans les coûts marginaux de la production de chaleur).

5.1.1 Bâtiments neufs

Dans l'évolution des coûts annuels, on relève de nettes différences entre la phase étude préliminaire/avant-projet et la phase projet/prix du marché. Alors que dans la phase étude préliminaire/avant-projet, on note une hausse manifeste des coûts annuels parallèlement à l'augmentation d'efficacité énergétique (valeurs U moindres), la courbe des coûts annuels avec les données de la phase projet/prix du marché est quasi constante, tant pour les façades métalliques avec fenêtres en longueur que pour les façades de verre (voir Graphique 66).



Graphique 66 Total des coûts annuels (coûts d'énergie, d'entretien et de capital) des façades métalliques (50% part de vitrages, graphique de gauche) et des façades de verre (graphique de droite) pour bâtiments neufs (énergie utile = valeur U * 3500 DJ * 24h/jour, taux d'intérêt réel=3%, durée de vie=40 ans, prix de l'énergie=0.07 CHF/kWh, rendement de l'installation de chauffage 90%)

En partant de la situation de référence (du Graphique 6.6 désignée Réf), on peut calculer les coûts moyens bruts (ou coûts marginaux du projet) sur la base de la hausse des coûts de capital et de la réduction des pertes de transmission de chaleur. Dans les deux types de façades, pour le premier niveau d'efficacité, ces coûts sont inférieurs au prix supposé de l'énergie, c'est-à-dire aussi inférieurs aux coûts marginaux de la production de chaleur, alors qu'ils sont à peine supérieurs pour le troisième niveau (cf. Tableau 2 71). Cela signifie que si l'on opte pour un triple vitrage, il est conseillé de prendre la meilleure des valeurs U (0.5 W/m²K).

| | | R 1 - Réf | R 2 - Réf | R 3 -Réf |
|--|-----------------------|-----------|-----------|----------|
| Valeur delta U façade totale (façade de métal) | W/m ² K | -0.12 | -0.22 | -0.37 |
| Valeur delta U façade totale (façade de verre) | W/m ² K | -0.20 | -0.50 | -0.70 |
| Coûts de capital supplém. (façade de métal) | CHF/m ² a | 0.6 | 1.7 | 2.5 |
| Coûts de capital supplém. (façade de verre) | CHF/m ² a | 0.8 | 3.1 | 4.3 |
| Coûts moyens bruts (façade de métal) | CHF/kWh _{EU} | 0.06 | 0.14 | 0.09 |
| Coûts moyens bruts (façade de verre) | CHF/kWh _{EU} | 0.05 | 0.09 | 0.08 |

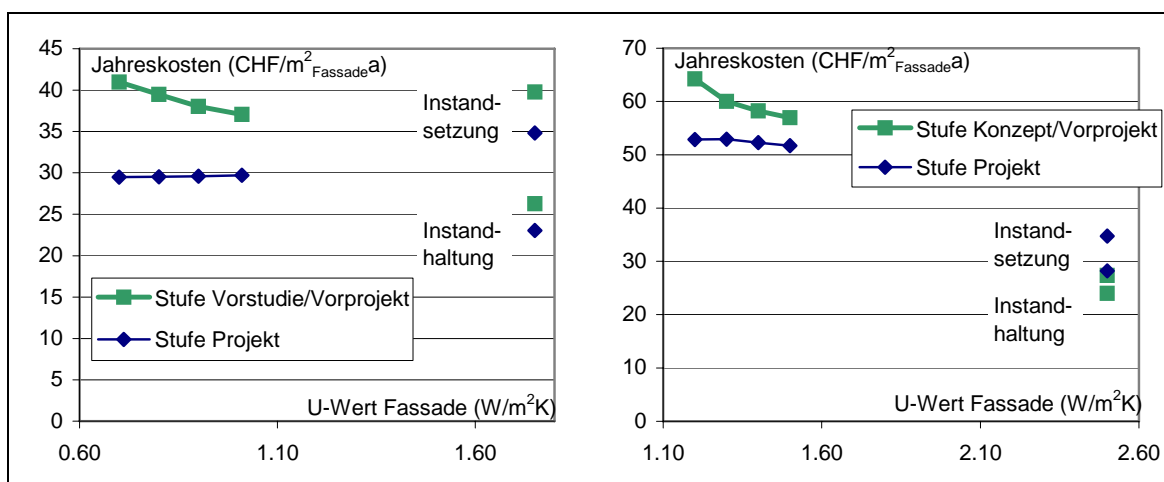
Tableau 2: Estimation des coûts moyens bruts pour rénovations de façades métalliques (50% part de vitrages) et de façades de verre (EU: énergie utile = valeur U * 3500 DJ * 24h/jour, taux d'intérêt réel=3%, durée de vie=40 ans)

5.1.2 Bâtiments existants

La valeur U de la partie opaque des façades non rénovées pour les façades métalliques se situe entre 0.8 et plus de 1.0 W/m²K, selon la date de la construction et la qualité d'exécution. Pour les façades métalliques en particulier et compte tenu des ponts thermiques, la valeur U pondérée peut être sensiblement supérieure à la valeur U des murs extérieurs en maçonnerie. Afin de ne pas surestimer la rénovation énergétique, on table sur une valeur de 1.0 W/m²K. Pour les fenêtres aussi, on émet une hypothèse conservatrice en prenant une valeur U pour l'ensemble de la fenêtre de 2.0 à 2.5 W/m²K. Il en résulte une valeur U pondérée pour la surface totale des façades de 1.75 W/m²K. Lors d'un renouvellement simultané des façades et des fenêtres, cette valeur U peut s'abaisser à environ 1.0 W/m²K avec le standard actuel. Dans la situation initiale, la valeur U d'une façade de verre est généralement de 2.5 W/m²K (y.c. les ponts thermiques des fixations mécaniques et des raccords). Lors d'une rénovation d'envergure de qualité standard, cette valeur peut s'abaisser à environ 1.5 W/m²K.

Comme le montre le Graphique 67, les coûts annuels de la rénovation d'une façade métallique, avec une isolation thermique supplémentaire et de nouvelles fenêtres, sont plus élevés que ceux de la maintenance (nettoyage, rafraîchissement des parties en tôle, réparation des joints, durée de vie 5 ans). S'agissant des façades de verre, la différence est encore plus nette. Mais par rapport à une remise en état relativement onéreuse, nécessitant le démontage/remontage de la façade (durée de vie 20 ans), une rénovation énergétique (durée de vie 40 ans) est rentable, car ses coûts annuels sont moindres. Les coûts annuels de la rénovation énergétique d'une façade de verre sont même sensiblement plus élevés que ceux de la remise en état, du fait que pour la remise en état de la façade de verre, on a supposé des interventions et des coûts moindres (remplacer les ferrures et quelques verres), que pour la façade métallique.

Le Graphique 67 fait également apparaître une différence considérable de l'évolution des coûts annuels en fonction de la réduction des valeurs U des façades entre la phase étude préliminaire/avant projet et la phase projet/prix du marché. Alors que la phase étude préliminaire/avant-projet laisserait présager qu'une mesure énergétique renforcée implique un net surcoût, même au niveau des coûts annuels, ceci n'est plus le cas pour la phase projet: on ne relève plus d'augmentation des coûts (façade métallique) ou seulement une hausse modérée.



Graphique 67 Total des coûts annuels (coûts d'énergie, d'entretien et de capital) de la maintenance, de la remise en état et des rénovations de façades métalliques (50% part de vitrages, graphique de gauche) et des façades de verre (graphique de droite) (Energie utile = valeur U * 3500 DJ * 24h/jour, taux d'intérêt réel=3%, durée de vie=40 ans, prix de l'énergie=0.07 CHF/kWh, rendement de l'installation de chauffage 85%)

Les coûts marginaux de la rénovation énergétique standard (RS) par rapport à ceux de la maintenance (MT) sont nettement supérieurs aux coûts variables de production de chaleur (les coûts variables à court terme ou marginaux de production de chaleur se calculent en divisant le prix de l'énergie par le rendement). Par rapport à une remise en état (Reé.) relativement onéreuse, ils sont toutefois inférieurs aux coûts variables de production de chaleur pour une façade métallique, car pour ce type de façade avec une isolation thermique supplémentaire, le surcoût est négligeable par rapport à la pose d'une nouvelle façade (cf. Tableau 72).

S'agissant des façades métalliques et par rapport à la rénovation énergétique standard, les rénovations énergétiques plus poussées avec des valeurs U inférieures, entraînent des coûts marginaux de l'ordre des coûts marginaux de la chaleur. Mais pour les façades de verre, les coûts moyens spécifiques avec 12 à 15 ct./kWh_{eu} sont supérieurs aux coûts variables à court terme de la chaleur. Pourtant, une mesure énergétique renforcée pourrait aussi s'avérer rentable avec une façade de verre, à condition qu'on remplace en même temps l'installation de chauffage et que ce renouvellement soit réalisé à moindre coût, compte tenu de la réduction de la puissance thermique demandée. Les résultats de la simulation indiquent une réduction significative de la puissance thermique demandée

(Chap. 3), tandis que le Chap. 6.2 reviendra en détail sur les répercussions correspondantes au niveau des coûts pour l'ensemble du bâtiment.

| | | RS | RS | R 2 - RS | R 3 - RS | R 4 - RS |
|--|-----------------------|------------------|--------------------|----------|----------|----------|
| | | comparée à MT | comparée à Reé. | | | |
| Valeur delta U façade totale (façade de métal) | W/m ² K | -0.74 | -0.74 | -0.11 | -0.21 | -0.31 |
| Valeur delta U façade totale (façade de verre) | W/m ² K | -1.00 | -0.10 | -0.20 | -0.30 | -1.00 |
| Coûts de capital supplém. (façade de métal) | CHF/m ² a | 11.8 | 0.0 | 0.6 | 1.3 | 1.9 |
| Coûts de capital supplém. (façade de verre) | CHF/m ² a | 19.3 | 12.3 | 1.3 | 2.6 | 3.2 |
| Coûts moyens bruts (façade de métal) | CHF/kWh _{EU} | 0.19 | 0.00 | 0.07 | 0.08 | 0.08 |
| Coûts moyens bruts (façade de verre) | CHF/kWh _{EU} | 0.23 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.12 |

Tableau 3: Estimation des coûts moyens bruts pour rénovations de façades métalliques (50% part de vitrages) et de façades de verre (EU: énergie utile)

5.2 Fenêtres et vitrages

Depuis les enquêtes sur les coûts spécifiques et les indices de technique énergétique, qui ont été menées dans le cadre du projet «Coûts marginaux pour bâtiments d'habitation» (Jakob, Jochem et al., 2002) dans les années 2001/2002, d'énormes progrès ont été accomplis dans le domaine des fenêtres et des vitrages. En 2001/2002, une amélioration de la valeur U du verre (une valeur inférieure) était généralement liée à une nette aggravation de la valeur g (c'est-à-dire également une valeur inférieure). C'est pour cette raison que, dans bien des situations, un triple vitrage ne provoquait qu'une faible réduction de la demande de chauffage. Au sud et avec un faible ombrage, l'amélioration était insignifiante, alors qu'à l'est ou à l'ouest et avec un ombrage moyen, l'amélioration était aussi relativement modeste. Ainsi, les coûts marginaux de l'amélioration de la valeur U du verre étaient relativement élevés dans ces cas.

Les sondages plus récents du printemps/été 2005 ont montré qu'avec une réduction de la valeur U, la réduction de la valeur g était sensiblement plus faible qu'en 2001/2002.

Les considérations au niveau des éléments de construction concernant les vitrages et les fenêtres dans les Chapitres 5.2.1 à 5.2.3 ne sont pas basées sur des calculs de simulation, mais sur des calculs énergétiques simplifiés. Ces derniers comportent un bilan énergétique des pertes de transmission et des gains solaires au niveau de l'énergie utile (EU), c'est-à-dire au niveau des besoins de chaleur de chauffage (IDE) conformément à SIA 380/1, compte tenu du rendement et de l'ombre. Les valeurs du Tableau 73 ont servi de base au calcul des gains solaires. Une telle approche ignore les besoins de confort et les interactions (répercussions sur le taux d'utilisation de la chaleur libre, bénéfiques suite à une plus faible consommation d'énergie de refroidissement et à une plus forte demande d'éclairage avec des vitrages d'une valeur g moindre⁴ et vice versa).

| | | Sud | Est | Ouest | Nord |
|---------------------|--------|------|------|-------|------|
| Rayonnement | global | 3240 | 2526 | 2616 | 1459 |
| MJ/m ² a | | | | | |

Tableau 4 Valeurs du rayonnement global utilisées en MJ/m²a (base de calcul pour les gains solaires)

⁴ Pour la demande d'éclairage, ce n'est pas la valeur g qui est déterminante, mais le coefficient de transmission de lumière. Ce dernier est souvent en corrélation avec la valeur g. Mais dans le secteur du développement, on tend actuellement vers une plus forte sélectivité, c'est-à-dire vers une séparation nette entre transmission de lumière et gains d'énergie.

5.2.1 Vitrages

Les résultats du bilan énergétique dans le Tableau 774 s'appuient sur les hypothèses suivantes: ombre des châssis 25%, facteur d'ombre de la protection solaire orientation sud 0.5 (c'est-à-dire que 50% de l'énergie du rayonnement solaire ne parvient pas dans la pièce), orientation est 0.65, ouest 0.65, nord 0.8, taux d'utilisation chaleur libre 60%. Avec ces hypothèses, on part de l'idée que l'orientation sud demande le plus d'ombre, suivie par l'est et l'ouest. C'est au nord que les besoins d'ombre sont les plus faibles; les 20% supposés incluent également l'ombre des autres bâtiments et de l'environnement.

Les coûts marginaux bruts⁵ de la réduction de la demande de chaleur avec doubles vitrages haute performance ($U_g=1.0$) au lieu de doubles vitrages standards ($U_g=1.1$) oscillent entre 16 et 20 ct./kWh_{EU}. Par contre, pour les triples vitrages ($U_g<1.0$) en lieu et place de doubles vitrages standards, les coûts marginaux sont nettement inférieurs, soit entre 5 et 12 ct./kWh_{EU} (sans fenêtres à gain solaire), en négligeant les répercussions sur les gains solaires (Tableau 774, colonne s. RG, c'est-à-dire sans rayonnement global), ou entre 10 et 15 ct./kWh_{EU} en prenant en compte les incidences sur les gains solaires (dans certains cas où la valeur g diminue nettement, plus de 20 ct./kWh_{EU}). Pour comparaison: les coûts marginaux de production de chaleur dans les bâtiments existants se situent à court terme (compte tenu seulement des coûts énergétiques) entre 6 et 8 ct./kWh_{EU} (pour un prix de l'énergie de 5 à 7 ct./kWh_{EU}), et dans les bâtiments neufs ou à long terme dans les bâtiments existants entre 7.5 et 10 ct./kWh_{EU} (c'est-à-dire que les coûts marginaux bruts d'efficacité énergétique, qui sont inférieurs, sont à considérer comme rentables).

⁵ Coûts marginaux bruts: coûts de capital supplémentaires (CHF/m²a) divisés par la réduction de la demande de chaleur (MJ_{EU}/m²a), soit sans déduction des coûts d'énergie de chauffage moindres

| entreprise | variante | Ug W/m ² K | valeur g | prix ind. CHF/m ² | pertes trans- mission MJ/m ² Fea | différence bilan énergétique (MJ/m ² vitrag ^a) par rapport au standard | | | | | coûts marginaux bruts (CHF/kWh _{EU}) par rapport au standard | | | | | coûts annuels CHF/m ² vitrag ^a | | | |
|------------|-----------|--------------------------|-------------|---------------------------------|--|---|------|------|------|------|---|------|------|-------|------|---|------|------|------|
| | | | | | | ouest | | | | | | | | | | ouest | | | |
| | | | | | | s.RG. | sud | est | t | nord | s.RG. | sud | est | ouest | nord | sud | est | t | nord |
| E1 | Réf 0 | 1.1 | 0.56 | 59 | -333 | | | | | | | | | | | 1.5 | 1.4 | 1.0 | 4.3 |
| | Réf 1 (*) | 1.1 | 0.60 | 55 | -333 | | | | | | | | | | | 0.6 | 0.4 | 0.0 | 3.6 |
| | V 1.0 | 1.0 | 0.55 | 81 | -302 | 30 | 23 | 23 | 23 | 25 | 0.15 | 0.19 | 0.19 | 0.20 | 0.18 | 2.2 | 2.1 | 1.7 | 4.9 |
| | V 1.1 (*) | 1.0 | 0.6 | 80 | -302 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 1.3 | 1.1 | 0.7 | 4.2 |
| | V 1.2 (*) | 1.0 | 0.56 | 85 | -302 | 30 | 1 | 1 | 0 | 9 | 0.20 | 5.7 | 9.0 | -16.6 | 0.7 | 2.3 | 2.1 | 1.8 | 5.0 |
| | V 1.3 (*) | 0.8 | 0.55 | 110 | -242 | 91 | 54 | 54 | 52 | 64 | 0.12 | 0.21 | 0.21 | 0.22 | 0.18 | 2.4 | 2.3 | 1.9 | 5.1 |
| | V 2.0 | 0.7 | 0.52 | 129 | -212 | 121 | 92 | 91 | 90 | 100 | 0.12 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.14 | 3.3 | 3.1 | 2.8 | 5.9 |
| | V 2.1 (*) | 0.7 | 0.52 | 120 | -212 | 121 | 63 | 62 | 60 | 79 | 0.11 | 0.21 | 0.22 | 0.22 | 0.17 | 2.8 | 2.6 | 2.3 | 5.3 |
| | V 3.0 | 0.6 | 0.58 | 140 | -212 | 121 | 136 | 136 | 136 | 131 | 0.14 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 2.8 | 2.7 | 2.3 | 5.7 |
| | V 3.1 (*) | 0.6 | 0.52 | 130 | -181 | 151 | 93 | 92 | 90 | 109 | 0.10 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.14 | 2.6 | 2.5 | 2.1 | 5.2 |
| | V 4.0 | 0.5 | 0.52 | 161 | -181 | 151 | 122 | 122 | 121 | 130 | 0.14 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.16 | 4.4 | 4.2 | 3.9 | 7.0 |
| | V 4.1 (*) | 0.5 | 0.52 | 150 | -151 | 181 | 123 | 122 | 120 | 139 | 0.11 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.14 | 3.0 | 2.9 | 2.5 | 5.6 |
| E2 | V 0 | 1.4 | 56% | 72 | -423 | -91 | -91 | -91 | -91 | -91 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 4.5 | 4.4 | 4.0 | 7.3 |
| | Réf | 1.1 | 56% | 78 | -333 | | | | | | | | | | | 2.6 | 2.5 | 2.1 | 5.4 |
| | V 1b | 1.1 | 67% | 105 | -333 | 0 | 80 | 81 | 84 | 58 | k.A. | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.10 | 2.2 | 2.0 | 1.6 | 5.5 |
| | V 1c | 1.0 | 54% | 94 | -302 | 30 | 16 | 15 | 15 | 20 | 0.11 | 0.21 | 0.21 | 0.22 | 0.16 | 3.1 | 3.0 | 2.7 | 5.8 |
| | V 2a | 1.1 | 42% | 82 | -333 | 0 | -102 | -103 | -107 | -74 | questionnement négligeable, car seul. prot. solaire (Ug comme standard) | | | | | 5.3 | 5.2 | 4.9 | 7.4 |
| | V 2b | 1.1 | 27% | 147 | -333 | 0 | -211 | -214 | -222 | -152 | | | | | | 11.7 | 11.6 | 11.4 | 13.0 |
| | V 4a | 0.7 | 43% | 108 | -212 | 121 | 26 | 25 | 21 | 53 | 0.05 | 0.23 | 0.24 | 0.28 | 0.11 | 3.7 | 3.6 | 3.3 | 5.8 |
| | V 4b | 0.8 | 62% | 146 | -242 | 91 | 134 | 135 | 137 | 122 | 0.15 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 3.2 | 3.1 | 2.7 | 6.3 |
| | V 5a | 0.5 | 42% | 139 | -151 | 181 | 87 | 85 | 82 | 113 | 0.07 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.11 | 4.0 | 3.9 | 3.6 | 6.1 |
| | V 5b | 0.5 | 57% | 185 | -151 | 181 | 189 | 189 | 189 | 187 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 4.1 | 4.0 | 3.6 | 6.9 |

Tableau 74 Prix indicatifs ainsi que bilan énergétique et coûts marginaux de différentes variantes de vitrages comparativement au vitrage standard. Base: prix indicatifs de deux grandes entreprises suisses de verre à vitres (Niveau des prix mi-2005, TVA incl. sauf (*): début 2006). Enquête et calculs CEPE (Hypothèses: taux d'intérêt réel 3%, durée de vie 25 ans, ombre des châssis 25%, facteur d'ombre de la protection solaire orientation sud 0.5, est 0.65, ouest 0.65, nord 0.8, Taux d'utilisation chaleur libre 60%. Hypothèses pour coûts énergétiques: prix de l'énergie 0.07 CHF/kWh, taux d'utilisation 0.9, part variable production de chaleur: 0.01 CHF/kWh = 0.087 ct./kWh)

Le Tableau 74 représente également les coûts annuels (coûts de capital du vitrage plus coûts énergétiques, par m² de vitrage). Ici, ce n'est pas tellement le niveau des coûts qui est déterminant (car les autres coûts d'une fenêtre ou d'une façade de verre ne sont pas pris en compte), mais bien plus les différences de coûts par rapport au standard en CHF/m² vitrag^a. Ces différences de coûts oscillent entre -0.5 et environ 3 CHF/m² vitrag^a (sauf pour les vitrages antisolaires spéciaux, si le bénéfice correspondant, suite à la réduction de la surchauffe ou de la consommation d'énergie de refroidissement, n'est pas pris en compte, comme c'est le cas ici; les considérations y relatives figurent au Chap.-).

Il convient encore d'ajouter que le niveau des coûts annuels du vitrage est relativement bas, notamment parce que dans la plupart des cas, le vitrage provoque un gain de chauffage sur l'ensemble de l'année (exceptions: vitrage antisolaires spécial, orientation nord également vitrage

standard). Dans ces cas-là, les coûts de capital proprement dits du vitrage sont supérieurs aux coûts annuels totaux.

Si l'ombre est moindre (comparativement aux hypothèses émises dans le Tableau 774), on note une augmentation des coûts marginaux de la réduction de la demande de chaleur dans les cas où la valeur g du vitrage en question est inférieure à la valeur g du vitrage standard (avec une valeur g moindre, la possibilité moindre de gain a un plus grand impact). Avec des vitrages à gain solaire proprement dits de valeur g supérieure au vitrage standard, les coûts marginaux reculent (Entreprise E1, variante 3, Entreprise E2, variantes 1b et 4b), mais parfois très peu.

Conclusion: Sous le seul aspect de la réduction de la demande de chaleur (ou de la réduction des frais de chauffage), les résultats montrent clairement que les surcoûts des vitrages avec une valeur U moindre ne peuvent généralement pas être juste amortis (avec un prix de l'énergie de 7 ct./kWh_{EE} ou des coûts de chaleur variables de 8.7 ct./kWh_{EE}, le surcoût net varie entre 0 et 3 CHF/m²_{vitrage}a). Par ailleurs, les coûts d'investissements supplémentaires devraient être un peu inférieurs, ou le prix de l'énergie supérieur de 1 à 3 ct./kWh. C'est peut-être la raison pour laquelle les triples vitrages sont si peu répandus sur le marché. Il convient encore de relever ici que le bénéfice de vitrages avec une valeur U moindre (et/ou une valeur g supérieure ou inférieure, selon les cas) va nettement au-delà de la seule réduction des frais de chauffage. En réalité, les valeurs U et g moindres offrent un confort accru, en particulier à proximité des fenêtres ou des vitrages (moins de courants d'air glacial, températures de surface plus élevées⁶ en hiver et entre saisons, pendant les périodes sans rayonnement solaire ou avec des températures de surface plus basses en été et entre saisons, notamment quand le soleil brille). Ceci est particulièrement manifeste dans les locaux (de bureaux) avec forte proportion de vitrages et forte utilisation de la surface utile. Une meilleure utilisation de la surface utile et des pertes de productivité moindres peuvent sans autre compenser le faible surcoût net.

5.2.2 Fenêtres des nouveaux bâtiments

Dans le Tableau 75, les coûts marginaux de l'efficacité énergétique ainsi que les coûts annuels pour les fenêtres sont représentés à titre d'exemple sur la base des données de six entreprises. On distingue les types de mesures suivants:

- Seule la valeur U du verre est améliorée (partiellement, espace intercalaire inclus)
- Seul l'espace intercalaire est amélioré
- Seule la valeur U du châssis est améliorée
- Les valeurs U du châssis et du verre sont améliorées dans le même temps (partiellement, espace intercalaire inclus)
- Les valeurs U et g sont améliorées simultanément
- La valeur g est améliorée en même temps que la valeur U du châssis
- Les valeurs U et g sont améliorées en même temps que la valeur U du châssis

⁶ A côté de la température ambiante, les températures de surface sont l'un des facteurs déterminants qui influent sur le confort thermique

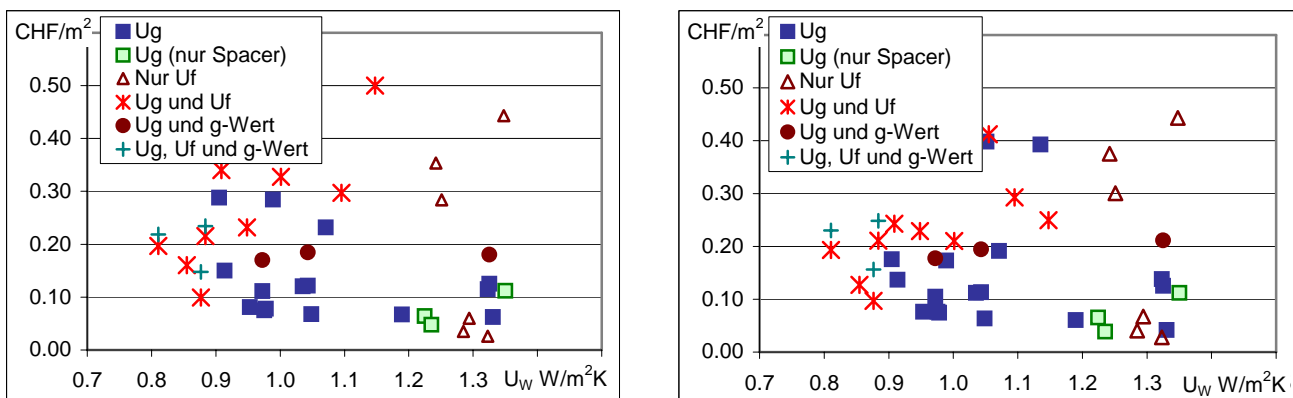
| Unternehmen Beschreibung | Energietechnische Kennwerte | | | | | Längenmasse | | | Flächenmasse | | Rahmen- anteil | Preis CHF/m ² | | Jahreskosten CHF/m ² F _{g,a} | | | | Grenzkosten (*) CHF/kWh _{NE} | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|--------|------|-------|-------|-------------|--------|------|--------------|--------|-------------------|--------------------------|--------|--|-----|------|------|---------------------------------------|------|------|-------|------|
| | Ug | g-Wert | Uf | Psi | Uw | psi | Breite | Höhe | Frame | Window | | Erneuer | Neubau | Süd | Ost | West | Nord | Süd | Ost | West | Nord | |
| Unternehmen 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Holz bzw. Holz-Verbindematerialien | 1_Referenz | 1.1 | 0.55 | 1.5 | 0.07 | 1.47 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 382 | 347 | 28 | 28 | 28 | 31 | | | | |
| | 4_Nur Uf | 1.1 | 0.55 | 1.3 | 0.05 | 1.32 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 390 | 354 | 27 | 27 | 27 | 30 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| | 2_Ug | 1.0 | 0.55 | 1.5 | 0.05 | 1.33 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 408 | 373 | 29 | 29 | 29 | 32 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| | 2_Ug | 0.6 | 0.51 | 1.5 | 0.05 | 1.04 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 442 | 407 | 30 | 30 | 30 | 33 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.11 |
| | 2_Ug | 0.5 | 0.51 | 1.5 | 0.05 | 0.97 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 449 | 413 | 30 | 30 | 30 | 33 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.10 |
| | 4_Nur Uf | 1.1 | 0.55 | 1.0 | 0.05 | 1.25 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 494 | 459 | 35 | 35 | 35 | 38 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.30 |
| | 5_Ug und Uf | 0.5 | 0.51 | 1.3 | 0.05 | 0.88 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 463 | 427 | 30 | 30 | 30 | 33 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| | 5_Ug und Uf | 0.6 | 0.51 | 1.0 | 0.05 | 0.88 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 554 | 519 | 38 | 37 | 37 | 40 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.21 |
| | 5_Ug und Uf | 0.5 | 0.51 | 1.0 | 0.05 | 0.81 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 561 | 525 | 38 | 37 | 37 | 40 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.19 |
| | 2_Ug | 1.1 | 0.62 | 1.3 | 0.05 | 1.32 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 443 | 408 | 30 | 30 | 30 | 33 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.14 |
| | 6_Ug und g-Wert | 1.0 | 0.62 | 1.5 | 0.05 | 1.33 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 462 | 427 | 32 | 32 | 32 | 35 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.21 |
| | 6_Ug und g-Wert | 0.6 | 0.59 | 1.5 | 0.05 | 1.04 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 522 | 487 | 35 | 35 | 35 | 38 | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.19 |
| | 6_Ug und g-Wert | 0.5 | 0.59 | 1.5 | 0.05 | 0.97 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 529 | 494 | 35 | 35 | 35 | 38 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.18 |
| | Uf und g-Wert | 1.1 | 0.62 | 1.0 | 0.05 | 1.25 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 548 | 513 | 38 | 38 | 37 | 41 | 0.26 | 0.26 | 0.25 | 0.30 |
| | Ug, Uf und g-Wert | 0.5 | 0.59 | 1.3 | 0.05 | 0.88 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 543 | 507 | 35 | 35 | 35 | 38 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.16 |
| Ug, Uf und g-Wert | 0.6 | 0.59 | 1.0 | 0.05 | 0.88 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 634 | 599 | 42 | 42 | 42 | 45 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.25 | |
| Ug, Uf und g-Wert | 0.5 | 0.59 | 1.0 | 0.05 | 0.81 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 641 | 606 | 42 | 42 | 42 | 45 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.23 | |
| Unternehmen 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Holz bzw. HMI bzw. Holz-Glas | 1_Referenz | 1.1 | 0.54 | 1.4 | 0.07 | 1.44 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 455 | 390 | 32 | 31 | 31 | 34 | | | | |
| | 2_Ug | 1.1 | 0.51 | 1.4 | 0.04 | 1.33 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 459 | 393 | 32 | 31 | 31 | 34 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.04 |
| | 2_Ug | 0.9 | 0.51 | 1.4 | 0.04 | 1.19 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 473 | 407 | 30 | 29 | 29 | 32 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06 |
| | 2_Ug | 0.7 | 0.51 | 1.4 | 0.04 | 1.05 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 487 | 422 | 30 | 29 | 29 | 32 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06 |
| | 2_Ug | 0.6 | 0.51 | 1.4 | 0.04 | 0.98 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 500 | 435 | 30 | 30 | 30 | 32 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.07 |
| | 4_Nur Uf | 1.1 | 0.54 | 1.1 | 0.04 | 1.24 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 583 | 518 | 34 | 34 | 34 | 37 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.38 |
| 5_Ug und Uf | 0.9 | 0.51 | 1.1 | 0.04 | 1.10 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 596 | 531 | 35 | 35 | 34 | 37 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.29 | |
| 5_Ug und Uf | 0.7 | 0.51 | 1.1 | 0.04 | 0.95 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 615 | 550 | 35 | 35 | 35 | 37 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | |
| Unternehmen 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Holz-Alu / Holz-Glas | 1_Referenz | 1.1 | 0.55 | 1.4 | 0.07 | 1.44 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 462 | 401 | 28 | 28 | 28 | 31 | | | | |
| | 3_Ug (nur Spacer) | 1.1 | 0.51 | 1.3 | 0.025 | 1.24 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 470 | 409 | 28 | 28 | 28 | 30 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.04 |
| | 2_Ug | 0.7 | 0.51 | 1.3 | 0.025 | 0.95 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 509 | 448 | 29 | 28 | 28 | 31 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| | 4_Nur Uf | 1.1 | 0.55 | 1.3 | 0.04 | 1.28 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.3 | 5.63 | 0.23 | 476 | 415 | 27 | 27 | 27 | 30 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.04 |
| | 3_Ug (nur Spacer) | 1.1 | 0.51 | 1.3 | 0.025 | 1.22 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.3 | 5.63 | 0.23 | 484 | 423 | 28 | 28 | 28 | 31 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.07 |
| 2_Ug | 0.7 | 0.51 | 1.3 | 0.04 | 0.98 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.3 | 5.63 | 0.23 | 515 | 455 | 28 | 28 | 28 | 31 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | |
| Unternehmen 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Kunststoff | 1_Referenz | 1.1 | 0.54 | 1.4 | 0.07 | 1.41 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.2 | 5.63 | 0.21 | 359 | 314 | 21 | 21 | 21 | 24 | | | | |
| | 3_Ug (nur Spacer) | 1.1 | 0.54 | 1.4 | 0.05 | 1.35 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.2 | 5.63 | 0.21 | 369 | 325 | 22 | 21 | 21 | 24 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| | 2_Ug | 0.7 | 0.51 | 1.4 | 0.05 | 1.03 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.2 | 5.63 | 0.21 | 412 | 368 | 23 | 23 | 22 | 25 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.11 |
| Unternehmen 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Kunststoff | 1_Referenz | 1.2 | 0.63 | 1.4 | 0.034 | 1.38 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.7 | 5.63 | 0.29 | 376 | 336 | 22 | 22 | 22 | 25 | | | | |
| | 4_Nur Uf | 1.2 | 0.63 | 1.1 | 0.034 | 1.29 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 388 | 348 | 22 | 22 | 21 | 25 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.07 |
| | 5_Ug und Uf | 1.0 | 0.53 | 1.1 | 0.034 | 1.15 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 413 | 373 | 24 | 24 | 24 | 27 | 0.50 | 0.53 | 0.61 | 0.25 |
| | 5_Ug und Uf | 0.8 | 0.50 | 1.1 | 0.034 | 1.00 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 437 | 397 | 25 | 25 | 25 | 28 | 0.33 | 0.34 | 0.36 | 0.21 |
| | 5_Ug und Uf | 0.6 | 0.50 | 1.1 | 0.034 | 0.85 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 440 | 400 | 24 | 24 | 24 | 27 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.13 |
| Holz-Alu | 1_Referenz | 1.2 | 0.63 | 1.6 | 0.034 | 1.43 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 486 | 446 | 29 | 29 | 29 | 33 | | | | |
| | 4_Nur Uf | 1.2 | 0.63 | 1.3 | 0.034 | 1.35 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 539 | 499 | 32 | 32 | 32 | 35 | 0.44 | 0.44 | 0.44 | 0.44 |
| | 2_Ug | 0.8 | 0.51 | 1.6 | 0.034 | 1.14 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 538 | 498 | 33 | 33 | 32 | 35 | 3.36 | 5.28 | -9.8 | 0.39 |
| | 2_Ug | 0.6 | 0.50 | 1.6 | 0.034 | 0.99 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 542 | 502 | 32 | 32 | 32 | 35 | 0.28 | 0.29 | 0.32 | 0.17 |
| | 5_Ug und Uf | 0.8 | 0.51 | 1.3 | 0.034 | 1.05 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 589 | 549 | 36 | 36 | 35 | 38 | 0.77 | 0.80 | 0.91 | 0.41 |
| 5_Ug und Uf | 0.6 | 0.50 | 1.3 | 0.034 | 0.91 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 593 | 553 | 35 | 35 | 35 | 38 | 0.34 | 0.35 | 0.37 | 0.24 | |
| Holz | 1_Referenz | 1.2 | 0.63 | 1.3 | 0.033 | 1.34 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 473 | 433 | 32 | 32 | 32 | 35 | | | | |
| | 2_Ug | 0.8 | 0.51 | 1.3 | 0.033 | 1.05 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 526 | 486 | 36 | 36 | 36 | 39 | 3.41 | 5.35 | -9.91 | 0.40 |
| | 2_Ug | 0.6 | 0.50 | 1.3 | 0.033 | 0.90 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.5 | 5.63 | 0.27 | 530 | 490 | 36 | 36 | 35 | 38 | 0.29 | 0.30 | 0.33 | 0.18 |
| Unternehmen 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Holz-Alu | 1_Referenz | 1.1 | 0.55 | 1.5 | 0.034 | 1.31 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.2 | 5.63 | 0.21 | 602 | 528 | 35 | 35 | 34 | 38 | | | | |
| | 2_Ug | 0.8 | 0.51 | 1.5 | 0.034 | 1.07 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.2 | 5.63 | 0.21 | 649 | 574 | 37 | 37 | 36 | 40 | 0.23 | 0.24 | 0.24 | 0.19 |
| | 2_Ug | 0.6 | 0.51 | 1.5 | 0.034 | 0.91 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.2 | 5.63 | 0.21 | 668 | 593 | 37 | 37 | 37 | 40 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.14 |
| Holz | 1_Referenz | 1.1 | 0.55 | 1.5 | 0.034 | 1.31 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.2 | 5.63 | 0.21 | 529 | 454 | 34 | 34 | 34 | 37 | | | | |
| | 2_Ug | 0.8 | 0.51 | 1.5 | 0.034 | 1.07 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.2 | 5.63 | 0.21 | 574 | 500 | 37 | 37 | 36 | 40 | 0.23 | 0.23 | 0.24 | 0.19 |
| | 2_Ug | 0.6 | 0.51 | 1.5 | 0.034 | 0.91 | 20 | 3.4 | 1.6 | 1.2 | 5.63 | 0.21 | 593 | 518 | 37 | 37 | 37 | 40 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.14 |

Tableau 75

Indices techniques, coûts d'investissement et coûts marginaux (* par rapport à la fenêtre standard) de l'efficacité énergétique pour les fenêtres à l'exemple de six entreprises de fenêtres (Enquête et calculs CEPE)

Comme pour les vitrages (Chap. 5.2.1), le calcul des effets énergétiques se base simplement sur la réduction des pertes de transmission et la différence des gains solaires (facteur d'ombre par protection solaire orientation sud 0.5, est 0.65, ouest 0.65, nord 0.8, taux d'utilisation chaleur libre 60%) avec un taux d'utilisation de la chaleur libre de 0.6.

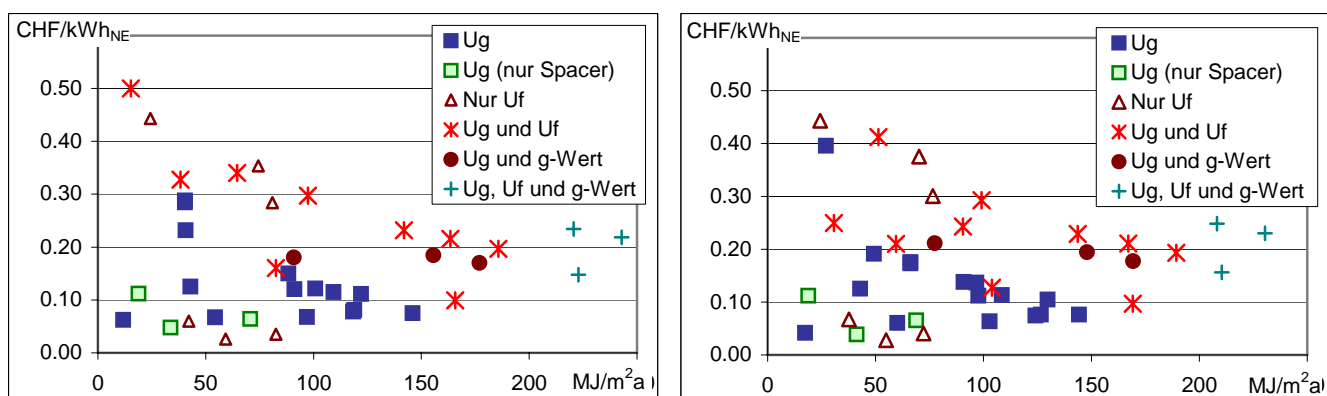
Les résultats figurant dans le Tableau 75 et le Graphique 68 indiquent une forte dispersion des coûts marginaux bruts. Dans le cas défavorable, une petite amélioration de la valeur U de l'ensemble de la fenêtre peut déjà générer des coûts marginaux bruts élevés. La dispersion est particulièrement forte pour les améliorations du châssis. Par contre, la plage inférieure des coûts marginaux bruts se situe seulement entre 2 et 3 ct./kWh_{EU}, tandis qu'avec beaucoup de fenêtres, les coûts marginaux bruts sont inférieurs à 10 ct./kWh_{EU}. Dans le cas de best practice, jusqu'à ces coûts marginaux bruts (10 ct./kWh_{EU}), la valeur U peut s'abaisser légèrement en dessous de 0.9 W/m²K (pour comparaison: le module MINERGIE pour fenêtres exige une valeur Uw de 1.0 W/m²K). Les coûts marginaux augmenteront encore si l'on souhaite une valeur U encore moindre.



Graphique 18 Coûts marginaux (CHF/kWh_{EU}) par rapport à la fenêtre standard en fonction de la valeur Uw atteinte pour la fenêtre, avec orientation sud (à gauche) et orientation nord (à droite)

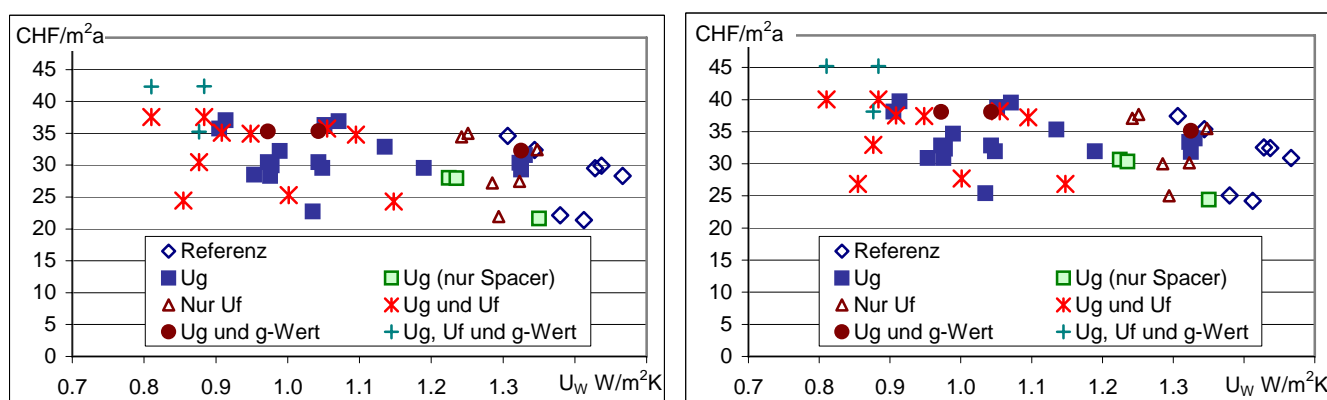
Le Graphique 69 montre les coûts marginaux bruts en fonction de la réduction de chauffage obtenue (réduction d'énergie utile, c'est-à-dire réduction IDE en MJ_{EU}/m²a). Quand les réductions de chauffage sont faibles, les coûts marginaux bruts atteignent leur apogée (ceci est vraisemblable, car la réduction de chauffage entre dans le calcul des coûts marginaux) et ils reculent à mesure que la réduction de chauffage augmente. La partie inférieure des coûts marginaux bruts se situe vers 2 à 3 ct./kWh_{EU}, tandis qu'avec beaucoup de fenêtres, les coûts marginaux bruts sont inférieurs à 10 ct./kWh_{EU}. Dans le cas de best practice, jusqu'à ces coûts marginaux bruts (10 ct./kWh_{EU}), la réduction de chauffage peut facilement atteindre 150 MJ/m²_{Fe}a. Les coûts marginaux augmenteront encore si l'on souhaite une réduction encore plus grande par m² de fenêtre.

Comme alternative à la représentation des coûts marginaux, les résultats peuvent aussi être indiqués en tant que coûts annuels. Les coûts annuels se composent des coûts de capital des fenêtres (montage inclus) et des coûts énergétiques. Les coûts énergétiques sont basés sur le bilan énergétique (pertes de chaleur - part utilisée de gain solaire), un prix de l'énergie de 7 ct./kWh, un taux d'utilisation du système de chauffage de 0.9 et une part variable de production de chaleur de 1 ct./kWh. Les coûts annuels d'entretien ont été estimés à 2% du montant des investissements pour les fenêtres en bois, et à 1% pour les fenêtres en bois-métal, le châssis recouvert de verre et les fenêtres en matière synthétique.



Graphique 69 Coûts marginaux (CHF/kWh_{EU}) par rapport à la fenêtre standard en fonction de la réduction de chauffage obtenue (réduction d'énergie utile MJ_{EU}/m²a) pour les orientations sud (à gauche) et nord (à droite)

Dans le Graphique 70, les résultats sont représentés en fonction de la valeur U atteinte pour la fenêtre. Les fenêtres de référence des différents entreprises présentent déjà une certaine dispersion, tant pour le prix que pour la valeur U de la fenêtre (le matériau du châssis a une certaine influence, voir également les données de base correspondantes dans le Tableau 75). Pour l'ensemble des entreprises, les coûts annuels de l'ordre d' $U_w=1.5$ W/m²K à environ 1.0 W/m²K sont pratiquement constants. Dans un cas isolé (best practice), la valeur U de la fenêtre peut même atteindre 0.85 avec des coûts annuels pratiquement identiques; en moyenne, les coûts annuels accusent une légère hausse vers les valeurs U moindres.



Graphique 70 Coûts annuels (CHF/m²_{Fea}) en fonction de la valeur U_w atteinte pour la fenêtre, avec les orientations sud (à gauche) et nord (à droite) (Prix de l'énergie 7 ct./kWh, taux d'intérêt réel 3%)

5.2.3 Fenêtres des bâtiments existants

Concernant les rénovations de fenêtres, on peut faire les mêmes considérations que pour une nouvelle construction. S'agissant des coûts marginaux, ce sont les différences que l'on prend en compte: par conséquent, les coûts marginaux d'une amélioration par rapport à une nouvelle fenêtre standard, qui doit de toute façon être remplacée, sont les mêmes que pour une nouvelle construction. Au niveau des coûts annuels, on note pour toutes les fenêtres (fenêtres standards et fenêtres haute performance) un décalage vertical vers le haut (pour le démontage et l'enlèvement des anciennes fenêtres). Selon les différentes entreprises, il oscille entre 2 et 4 CHF/m²a.

Les situations de référence «Remise en état» et «Dépenses courantes pour l'énergie» doivent être traitées différemment.

- Situation de référence «Dépenses courantes pour l'énergie»: à n'importe quel moment (même en dehors du «cycle de renouvellement»), on peut se demander si les dépenses courantes pour l'énergie avec d'anciennes fenêtres sont plus élevées que le coût total du remplacement des fenêtres. Si les coûts de capital et les coûts énergétiques des nouvelles fenêtres sont inférieurs aux dépenses courantes pour l'énergie, le remplacement est rentable.
- Situation de référence «Remise en état»: au moment où une remise en état s'avère nécessaire (pour les fenêtres en bois, en général tous les 12 à 18 ans), on peut se demander si les dépenses courantes pour l'énergie plus les coûts de remise en état (répartis sur les coûts annuels) sont plus hauts ou plus bas que le coût total du remplacement. Pour les fenêtres en bois, les coûts d'une remise en état de fenêtres correctement exécutée oscillent entre 60 et 100 CHF/m² (ou entre 70 et 120 CHF/m² pour un volume de commande moins important).

Le Tableau 76 représente les coûts annuels dans les cas «Dépenses courantes pour l'énergie» et «Remise en état». Pour le calcul des coûts énergétiques, on n'a pas seulement pris en compte les pertes de transmission et les gains solaires, mais également les pertes de ventilation (hypothèse: 80 MJ/m²_{Fe}a). Pour les fenêtres en bois, les coûts d'une remise en état de fenêtres correctement exécutée oscillent entre 60 et 100 CHF/m² (ou entre 70 et 120 CHF/m² pour un volume de commande moins important).

| | Ug (W/m ² K) | val. g | Uf (W/m ² K) | Psi | part châssis | Uw (W/m ² K) | Coûts annuels CHF/m ² _{FEa} Orientation | | | |
|----------------------------|----------------------------|--------|----------------------------|------|-----------------|----------------------------|--|-----|-------|------|
| | | | | | | | sud | est | ouest | nord |
| Dépenses cour. énergie | 2.2 | 72% | 1.5 | 0.07 | 0.29 | 2.2 | 6.4 | 6.3 | 5.8 | 9.8 |
| Dépenses cour. énergie | 3.0 | 72% | 1.5 | 0.07 | 0.29 | 2.8 | 11 | 10 | 10 | 14 |
| Remise en état (val. inf.) | 2.2 | 72% | 1.5 | 0.07 | 0.29 | 2.2 | 11 | 11 | 11 | 15 |
| Remise en état (val. sup.) | 3.0 | 72% | 1.5 | 0.07 | 0.29 | 2.8 | 19 | 19 | 18 | 22 |

Valeur inférieure supposée (val. inf.): 60 CHF/m², valeur supérieure supposée (val. sup.): 100 CHF/m² (durée de vie 15 ans)

Tableau 76: Coûts annuels dans les cas «Dépenses courantes pour l'énergie» et «Remise en état» de fenêtres (Prix de l'énergie 7 ct./kWh, taux d'utilisation système de chauffage 0.9, part variable coûts de production de chaleur 1 ct./kWh)

Dans la situation de référence «Remise en état», mais surtout dans la situation de référence «Dépenses courantes pour l'énergie», les coûts annuels obtenus dans la majorité des cas sont inférieurs aux coûts annuels d'un remplacement de fenêtres (cf. Graphique 70 plus environ 2 à 4 CHF/m²a), voire très inférieurs. Un remplacement de fenêtres ne peut être rentable que

- si les coûts de remise en état excèdent 120 à 150 CHF/m² ou
- si l'on estime que la durée de vie de la remise en état est nettement inférieure à 15 ans, ou
- si le prix de l'énergie était sensiblement plus élevé (c'est-à-dire sans évaluer spécialement la valeur à neuf d'une nouvelle fenêtre). Pour que le remplacement de fenêtres soit rentable au moment de la remise en état (selon les hypothèses émises précédemment), le prix de l'énergie devrait être de 9 ct./kWh (situation coûts de remise en état=100 CHF/m², Ug=3.0) ou de 18 ct./kWh (situation coûts de remise en état=60 CHF/m², Ug=2.2). Pour que le remplacement de fenêtres soit rentable à n'importe quel moment, le prix de l'énergie devrait être de 14 ct./kWh (cas Ug=3.0, orientation nord) ou d'environ 17 ct./kWh (cas Ug=3.0, orientations est, sud, ouest).
- si le niveau des coûts du remplacement de fenêtres était nettement plus bas. Globalement, il est donc avéré que, dans la majorité des cas, on ne remplace pas les fenêtres pour des raisons énergétiques ou pour des questions de coûts (c'est plutôt la durée de vie, l'état qui décide de la faisabilité d'une remise en état, ou les considérations de confort, par ex. des courants d'air).

5.3 Installations de ventilation

On peut augmenter l'efficacité énergétique des installations de ventilation de deux manières: au niveau des besoins en chaleur et au niveau de la demande d'électricité. Toutes les mesures affectant le fonctionnement ou les investissements permettent de réduire simultanément les besoins en chaleur et en électricité. En particulier pour les bâtiments existants, les situations initiales concernant la ventilation sont multiples et le spectre de mesures l'est tout autant.

5.3.1 Pose d'une ventilation avec récupération de chaleur

L'utilité première d'une ventilation est de garantir la qualité de l'air (hygiène de l'air, concentration moindre de CO₂, de polluants, d'odeurs, etc.), de réduire les nuisances sonores extérieures et – avec un refroidissement de l'air frais – d'améliorer le confort thermique. Historiquement parlant, c'est d'abord à ces fins qu'on a installé des ventilations, et le thème de l'efficacité énergétique est apparu dans une phase ultérieure. Dans cette optique, le gain d'efficacité énergétique dû aux équipements ou concepts de ventilation doit être considéré comme un bénéfice additionnel.

Si l'on considère malgré tout la ventilation (dotée d'une forme ou l'autre de récupérateur de chaleur) comme une pure mesure d'efficacité énergétique, son installation est liée à des coûts marginaux relativement élevés ou à des surcoûts annuels nets, même dans les bâtiments du secteur des services. Pour une nouvelle construction et par rapport à la situation de référence de l'aération manuelle par les fenêtres, ces surcoûts nets oscillent entre 7 et 9 CHF/m²a. Par rapport à l'ouverture automatisée des fenêtres qui, dans une certaine mesure, remplit une fonction analogue à celle de la ventilation s'agissant de l'hygiène de l'air et du confort thermique, les surcoûts sont sensiblement plus bas, soit seulement entre 2 et 3 CHF/m²a (voir Tableau 77). Comparativement à l'ouverture manuelle des fenêtres, les coûts marginaux du gain d'efficacité énergétique (combustible) sont d'à peine 40 ct./kWh dans le cas le plus favorable, alors qu'ils se situent entre 17 et 30 ct./kWh en comparaison de l'ouverture automatisée des fenêtres.

Pour les bâtiments existants, les surcoûts ou les coûts marginaux correspondants sont encore légèrement plus élevés, car le niveau des coûts d'investissements est supérieur, compte tenu des travaux d'adaptation architecturale ou des travaux éventuels de démolition (voir Graphiques 45 à 47). Dans le Tableau 77, les coûts de capital et partant, les coûts annuels augmentent en conséquence.

| | IDE _{comb} | IDE _{él} | Inves-- tisse-- ment. | Coûts annuels CHF/m ² a | | | | Coûts margin. CHF/kWh | |
|---|---------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------|--------------|-------------|-----------------------------|------|
| | MJ/m ² a | MJ/m ² a | CHF/m ² | Capital | Entre- tien | Combustibles | Electricité | | |
| Pas de ventil. mécan., ouvert. man. des fenêtres | 206 | | | | | 4.0 | 0.0 | 4.0 | |
| Ouvert. automatique des fenêtres | 206 | | 58 * | 4.9 | 0.6 | 4.0 | 0.0 | 9.5 | |
| Ventilation avec RC | 134 | 27 | 92 ** | 7.4 | 1.8 | 2.6 | 1.3 | 13.0 | 0.25 |
| Lié au CO ₂ (quantités d'air moindres), pertes de chaleur standard | 130 | 18 | 82 ** | 6.6 | 1.6 | 2.5 | 0.8 | 11.5 | 0.17 |
| Install. alimentée à l'air vicié | 119 | 29 | 80 ** | 6.7 | 1.6 | 2.3 | 1.4 | 12.0 | 0.17 |
| Dispos. ventil. décentral. sur façades | 148 | 9 | 95 | 7.9 | 1.9 | 2.9 | 0.4 | 13.1 | 0.30 |

Tableau 77: Pose de divers systèmes de ventilation en comparaison de l'ouverture manuelle ou automatisée des fenêtres (Référence) à l'exemple d'un bâtiment de 3000 m² de surface ventilée (valeurs énergétiques selon résultats de simulation ou estimations CEPE, * coûts selon Graphique 45, surface fenêtres par rapport à SRE: 0.3, ** coûts selon Graphique 46 et Graphique 47, 4 (m³/h)/m²)

Au plan de la rentabilité, les ventilations liées à la concentration de CO₂ (qui ont été évaluées selon des hypothèses plutôt conservatrices) ainsi que les dispositifs décentralisés combinés ou les dispositifs de parapet sont des potentiels intéressants. L'avantage des ventilations liées à la concentration de CO₂ réside dans leur dimensionnement et leur fonctionnement adaptés aux besoins, alors que le point fort des dispositifs décentralisés combinés réside dans la meilleure utilisation de leurs capacités et ressources (economy of scope).

5.3.2 Amélioration simultanée de l'efficacité électrique et thermique pour les ventilations de bâtiments neufs

L'efficacité électrique des ventilations peut être améliorée grâce aux pertes de charges moindres, aux ventilateurs plus performants et à la réduction des quantités d'air pulsé. Cette dernière mesure réduit par ailleurs la demande d'énergie thermique finale, mais l'effet est relativement faible avec un récupérateur de chaleur haute performance.

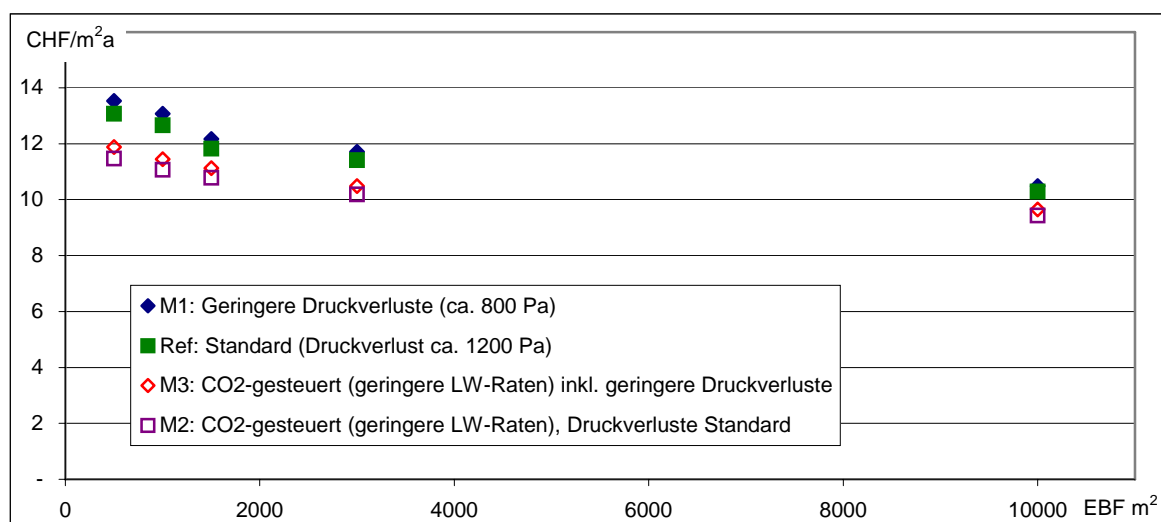
Les coûts d'investissements pour les installations avec pertes de charges moindres (monobloc et branchements de distribution d'un plus grand diamètre) selon le Graphique 46 sont plus élevés de 10% à 7% (pour une réduction de pertes de charges de 800 Pa à 1200 Pa et un ventilateur/moteur électrique d'un coefficient de performance amélioré de 10%); ils ne peuvent être entièrement compensés par une réduction des coûts d'électricité (il subsiste un léger surcoût de 0.3 CHF/m²a, voir Tableau 78, E1). Les coûts moyens du gain d'efficacité électrique par rapport à la référence sont légèrement supérieurs à 25 ct./kWh (différence des coûts annuels pour le capital, les combustibles et l'entretien par rapport à la référence divisée par le gain d'efficacité électrique). Les coûts d'investissements supplémentaires ne devraient pas excéder 7% ou 5% pour atteindre la rentabilité. Ceci est valable pour les applications avec périodes d'utilisation comme dans les bâtiments de bureaux ou des bâtiments analogues. Si l'exploitation exige de plus longues périodes d'utilisation, il est tout à fait possible d'amortir les coûts d'investissements supplémentaires grâce à une installation avec pertes de charges moindres.

Cependant, le concept de la ventilation avec un réglage en fonction du CO₂ et donc de plus petites quantités d'air, s'avère très intéressant au plan de la rentabilité, car il permet d'abaisser les coûts d'investissements, les coûts d'électricité et ainsi également les coûts annuels totaux (Tableau 78, E2). Cette constatation vaut pour les installations avec récupérateur de chaleur haute ou moyenne performance, ainsi que pour les grands et petits bâtiments (voir Graphique 71 et Graphique 135 en annexe). Les coûts moyens du gain d'efficacité électrique (E2 par rapport à Réf) sont négatifs, c'est-à-dire que non seulement les kWh d'électricité non utilisés ne coûtent rien, mais ils dégagent encore un bénéfice net.

| | IDE _{él} | IDE _{comb} | Investiss. | Coûts annuels CHF/m ² a | | | | DK spéc. CHF/kWh _{él} | |
|---|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------|---------|----------|---------|-----------------------------------|-------|
| | MJ/m ² a | MJ/m ² a | CHF/m ² | Capital | Entret. | Combust. | Electr. | | Total |
| Cas RC 65% | | | | | | | | | |
| Réf: standard (perte charges environ 1200 Pa) | 26* | 55* | 88 | 7.4 | 1.8 | 1.1 | 1.2 | 11.4 | |
| E1: perte charges moindre (environ 800 Pa) | 14*** | 55* | 96 | 8.0 | 1.9 | 1.1 | 0.7 | 11.7 | 0.27 |
| E2: lié au CO ₂ , perte charges standard | 17** | 36** | 84 | 7.0 | 1.7 | 0.7 | 0.8 | 10.2 | -0.32 |
| E3: lié au CO ₂ , perte charges moindre | 9*** | 36** | 90 | 7.5 | 1.8 | 0.7 | 0.4 | 10.5 | -0.04 |
| Cas RC 90% | | | | | | | | | |
| Réf: standard (perte charges environ 1200 Pa) | 26* | 13* | 92 | 7.4 | 1.8 | 0.2 | 1.2 | 10.6 | |
| E1: perte charges moindre (environ 800 Pa) | 14*** | 13* | 100 | 8.0 | 1.9 | 0.2 | 0.7 | 10.9 | 0.27 |
| E2: lié au CO ₂ , perte charges standard | 17** | 8** | 87 | 7.0 | 1.7 | 0.2 | 0.8 | 9.7 | -0.21 |
| E3: lié au CO ₂ , perte charges moindre. | 9*** | 8** | 93 | 7.5 | 1.8 | 0.2 | 0.4 | 9.9 | 0.03 |

Tableau 78: Mesures d'efficacité des ventilations dans nouveaux bâtiments pour deux coefficients de performance différents de RC, à l'exemple de nouveaux bâtiments de bureaux d'une SRE de 3000 m² (durée de vie 15 ans, taux d'intérêt réel 3%, prix combustible 7 ct./kWh, prix électricité 17 ct./kWh, *valeurs énergétiques selon calculs de simulation, période de fonctionnement jours ouvrables de 7 à 19 heures, ** 35% moins d'air, *** conversion selon rapport pertes de charges et ventilateur plus performant: 65% au lieu de 55%)

Le fait surprenant est qu'on obtient une baisse des coûts énergétiques, mais également des coûts d'investissements (même faible), car habituellement, les mesures en faveur d'une meilleure efficacité énergétique dans la technique du bâtiment génèrent des coûts d'investissements plus élevés (pouvant être compensés totalement ou partiellement par une réduction des coûts d'exploitation). Ainsi, la ventilation réglée en fonction du CO₂ est une véritable exception, puisqu'elle est intéressante même selon les critères décisionnels axés sur les investissements.



Graphique 71 Coûts annuels spécifiques des ventilations avec RC de différentes efficacités énergétiques en fonction de la surface à ventiler (coûts d'investissements selon Graphique 46, hypothèses selon Tableau 78, rendement thermique du RC 65%)

5.3.3 Amélioration simultanée de l'efficacité électrique et thermique pour les renouvellements de ventilations dans les bâtiments existants

Les équipements de ventilation des bâtiments existants se caractérisent fréquemment par de grandes quantités d'air et de pertes de charges. Le potentiel de gain d'efficacité est donc d'autant plus important lors du renouvellement de ces installations. Souvent, le renouvellement des équipements permet d'adapter les quantités d'air aux besoins réels de l'hygiène de l'air et de réduire de manière significative les pertes de charges de la préparation et de la distribution d'air et partant, de la consommation de courant. Compte tenu des quantités d'air moindres, la demande d'énergie thermique diminue aussi (même avec une situation de récupération de chaleur identique⁷) et également la consommation d'énergie de refroidissement pour les installations avec refroidissement de l'air frais.

La consommation d'électricité pour l'air pulsé est proportionnelle aux pertes de charges à compenser et proportionnelle à la quantité d'air pulsé. La perte de charges est à nouveau quasiment proportionnelle à la vitesse au carré et donc, pour une moyenne donnée, à la quantité d'air pulsé au carré. Sans autres modifications et avec la réduction d'un facteur deux de la quantité d'air, on pourrait escompter la réduction d'un facteur quatre des pertes de charges. Cependant, lors du renouvellement de l'installation de ventilation, on part de l'idée que les composants sont adaptés aux nouvelles quantités d'air, de sorte que l'hypothèse d'une telle réduction des pertes de charges serait irréaliste.

S'agissant des pertes de charges, les hypothèses selon le Tableau 24 (type de bâtiment BB3, RC inclus) sont à la base des résultats du Tableau 79 et du Tableau 102. On a supposé que le coefficient de performance du ventilateur et du RC n'était pas modifié lors du renouvellement⁸. Les résultats montrent que le renouvellement d'un équipement de ventilation, selon le point de comparaison et l'importance de la mesure, était réalisable avec des coûts annuels très inférieurs, à peine inférieurs ou pratiquement identiques. La rentabilité est la plus faible si l'on fait seulement une comparaison avec les dépenses courantes pour l'énergie et si les heures d'exploitation, déjà optimisées dans la situation de référence, ne peuvent plus être adaptées lors du renouvellement. Dans ce cas, les coûts annuels du renouvellement de la centrale de ventilation sont à peine inférieurs, alors que les coûts d'un renouvellement total, renouvellement de la distribution de ventilation inclus, sont un peu plus élevés (environ 1.5 CHF/m²a sans refroidissement, et 0.2 CHF/m²a avec refroidissement de l'air frais. Par contre, si l'on prend en compte les dépenses courantes d'entretien pour les calculs de comparaison, le renouvellement d'une ventilation fait baisser les coûts annuels nets, notamment parce que les frais d'entretien d'une ancienne installation sont généralement plus élevés que ceux d'une installation rénovée.

⁷ L'effet d'une amélioration du récupérateur de chaleur lors du renouvellement de la centrale de ventilation n'est pas pris en compte dans ce sous-chapitre, mais il sera traité au sous-chapitre 5.3.4.

⁸ Au plan technique, les hypothèses à la base des calculs de comparaison sont globalement conservatrices: on s'est fondé sur un coefficient de performance constant pour les ventilateurs (55%) et les RC (65%). Si le coefficient de performance du RC était plus faible dans la situation de référence, les coûts annuels totaux dans la situation de référence seraient plus élevés (par ex. de 40% des coûts de combustibles), ou si le coefficient de performance du ventilateur était supérieur après le renouvellement, les coûts annuels seraient alors proportionnellement inférieurs, ce qui améliorerait encore globalement la rentabilité.

| | Energie finale (*) Chaleur Courant MJ/m ² a MJ/m ² a | Investi- tiss. CHF/m ² | Coûts annuels | | | | Total CHF/m ² a |
|--|---|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|
| | | | Capital | Entretien | Combust. | Electricité | |
| | | | CHF/m ² a | CHF/m ² a | CHF/m ² a | CHF/m ² a | |
| R1.1 Double quantité d'air (QA), 8 (m ³ /h)/m ² , 24 h/jour, 2700 Pa, sans [ou R1.2 incl.] coûts d'entretien | 385 340 | | | [3.1] | 7.5 | 16.2 | 23.6 [26.7] |
| R2.1 Double quantité d'air (QA), 8 (m ³ /h)/m ² , 12 h/jour, 2700 Pa, sans [ou R2.2 incl.] coûts d'entretien | 125 195 | | | [3.1] | 2.5 | 9.3 | 11.8 [14.9] |
| E1 QA selon besoins: 4 (m ³ /h)/m ² , 12 h/jour, nouvelle ventilation (ancienne distribution), 2025 Pa | 60 45 | 68 | 5.7 | 2.1 | 1.2 | 2.2 | 11.1 |
| E2 QA selon besoins: 4 (m ³ /h)/m ² , 12 h/jour, nouvelle ventilation, nouvelle distribution, 1375 Pa | 60 30 | 104 | 8.7 | 2.1 | 1.2 | 1.5 | 13.4 |

Tableau 5: Besoins énergétiques, coûts d'investissements et coûts annuels lors du renouvellement de ventilations (nouveau monobloc, sans ou nouvelle distribution incl.), à l'exemple d'un nouvel immeuble de bureaux de 3000 m² SRE, sans refroidissement de l'air frais (hypothèses: durée de vie 15 ans, taux d'intérêt réel 3%, prix combustible 7 ct./kWh, prix électricité 17 ct./kWh, (*) valeurs énergétiques selon calculs de simulation, arrondies.

Les coûts marginaux de la réduction de la consommation d'électricité (avec un prix fixe du combustible de 0.07 CHF/kWh) sont donc – à une exception près – inférieurs à 17 ct./kWh, et sensiblement inférieurs dans bien des cas (voir Tableau 80). L'exception concerne le cas R2.1 avec périodes d'exploitation déjà réduites dans la situation de référence, mais sans prise en compte des dépenses courantes pour l'entretien (base de comparaison, dépenses courantes pour l'énergie). Pour rappel: toutes les mesures avec des coûts marginaux inférieurs au prix en vigueur de l'électricité doivent être considérées comme rentables. Par kWh, le gain potentiel correspond à la différence entre les coûts marginaux et le prix de l'électricité. Si les coûts marginaux sont négatifs, le «produit» par kWh réduit est même plus élevé que le prix de l'électricité (c'est-à-dire que la mesure serait rentable, même si le courant était gratuit).

Les coûts marginaux de la réduction d'énergie thermique finale (avec un prix fixe de l'électricité de 17 ct./kWh) sont – à nouveau à l'exception R2.1 – nettement inférieurs au prix du combustible prévisible à moyen terme. Dans de nombreux cas, les coûts marginaux sont même négatifs, c'est-à-dire que les coûts nets, plus élevés que le prix du combustible, baissent pour chaque kWh d'énergie thermique finale économisé (autrement dit, les mesures correspondantes seraient rentables, même si le combustible était gratuit).

La rentabilité des renouvellements de ventilations, tels que décrits ici, fait relativement bonne figure, notamment du fait que les coûts énergétiques (chaleur et électricité) diminuent de manière significative suite à un renouvellement d'air moindre. Mais il convient également de relever que les coûts totaux d'un renouvellement de ventilation ne peuvent être compensés par la réduction des coûts énergétiques si, dans un cas concret, il n'y a aucune réduction des quantités d'air (c'est-à-dire si les quantités d'air sont identiques avant et après le renouvellement). On peut toutefois partir de l'idée que, pour la plupart des installations de ventilation antérieures à 1990 et devant être renouvelées, on pourra réduire les quantités d'air.

| Situations de référence (double quantité d'air (QA), 8 (m ³ /h)/m ² , 2700 Pa) | Coûts marginaux de la réduction de la consommation d'électricité (CHF/kWh) | | Coûts marginaux de la réduction d'énergie thermique finale (CHF/kWh) | |
|--|--|------|--|-------|
| | E1 | E2 | E1 | E2 |
| R1.1 24 h/jour, sans coûts d'entretien | 0.02 | 0.05 | -0.07 | -0.04 |
| R2.1 12 h/jour, sans coûts d'entretien | 0.15 | 0.21 | 0.03 | 0.16 |
| R2.1 24 h/jour, y.c. prise en compte des coûts d'entretien | -0.02 | 0.02 | -0.10 | -0.08 |
| R2.2 12 h/jour, y.c. prise en compte des coûts d'entretien | 0.08 | 0.14 | -0.13 | -0.01 |

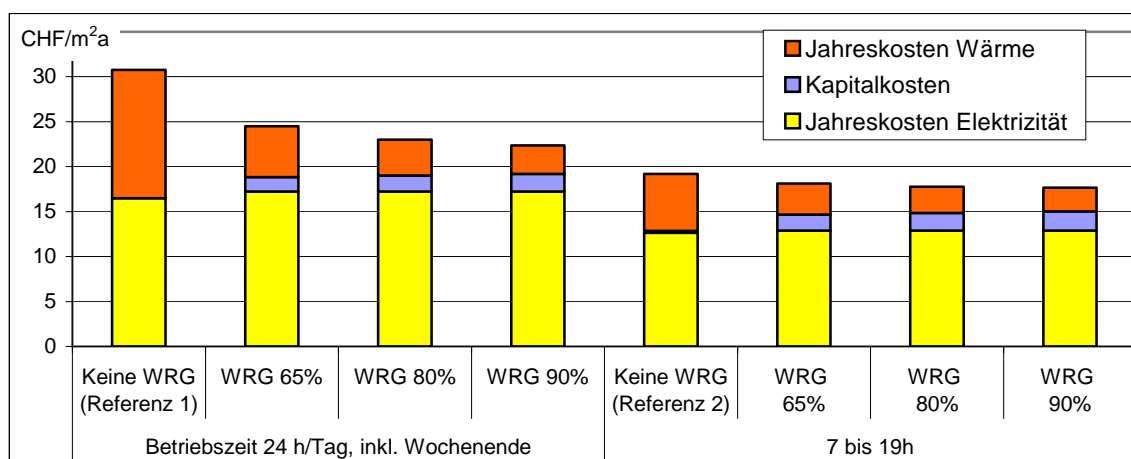
Tableau 80: Coûts marginaux spécifiques (CHF/kWh) lors du renouvellement de ventilations (E1: nouveau monobloc, E2: nouveau monobloc, nouvelle distribution incl.), à l'exemple du nouvel immeuble de bureaux de 3000 m² SRE, sans refroidissement de l'air frais.

Il faut relever ici que, pour les installations avec refroidissement de l'air frais, la réduction des quantités d'air en été peut s'avérer très importante au niveau du confort thermique. Pour les bâtiments avec charges internes élevées, une quantité d'air de 4 (m³/h)/m² dans les espaces sud ne suffit pas pour répondre aux besoins de confort. Dans ces cas, il faut une forte réduction des charges internes (personnes, appareils, éclairage) ou – si cela est impossible – un refroidissement complémentaire avec éléments réfrigérants (ce qui engendre les surcoûts correspondants). S'agissant des bâtiments à faible densité de personnes et faible dotation en appareils, le confort peut être assuré par le renouvellement simultané de l'éclairage.

Les mesures décrites au chapitre précédent 5.3.2 peuvent également s'appliquer aux bâtiments existants, moyennant quelques adaptations. Par exemple, une réduction supplémentaire des pertes de charges grâce aux plus grandes sections transversales des gaines de ventilation entrera rarement en ligne de compte pour des raisons architecturales. D'autre part, lors du renouvellement de ventilations, le réglage lié au CO₂ permet une réduction supplémentaire des quantités d'air et des pertes de charges, mais seulement pour certaines sections transversales de la ventilation qui dépendent de l'architecture. Par rapport aux renouvellements de ventilations standards, on peut ainsi réaliser des gains au niveau de l'efficacité énergétique et de l'efficacité des coûts comme ceux du Tableau 78. Il s'agira peut-être d'adapter le niveau des coûts légèrement supérieur pour les bâtiments existants (Graphiques 45 à 47) et le niveau absolu des pertes de charges et partant, la consommation d'électricité.

5.3.4 Pose d'un récupérateur de chaleur dans les bâtiments existants

On estime qu'une partie des installations de ventilation dans les bâtiments existants ne sont pas dotées d'un récupérateur de chaleur (RC). Dans de tels cas, la pose d'un RC génère des coûts annuels modérés (Graphique 72), c'est-à-dire que la mesure en question est rentable et permet d'économiser des coûts nets. Les coûts d'investissements (relativement bas) peuvent être amortis sur la durée de vie économique supposée de 15 ans et rapporter un intérêt réel de 3% en plus de l'économie de coûts nets, ceci malgré les coûts d'électricité légèrement supérieurs (Tableau 81) à cause des pertes de charges plus élevées liées à l'installation d'un RC. La rentabilité est particulièrement forte dans le cas d'une exploitation 24 heures sur 24; mais également dans la situation de référence d'une exploitation de 12 heures les jours ouvrables, le gain d'efficacité énergétique est assez grand pour déboucher sur une rentabilité suffisante. Ceci s'applique également à des hypothèses moins favorables, telles qu'un taux d'intérêt réel plus élevé (5%) et un prix du combustible moindre (5 ct./kWh), cf. Graphique 136 en annexe.



Graphique 72 Coûts annuels après la pose d'un RC, ainsi qu'après la pose d'un RC et après la réduction des périodes de fonctionnement en comparaison d'une ventilation sans RC fonctionnant 24 h sur 24 (Référence 1) et 12 h par jour (Référence 2), à l'exemple de 1500 m²_{SRE}, coûts d'investissement selon Graphique 47 (valeur moyenne), 3% intérêt réel, coûts énergétiques selon calculs de simulation (besoins énergétiques pour tout le bâtiment), prix électricité 17 ct./kWh, prix combustible 7 ct./kWh, quantité d'air 4 (m³/h)/m², effets énergétiques du RC selon Tableau 81

Moyennant un taux d'intérêt réel de 3%, les coûts d'investissements «pourraient» aussi être 15% à 20% plus élevés que le montant supposé du Tableau 81 et la rentabilité serait malgré tout atteinte (pour un fonctionnement de 12 h par jour; pour un fonctionnement 24 h sur 24, les coûts d'investissement pourraient être encore bien supérieurs).

En comparant les deux situations de référence, le Graphique 72 montre aussi clairement qu'une adaptation des périodes de fonctionnement génère une très grande réduction de coûts (en tout cas 10 CHF/m²a).

Les coûts moyens et les coûts marginaux de l'économie d'énergie thermique finale résultent de la différence des coûts de capital plus la différence des coûts d'électricité (légèrement supérieurs) divisées par le gain d'efficacité d'énergie thermique finale, en se référant à la situation de référence correspondante pour les coûts moyens et au niveau d'efficacité précédent pour les coûts marginaux. On observe alors les situations de référence ci-après:

- Situation de référence 1: la ventilation fonctionne 24 h/jour (week-end inclus)
- Situation de référence 2: la ventilation fonctionne entre 7 heures et 19 heures (seulement les jours ouvrables)

Par rapport au fonctionnement 24 h sur 24, les coûts moyens se situent en dessous de 2 ct./kWh et par rapport au fonctionnement de 12 h par jour, en dessous de 5 ct./kWh ou près de 4 ct./kWh (avec un coefficient de performance du RC de 80% ou plus), voir Tableau 81. Tant que les coûts marginaux de la production de chaleur (à court terme: prix de l'énergie finale divisé par le coefficient de performance de production et distribution de chaleur) sont inférieurs à ces coûts moyens, la pose d'un RC doit être considérée comme rentable.

Les résultats présentés dans ce chapitre s'appliquent au cas d'un bâtiment de bureaux de petite à moyenne grandeur avec quelque 1500 m² de surface ventilée (hypothèse de 4 (m³/h)/m²). Compte tenu des effets d'échelle des coûts d'investissement, la rentabilité pour les plus grands immeubles (ou plus grands équipements, par ex. avec un renouvellement d'air plus élevé) est légèrement meilleure, alors qu'elle est un peu moins bonne pour les plus petits bâtiments. Il faut toutefois relever que les effets d'échelle sont relativement faibles (voir Graphique 47). Dans certains cas, les adaptations architecturales ont probablement une plus grande influence sur la rentabilité.

| Temps de fonctionnement | | 24 h / jour | | | | | 7 h à 19 h | | | |
|---|------------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-----------------------|------------|-------|-------|--|
| | | Référence 1 aucune | 65% | 80% | 90% | Référence 2 aucune | 65% | 80% | 90% | |
| RC (coefficient de performance thermique) | | | | | | | | | | |
| Coûts d'investissement | CHF/m ³ | | 4.8 | 5.3 | 5.8 | 0.5 | 5.3 | 5.8 | 6.3 | |
| Coûts d'investissement | CHF/m ² _{SRE} | | 19.2 | 21.2 | 23.2 | 2.2 | 21.4 | 23.4 | 25.4 | |
| Durée de vie | ans | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | |
| Coûts de capital (dr=0.03) | CHF/m ² _{SREa} | | 1.6 | 1.8 | 1.9 | 0.2 | 1.8 | 2.0 | 2.1 | |
| IDE _{EEth} (tout le bâtiment) | MJ/m ² _{SREa} | 730 | 290 | 200 | 160 | 330 | 180 | 150 | 140 | |
| IDE _{él} (tout le bâtiment) | MJ/m ² _{SREa} | 350 | 365 | 365 | 365 | 270 | 275 | 275 | 275 | |
| Réduction IDE _{EEth} | MJ/m ² _{SREa} | | 440 | 530 | 570 | | 150 | 180 | 190 | |
| Différence IDE _{él} | MJ/m ² _{SREa} | | +15 | +15 | +15 | | +5 | +5 | +5 | |
| Coûts moyens | CHF/kWh _{EEth} | | 0.019 | 0.017 | 0.017 | | 0.045 | 0.041 | 0.041 | |
| Coûts marginaux | CHF/kWh _{EEth} | | 0.019 | 0.007 | 0.014 | | 0.045 | 0.022 | 0.045 | |

Tableau 81: Coûts moyens (par rapport à Référence 1 ou Référence 2) et coûts marginaux pour la pose d'un RC comparativement à une ventilation sans RC, pour deux périodes différentes de fonctionnement, coûts d'investissements selon Graphique 47 (valeur moyenne), prix électricité 17 ct./kWh, quantité d'air 4 (m³/h)/m², effets énergétiques selon calculs de simulation

5.3.5 Renouvellement des RC des anciennes ventilations

Par rapport aux dépenses courantes, il vaut la peine de remplacer un RC, à condition que le coefficient de performance thermique puisse passer de 45% (ancien RC) à 80% (Tableau 82), ceci même avec une quantité d'air déjà adaptée (4 (m³/h)/m²) dans la situation de référence. Les coûts de capital du nouveau RC peuvent être totalement compensés par la réduction des coûts de combustible (intérêt réel 3%, prix combustible 7 ct./kWh). Si le rendement du nouveau RC n'est que de 65%, il faut prévoir un léger surcoût (0.5 CHF/m²a), du fait que les coûts marginaux d'environ 10 ct./kWh_{comb} sont supérieurs aux coûts de combustible. Comparé au coefficient de 80% d'un RC, un rendement de 65% doit donc être considéré comme insatisfaisant.

| | | Réf1: RC 45%, fonct. 6-20 h, quantité d'air > 8 (m ³ /h)/m ² | Réf2: RC 45%, fonct. 7-19 h, quantité d'air 4 (m ³ /h)/m ² | RC 65%, fonct. 7-19 h, quantité d'air 4(m ³ /h)/m ² | RC 80%, quantité d'air 4 (m ³ /h)/m ² |
|--|------------------------------------|---|---|--|---|
| EE-IDE _{th} pour réchauffer l'air | MJ/m ² _{SREa} | 264 | 119 | 63 | 20 |
| Gain d'efficacité éner. therm. finale | MJ/m ² _{SREa} | | 144 | 200 | 244 |
| Coûts d'investissement | CHF/(m ³ /h) | | | 4.8 | 5.3 |
| Coûts d'investissement | CHF/m ² _{SRE} | | | 19.2 | 21.2 |
| Coûts de capital (dr=0.03) | CHF/m ² _{SREa} | | | 1.6 | 1.8 |
| Coûts annuels chaleur | CHF/m ² _{SREa} | 5.1 | 2.3 | 1.2 | 0.4 |
| Coûts annuels totaux | CHF/m ² _{SREa} | 5.1 | 2.3 | 2.8 | 2.2 |
| Coûts moyens comparés à Réf2 | CHF/kWh _{comb} | | | 0.10 | 0.06 |

Tableau 82: Coûts d'investissement, coûts annuels et coûts moyens du remplacement d'un RC (coefficients de performance thermique 65% et 80%) par rapport à un RC existant (coefficient de performance thermique 45%, à l'exemple de 1500m² SRE, coûts d'investissement selon Graphique 47 (valeur moyenne), effets énergétiques selon calculs de simulation, durée de vie 15 ans, prix combustible 7 ct./kWh

Sensitivité: si les coûts d'investissements augmentent de 15%, par ex. en raison d'adaptations architectoniques, les coûts moyens augmentent de 10 à 12 ct./kWh_{tcomb} (rendement du RC 65%) ou de 6 à 7 ct./kWh_{tcomb} (rendement 80%).

5.3.6 Amélioration du coefficient de performance thermique des récupérateurs de chaleur

Les résultats présentés dans le sous-chapitre 5.3.5 montrent également que les surcoûts des RC avec un coefficient de performance thermique plus élevé (coefficient de récupération) de 80% ou 90% au lieu de 65% peuvent être compensés par la réduction des coûts énergétiques due au gain d'efficacité. Selon le Tableau 81, les coûts moyens reculent effectivement si le coefficient augmente, tandis que les coûts marginaux sont inférieurs à 2 ct./kWh_{EE} (intérêt réel 3%, fonctionnement 24 h sur 24) ou à 5 ct./kWh_{EE} (intérêt réel 3%, fonctionnement 12 heures les jours ouvrables), ou avoisinent les 5 ct./kWh_{EE} (intérêt réel 5%, fonctionnement 12 heures les jours ouvrables), moyennant un prix d'électricité de 17 ct./kWh.

Comme les surcoûts d'investissements, en fonction de l'augmentation du coefficient de performance thermique (80% ou 90%, au lieu de 65%), sont approximativement identiques pour un nouveau bâtiment ou pour un bâtiment existant, les résultats s'appliquent également à une nouvelle construction. Il est donc recommandé de choisir le coefficient de performance thermique le plus haut possible pour un RC, tant dans un bâtiment existant que dans un bâtiment neuf.

5.4 Aération douce

S'agissant du refroidissement en général et de l'aération douce en particulier, il existe de nombreuses possibilités d'augmenter l'efficacité énergétique de manière significative. Cela dépend entre autres des besoins saisonniers et journaliers d'aération douce des bâtiments ainsi que des conditions météorologiques en Suisse, voire dans d'autres pays de zones tempérées, soit pour l'Europe au nord de la ceinture des Alpes. Wellig et al. (2006) examine les possibilités techniques et conceptuelles à tous les niveaux, en mettant en évidence les divers potentiels d'efficacité énergétique qui deviennent considérables au moment où on les cumule. Les mesures étudiées concernent la thermodynamique (différence de température moindre, utilisation de l'énergie d'évaporation et de l'inertie thermique), la technique (composants de haute performance, périphérie incluse), le réglage (utilisation totale du froid provenant directement de l'air extérieur, y.c. circuits en parallèle de machines frigorifiques et de free cooling) et la planification (dimensionnements adéquats, intégration systématique de toutes les mesures citées). Ainsi, le rapport entre l'énergie thermique de refroidissement et l'électricité utilisée peut augmenter jusqu'à 20, ce qui représente un accroissement considérable comparativement à un rapport de 2 ou moins pour les installations de réfrigération ou les petits climatiseurs conventionnels.

Sans prétendre être exhaustif, on traitera ci-après de quelques types de mesures relatives aux considérations coûts/bénéfices.

5.4.1 Machines frigorifiques plus performantes

En règle générale, pour des températures et des aérorefrigérants donnés, les machines frigorifiques plus performantes entraînent des coûts d'investissement plus élevés. A titre d'exemple et avec une installation de 600 kW_{th}, on démontre ci-après que les surcoûts d'investissements peuvent être compensés par la réduction des coûts d'exploitation et des coûts énergétiques. Bien que les coûts d'investissement des deux variantes énergétiques étudiées soient supérieurs d'environ 15% ou 50% (par rapport à la machine frigorifique, sans postrefroidissement ni distribution ou dégagement de froid), les coûts annuels ne sont pas plus élevés grâce aux coefficients de performance annuels supérieurs (Tableau 83). La consommation d'électricité présumée des appareils auxiliaires tels que pompes à fluide frigorigène et aérorefroidisseurs est aussi incluse dans les coefficients de performance annuels. Pour le type d'efficacité énergétique 1, le COPA est de 15% supérieur à la référence et pour

le type 2, d'au moins 35%; ce type se caractérise par un très bon rapport de charges partielles. Comme il a en outre un compresseur à piston sec, les coûts annuels d'entretien sont aussi moindres: 2.5% de la somme d'investissements de la machine frigorifique, alors que ce taux est de 3.5% pour la référence et pour le type 1 (les coûts d'entretien de la distribution et du dégagement de froid ont toujours été estimés à 2.5%/a).

A l'aide de cet exemple et sur la base de la structure des coûts annuels, il est aussi manifeste que les coûts énergétiques et les coûts de capital de la machine frigorifique proprement dite ne représentent qu'une part infime des coûts annuels totaux du refroidissement du bâtiment. Le postrefroidissement et surtout la distribution et le dégagement de froid dans les pièces coûtent nettement plus cher. Une planification et une conception adéquates peuvent avoir des incidences beaucoup plus fortes sur les coûts annuels totaux que l'efficacité énergétique et les surcoûts d'investissements de la machine frigorifique.

| | Référence: MF avec compresseur à vis, évaporateur à expansion sèche) | Type 1: MF avec compresseur à vis, évaporateur noyé) | Type 2: quantum (compresseur à piston sec, évaporateur noyé) |
|--|--|---|---|
| Coefficient de performance annuel, appareils auxiliaires inclus | 4.3 | 5.0 | 6.9 |
| Production de froid (sans postrefroid.) CHF/kW _{th} | 175 | 200 | 257 |
| Product. de froid (avec postrefroid.*) CHF/m ² | 9.0 | 9.7 | 11.3 |
| Dégagement de froid (*) CHF/m ² | 50 | 50 | 50 |
| Total investiss. (avec dégag. de froid) CHF/m ² | 59 | 60 | 61 |
| Coûts de capital CHF/m ² a | 4.9 | 5.0 | 5.1 |
| Entretien CHF/m ² a | 1.6 | 1.6 | 1.5 |
| Energie CHF/m ² a | 0.5 | 0.5 | 0.3 |
| Total CHF/m ² a | 7.1 | 7.1 | 7.0 |

Tableau 83: Coûts annuels d'installations de réfrigération avec machines frigorifiques de différentes performances à l'exemple d'une capacité frigorifique de 600 kW_{th}. Hypothèses: puissance installée 35 W_{th}/m², heures de pleine charge 400 h/an, durée de vie 15 ans, intérêt réel 3% (Source Entreprise de froid 1, estimation CEPE, hypothèses et calculs CEPE)

5.4.2 Production de froid avec une différence de température moindre ou avec fluide frigorigène alternatif

Comme indiqué au sous-chapitre 5.4.1, la conception d'une différence de température moindre entre le dégagement de froid et le postrefroidissement permet de réduire les coûts d'investissements de la production de froid. Comme l'efficacité énergétique augmente dans le même temps, les coûts annuels sont également moindres (et les coûts marginaux négatifs), pour autant que le dégagement de froid ne génère pas de surcoûts à cause de la différence de température moindre et donc de la température de départ plus élevée. Tel est le cas pour la plupart des systèmes de dégagement de froid. Dans le cas d'une machine frigorifique de 200 kW_{th}, la réduction des coûts annuels est de 0.5 CHF/m²a, voir Tableau 84.

Le fait que les coûts annuels soient moindres ou non, si l'on prend en compte la frontière du système «Production, distribution et dégagement de froid», dépend fortement des surcoûts éventuels du dégagement de froid. Une température de départ plus élevée exige de plus grandes surfaces d'échangeur de chaleur, ce qui peut engendrer un surcoût. Comme le montre le Tableau 84, les coûts

d'investissements spécifiques au m² du dégagement de froid dans les locaux sont sensiblement plus élevés que ceux de la production de froid. Même des modifications relativement modestes des coûts de dégagement de froid ont un impact important sur les coûts annuels totaux de capital et partant, sur les coûts annuels totaux. Si une différence de température moindre ou une température de départ plus élevée pour le dégagement de froid n'entraîne pas de surcoût, la réduction des coûts annuels est de 0.5 CHF/m²a. Par exemple, un surcoût de 15% correspondrait à un surcoût légèrement supérieur à 1 CHF/m²a.

| | | MF 6°/12°, PR 40°/50° | MF 8°/14°, PR 40°/50° | | MF 13°/19°, PR 35°/45° | |
|---|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|------|---------------------------|------|
| COPA, pompes incluses | | 2.5 | 2.6 | | 3.6 | |
| Besoins en électricité | MJ _{él} /m ² a | 23 | 22 | | 16 | |
| Investissement production de froid | CHF/m ² _{surfsol} | 17.8 | 18.3 | | 16.5 | |
| Surcoûts dégag. de froid avec différ. temp. moindre | | référence | sans | avec | sans | avec |
| Investiss. dégag. de froid (estimation) | CHF/m ² _{surfsol} | 100 | 100 | 105 | 100 | 116 |
| Total investiss. (dégag. de froid inclus) | | 118 | 118 | 123 | 116 | 132 |
| Coûts de capital | CHF/m ² | 9.9 | 9.8 | 10.3 | 9.8 | 11.1 |
| Entretien (2.5% des coûts d'investiss.) | CHF/m ² | 2.9 | 3.0 | 3.1 | 2.9 | 3.3 |
| Energie | CHF/m ² | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 0.7 | 0.7 |
| Total | | 13.9 | 13.9 | 14.5 | 13.4 | 15.1 |

Tableau 84: Coûts annuels d'installations de réfrigération avec diverses différences de température à l'exemple d'une capacité frigorifique de 200 kW_{th} (Source Entreprise de froid 2, coûts selon Erreur ! Source du renvoi introuvable. 59, hypothèses et calculs CEPE), MF avec aéroréfrigérant sec, capacité frigorifique installée 35 W_{th}/m², heures de pleine charge 450 h/an, durée de vie 15 ans, intérêt réel 3%

Le fait que des variantes de plus haute efficacité énergétique génèrent ou non des coûts annuels moindres dépend aussi de l'échelle. Les surcoûts d'investissements relatifs en fonction de la taille de l'installation ne sont pas constants et les rapports de différentes variantes techniques peuvent se modifier selon la taille de l'installation. Par exemple, les installations utilisant l'ammoniaque comme réfrigérant avec une capacité frigorifique de 100 kW_{th} génèrent un surcoût (certes moindre). Pour une installation de 500 kW_{th}, les coûts annuels sont légèrement inférieurs à ceux de la référence, voire identiques à ceux de l'installation avec une différence de température moindre (voir Tableau 85). D'ailleurs les indications de ce nouveau fournisseur de données confirment le résultat obtenu plus haut, à savoir que les coûts annuels des installations avec une différence de température moindre (Tableau 85, Variante 1b) sont inférieurs à ceux des installations avec une grande différence de température (qui n'est souvent pas nécessaire).

| | Capacité frigorifique 100 kW _{th} | | | Capacité frigorifique 500 kW _{th} | | |
|--|--|---|---|--|---|---|
| | Variante 1a MF: 12°/18° PR: 40°/45° | Variante 1b MF: 15°/21° PR: 30°/36° | Variante 2 réfrigér. am- moniaque | Variante 1a MF: 12°/18° PR: 40°/45° | Variante 1b MF: 15°/21° PR: 30°/36° | Variante 2 réfrigér. am- moniaque |
| Coefficient de performance annuel | 2.5 | 3.7 | 4.8 | 3.0 | 3.9 | 5.3 |
| Besoins en électricité MJ _é /m ² a | 36 | 25 | 19 | 30 | 23 | 17 |
| Invest. product. de froid CHF/m ² _{surfsol} | 9.3 | 9.1 | 18.6 | 6.2 | 6.0 | 9.1 |
| Total (dégag. froid incl.) CHF/m ² _{surfsol} | 69 | 69 | 79 | 66 | 66 | 69 |
| Coûts de capital CHF/m ² a | 5.8 | 5.8 | 6.6 | 5.5 | 5.5 | 5.8 |
| Entretien CHF/m ² a | 1.7 | 1.7 | 2.1 | 1.7 | 1.7 | 1.8 |
| Energie CHF/m ² a | 1.7 | 1.2 | 0.9 | 1.4 | 1.1 | 0.8 |
| Total CHF/m ² a | 9.2 | 8.7 | 9.5 | 8.6 | 8.3 | 8.3 |

Tableau 85: Coûts annuels des installations de réfrigération avec diverses différences de température et divers réfrigérants à l'exemple de capacités frigorifiques de 100 kW_{th} et 500 kW_{th} (Source Entreprise de froid 3, hypothèses et calculs CEPE), capacité frigorifique installée 50 W_{th}/m², heures de pleine charge 500 h/ans, durée de vie 15 ans, intérêt réel 3%

Les aéroréfrigérants hybrides exigent des coefficients de performance annuels moindres, car la différence de température entre la machine frigorifique et le postrefroidissement diminue à cause de l'utilisation de l'évaporation d'eau (voir également Wellig et al., 2006). Compte tenu du type de construction et de la préparation d'eau nécessaire, les aéroréfrigérants génèrent des coûts d'investissements plus élevés. Par ailleurs, leur fonctionnement engendre des frais pour la consommation d'eau. Théoriquement et conformément à la physique, il faut au minimum 1.5 litre d'eau par kWh de chaleur refroidie. Mais en réalité, il faut souvent jusqu'à 5 litres/kWh, voire davantage, selon le réglage. Suivant la structure tarifaire, l'eau utilisée coûte entre 1 et 3 CHF/m³ pour la préparation d'eau potable et encore une fois autant pour le traitement des eaux usées (bien que les aéroréfrigérants ne produisent pas d'eaux usées, certaines tarifications exigent malgré tout le paiement de ce montant).

D'après l'exemple, les calculs de rentabilité montrent qu'un aéroréfrigérant hybride est plus rentable qu'une installation avec aéroréfrigérant sec, si les surcoûts peuvent être compensés sur un nombre relativement élevé d'heures de pleine charge, si la consommation d'eau de l'installation est adaptée aux besoins (par ex. pendant 40% du temps, sinon postrefroidissement normal à sec) et si le prix de l'eau n'excède de beaucoup 3 CHF/m³ (Tableau 86). Cependant, par rapport à des températures de postrefroidissement encore très souvent constantes ou relativement élevées, les aéroréfrigérants hybrides sont encore rentables avec moins d'heures de pleine charge et avec un prix de l'eau plus élevé. S'agissant des aéroréfrigérants hybrides, il faudrait surtout utiliser le grand potentiel de free cooling, qui nécessite l'enclenchement de la machine frigorifique seulement aux rares heures de charge maximale (ce qui réduit encore les frais d'électricité).

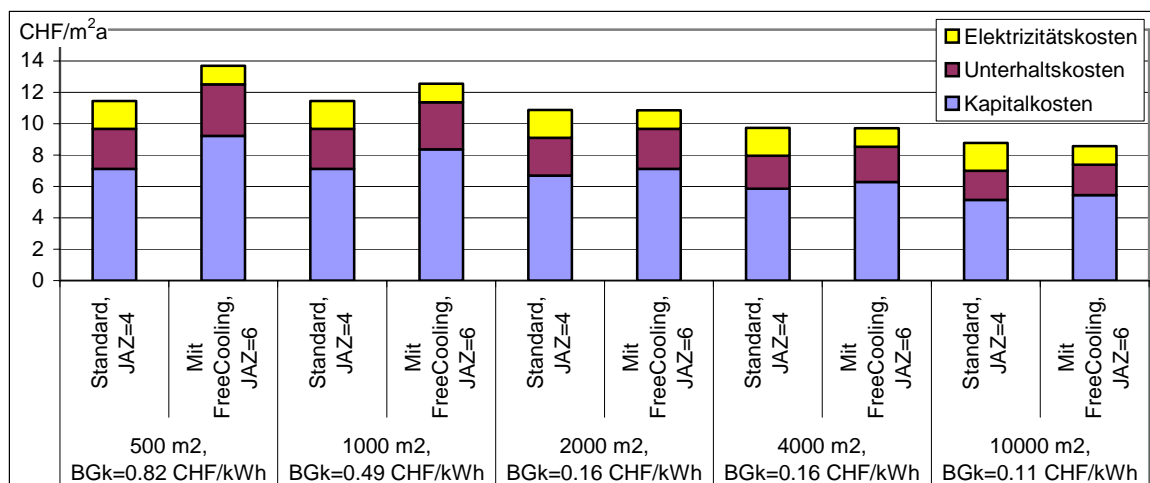
| Type d'aéroréfrigérant | | AR sec 45°, const. | AR sec 45°, variable | AR sec 36°, variable | Hybride 36°, variable | AR sec 36°, variable | Hybride 36°, variable |
|--|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | | FKW | FKW | FKW | FKW | Ammonia- que | Ammonia- que |
| Temp. de départ dégagement de froid | | standard | standard | élevée (18°) | élevée (18°) | élevée (18°) | élevée (18°) |
| Coeff. de perf. annuel, pompes incl. | | 3.3 (*) | 4.0 | 4.8 | 5.6 | 5.7 (*) | 8.5 |
| Besoins en électricité | MJ _{el} /m ² a | 98 | 81 | 68 | 58 | 57 | 38 |
| Investissement total | CHF/m ² _{surfsol} | 12 (*) | 12 | 11 | 13 | 13 (*) | 15 |
| Coûts de capital | CHF/m ² a | 2.4 | 2.4 | 2.3 | 2.6 | 2.7 | 3.1 |
| Entretien | CHF/m ² a | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.9 |
| Eau AR (3 CHF/m ³) | CHF/m ² a | - | - | - | 0.4 | - | 0.3 |
| Energie | CHF/m ² a | 4.6 | 3.8 | 3.2 | 2.7 | 2.7 | 1.8 |
| Total | CHF/m ² a | 7.8 | 7.0 | 6.2 | 6.4 | 6.2 | 6.2 |
| (*) Estimation CEPE | | | | | | | |

Tableau 86: Coûts annuels d'installations de réfrigération avec diverses différences de température, différents fluides frigorigènes et types d'aéroréfrigérants à l'exemple d'une capacité frigorifique de 600 kW_{th} (Source Entreprise de froid 4, hypothèses et calculs CEPE), capacité frigorifique installée 50 W_{th}/m², heures de pleine charge 1800 h/an, durée de vie 15 ans, intérêt réel 3%

5.4.3 Postrefroidissement avec free cooling

Comme l'ont démontré les résultats de simulation, les besoins de refroidissement peuvent déjà exister au semestre d'hiver et à des périodes avec des températures extérieures relativement basses entre saisons. Dans ces conditions, la chaleur à extraire du bâtiment peut être remise dans l'environnement directement par un aéroréfrigérant (ou une sonde terrestre), sans devoir encore enclencher la machine frigorifique. Une forme mixte des deux modes de fonctionnement est aussi possible pendant un grand nombre de jours. Le nombre d'heures ou de jours peut encore être augmenté par les stratégies de réglage adéquates qui utilisent l'inertie thermique (la température ambiante doit alors pouvoir osciller entre certaines limites, par ex. entre 23° et 26°).

Ci-après, nous tablons sur des besoins de refroidissement thermique de 150 MJ_{th}/m²a, ce qui est considéré comme moyen à haut. Pour l'installation standard sans free cooling, on a choisi un COPA de 4 et pour l'installation avec postrefroidissement par le biais du free cooling, un COPA moyen de 6 (soit 50% de fonctionnement free cooling et un COPA de 3.0 en dehors du fonctionnement de free cooling). En utilisant les indices spécifiques des coûts d'investissements selon le Graphique 48 (p. 52), on peut déterminer les coûts annuels des deux variantes. A partir d'une installation de 100 kW_{th} (ce qui, avec 50 W_{th}/m², correspond en général à une surface refroidie de 2000 m²), la Variante free cooling, en fonction des hypothèses décrites dans le texte du Graphique 73, doit être considérée comme rentable (les hypothèses émises sont assez conservatrices: une performance relativement élevée déjà pour l'installation standard, une augmentation relativement modeste du coefficient de performance annuel dans le cas du free cooling). Une installation plus petite provoquerait un surcoût de 1 à 2 CHF/m²a, tandis que pour les grandes installations (par ex. 500 kW_{th}), le surcoût serait encore amortissable même avec un prix du courant de 11 ct./kWh.



Graphique 73 Coûts annuels (prix de l'électricité 17 ct./kWh) et coûts marginaux d'installations de réfrigération avec free cooling (25 MJ_{el}/m²a) en comparaison d'installations standards sans free cooling (38 MJ_{el}/m²a) pour différentes grandeurs de bâtiments (50 W_{th}/m², intérêt réel 3%, coûts d'investissements selon Graphique 48: valeur moyenne pour bâtiments neufs, K1 et K2, coûts annuels d'entretien = 3% des coûts d'investissement)

D'autres graphiques en annexe mettent en évidence la sensibilité des coûts annuels et des coûts marginaux en fonction des hypothèses modifiées relatives au taux d'intérêt réel, aux besoins d'énergie thermique de refroidissement et au COPA. Moyennant un taux d'intérêt réel plus élevé, (5% au lieu de 3%), l'image ne change guère; avec un prix du courant à peine supérieur (18 ct./kWh au lieu de 16 ct./kWh), les mêmes cas seraient rentables (voir Graphique 137, p. 52). Par contre, avec des besoins d'énergie thermique de refroidissement moindres, de 100 au lieu de 150 MJ_{th}/m²a, la rentabilité est moins bonne et les coûts marginaux bruts des installations de moyenne grandeur montent à 25 ct./kWh (Graphique 137), c'est-à-dire que le prix du courant devrait monter à ce niveau pour que la rentabilité soit garantie). En supposant une plus forte augmentation du coefficient de performance annuel avec la Variante free cooling (de 4.0 à 8.0 au lieu de 4.0 à 6.0), on obtient à nouveau une meilleure rentabilité (Graphique 137); les coûts marginaux bruts et donc le niveau requis de prix du courant baissent à 11 ct./kWh pour les installations moyennes et à 8 ct./kWh pour les grandes installations.

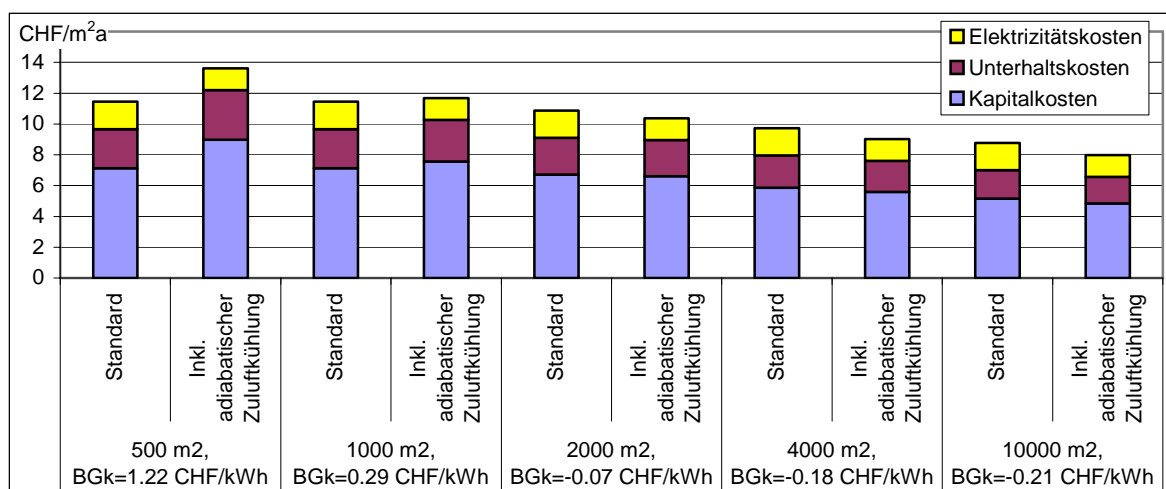
5.4.4 Refroidissement adiabatique de l'air acheminé dans le bâtiment

Outre la machine frigorifique, il existe également le refroidissement adiabatique de l'air acheminé dans le bâtiment. Grâce à l'évaporation de l'eau dans le canal de l'air évacué et à l'échangeur de chaleur, l'air frais est refroidi d'environ 6 K. Cela réduit de manière significative la consommation d'électricité pour le refroidissement de l'air frais, voire y supplée (selon les besoins de confort et la configuration du bâtiment). S'agissant des retombées sur les autres coûts, il faut distinguer deux cas:

- Cas 1: combinaison refroidissement de l'air frais et éléments réfrigérants (plafond réfrigérant, fan coils). Dans les cas où une machine frigorifique s'impose de toute façon pour les éventuels plafonds réfrigérants ou fan coils, la machine frigorifique peut être conçue avec une puissance plus faible (dans le meilleur des cas jusqu'à -20 W/m², hypothèse émise ci-après environ 7 W/m²).
- Cas 2: uniquement refroidissement de l'air frais: dans les bâtiments où un refroidissement modéré de l'air frais suffit à garantir le confort thermique, on peut éventuellement renoncer à l'installation d'une machine frigorifique.

Dans le cas 1, les surcoûts d'investissements d'un refroidissement adiabatique (selon Graphique 49) pour les petits bâtiments (environ 1200 m² de surface refroidie ou moins) ne sont pas amortissables. Pour les bâtiments moyens ou grands, les économies de coûts, compte tenu de la réduction de la demande d'électricité, mais surtout de la puissance installée moindre (-15%, soit -7 W/m²), sont

sensiblement plus importantes que les surcoûts d'investissements pour le refroidissement adiabatique (voir Graphique 74).

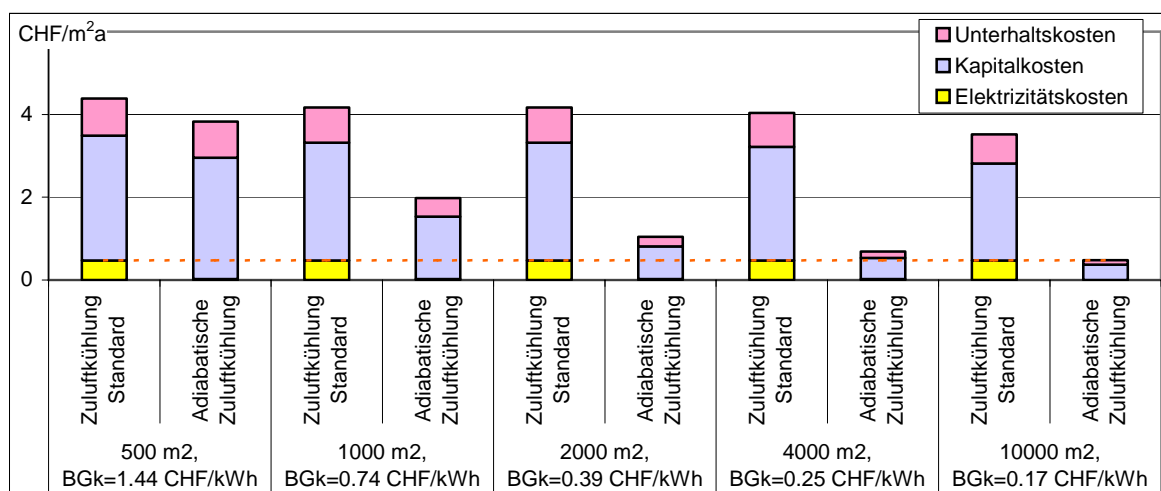


Graphique 74 Refroidissement adiabatique, cas 1: coûts annuels (prix de l'électricité 17 ct./kWh) et coûts marginaux d'installations de réfrigération avec refroidissement adiabatique de l'air frais (30 MJ_{el}/m²a) en comparaison des installations standards (refroidissement de l'air frais avec machine frigorifique, 38 MJ_{el}/m²a) pour bâtiments de différentes grandeurs (50 ou 43 W_{th}/m², consommation d'air 4 (m³/h)/m², taux d'intérêt réel 3%, coûts d'investissements selon Graphique 48(K1) ou Graphique 49: valeur moyenne pour bâtiments neufs, coûts annuels d'entretien en tant que part des coûts d'investissements: 3% pour machine frigorifique, 2.5% pour refroidissement adiabatique)

On observe en l'occurrence de forts effets d'échelle dus aux forts effets d'échelle des coûts d'investissements du refroidissement adiabatique (Graphique 49). A partir d'un bâtiment de 2000 m², les surcoûts du refroidissement adiabatique sont déjà compensés au niveau des coûts d'investissements à cause de la réduction des coûts pour la machine frigorifique. Par conséquent, les coûts marginaux de l'efficacité électrique sont négatifs. Pour ces bâtiments, le refroidissement adiabatique de l'air frais peut être considéré comme rentable, voire très rentable.

Cas 2: Les effets d'échelle sont encore plus sensibles si l'on ne prend en compte que le refroidissement adiabatique (cas 2, sans éléments réfrigérants tels que plafonds réfrigérants ou fan coils). Si l'on ne peut pas remplacer la machine frigorifique, aéroréfrigérant inclus, pour le refroidissement de l'air frais, il faut alors comparer les coûts annuels totaux du refroidissement adiabatique avec les coûts énergétiques du refroidissement conventionnel (Graphique 75, ligne en pointillés). En revanche, pour les grands et très grands bâtiments, les coûts annuels totaux du refroidissement adiabatique de l'air frais sont comparables aux coûts énergétiques du refroidissement conventionnel et le refroidissement adiabatique devient rentable même par rapport aux dépenses courantes pour l'énergie du refroidissement conventionnel (pour une surface ventilée de 10'000 m²).

Si l'on peut installer un refroidissement adiabatique de l'air frais en remplacement d'un refroidissement conventionnel de l'air frais, il est possible de réaliser des économies de coûts annuels même pour les plus petits bâtiments précités. Les coûts de capital et d'entretien du refroidissement adiabatique pour cette grandeur de bâtiment (500 m²) sont comparables à ceux du refroidissement conventionnel de l'air frais (3 CHF/m²a); une économie d'environ 0.5 CHF/m²a est toutefois possible pour les coûts énergétiques. Plus la surface du bâtiment à ventiler est grande, plus la réduction des coûts nets est importante (Graphique 75).



Graphique 75 Refroidissement adiabatique, cas 1: coûts annuels (prix de l'électricité 17 ct./kWh) et coûts marginaux d'installations de réfrigération avec refroidissement adiabatique de l'air frais (< 1 MJ_{el}/m²a) en comparaison d'installations standards (refroidissement de l'air frais avec machine frigorifique, 10 MJ_{el}/m²a, 20 W_{th}/m²) pour différentes grandeurs de bâtiments (consommation d'air 4 (m³/h)/m², taux d'intérêt réel 3%, coûts d'investissement selon Graphique 48 (K1) ou Graphique 49: valeur moyenne pour bâtiments neufs, coûts annuels d'entretien en tant que part des coûts d'investissement: 3% pour machine frigorifique, 2.5% pour refroidissement adiabatique)

5.4.5 Dégagement de froid

L'efficacité énergétique et les coûts annuels du refroidissement du bâtiment sont influencés par le mode et la conception du dégagement de froid dans les pièces.

- L'efficacité énergétique dépend essentiellement du niveau de température du dégagement de froid (ou plus précisément: de la différence par rapport à la température de postrefroidissement⁹). Généralement, on peut avoir une température de départ plus élevée avec les éléments de construction thermoactifs ou les plafonds réfrigérants qu'avec le refroidissement (traditionnel) de l'air pulsé, mais il existe également des refroidissements de l'air pulsé avec une température de départ tout aussi élevée.
- Les coûts annuels sont influencés par l'efficacité énergétique (coûts énergétiques), mais bien plus encore par le type de système de dégagement de froid et par des critères d'architecture intérieure. Le choix du système de dégagement de froid et son exécution dépendent grandement des besoins de confort (rayonnement agréablement frais des surfaces, température et vitesse de l'air). C'est pourquoi les variations de coûts d'un seul et même type de dégagement de froid sont considérables, bien que les facteurs d'influence indiqués aient dans la plupart des cas un plus grand impact sur les coûts que les facteurs qui influent sur la température de départ et donc sur l'efficacité énergétique. Pour un plafond réfrigérant avec une température de départ de 18°C au lieu de 16°C, une entreprise interrogée indique par ex. une différence de prix de 50 CHF/m²_{surface de sol} (250 au lieu de 200 CHF/m²_{surface de sol}), alors qu'une autre ne fait pas de différence de prix.

Si l'on compare les coûts annuels correspondants (voir Tableau 87) ou les différences des coûts annuels avec les différences potentielles des coûts énergétiques sur la base de coefficients de performance annuels plus élevés (voir par ex. Tableau 84, Tableau 85 ou Graphique 74, il est évident

⁹ Le COP théorique s'obtient en divisant la température ambiante par la différence de température entre la production de froid et le postrefroidissement; en l'occurrence, la température de la production de froid est quelques K en dessous de la température de dégagement de froid dans les pièces. Exemples de COP (9°/40°)=10, COP (16°/40°)=13, COP (9°/35°)=12, COP (16°/35°)=16

que, s'agissant du dégagement de froid, une meilleure efficacité énergétique ne provoque pas de grandes différences de coûts d'investissement. Il convient encore de relever que, pour une partie des systèmes, le dégagement de chaleur est aussi intégré dans le chauffage ou qu'il est possible de renoncer à une machine frigorifique dans certaines conditions (par ex. en utilisant des sondes terrestres également pour le refroidissement, voir par ex. Dott, Afjei et al., 2006) et qu'il faut alors considérer l'ensemble des coûts. Dans ce dernier cas, les coûts de capital correspondants sont supprimés (voir également Tableau 84, Tableau 85 ou Graphique 74, ce qui donne une plus grande marge de manœuvre concernant le dégagement de froid (et de chaleur).

Pour compléter, il faut signaler que les faibles différences de température (entre la température de départ et la température ambiante) contribuent également à un coefficient de performance élevé des pompes à chaleur (pour autant qu'on recoure à une telle pompe pour la production de chaleur).

| Descriptif | Durée de vie économique années | Coûts annuels (val. de référence approx.) CHF/m ² _{surfsol} |
|---|--------------------------------|---|
| Refroidissement de l'air pulsé (froid amené par réseau d'eau froide) | 20 | 3 à 5 |
| Tuyaux en matière synthétique fixés au plafond en béton et crépis | 30 | 10 à 25 |
| Tuyaux en matière synthétique encastrés dans le plafond en béton | 40 | 3 sans élém. acoustiques, > 6 élém. acoustiques inclus |
| Plafonds métalliques abaissés avec tuyaux métalliques encastrés, éventuellement combinés avec fonction d'air évacué et d'air frais. | 30 | 10 à 25 |
| Eléments de plafond réfrigérant autonomes | 30 | 6 |

Tableau 87 Coûts de capital spécifiques de différents systèmes de dégagement de froid (coûts par rapport aux locaux sans distribution interne au bâtiment)

5.4.6 Planification intégrale et conception

La combinaison et la coordination des différentes mesures d'efficacité énergétique décrites ci-dessus dans une planification intégrée offrent des possibilités de synergie. Ainsi par ex. la puissance installée peut être réduite d'un facteur supérieur à 2 avec la même consommation d'énergie thermique de refroidissement. Dans l'exemple documenté par Wellig et al. (2006), malgré l'augmentation sensible des coûts d'investissement spécifiques par kW (1500 au lieu de 500 CHF/kW), les coûts d'investissement par SRE n'augmentent que modérément (55 au lieu de 37 CHF/m²). Compte tenu de la consommation très modeste d'électricité, ces coûts peuvent être compensés en 4.5 ans (sans paiement d'intérêts), selon Wellig et al. (2006). Même avec la prise en compte du paiement d'intérêts, qui prolongerait quelque peu le délai d'amortissement, cela est considéré comme très rentable.

Une planification intégrée prenant en compte la thermodynamique, l'utilisation du «froid provenant directement de l'air extérieur» et de la masse de stockage thermique, le recours aux éléments d'efficacité énergétique à tous les niveaux (c'est-à-dire aussi les pompes correspondantes), mais également une exécution fidèle à la planification, une soigneuse mise en service et un monitoring de fonctionnement permanent constituent la condition préalable à ces installations de haute performance.

5.5 Eclairage

S'agissant des considérations coûts/bénéfices des variantes d'éclairage ou des mesures prises dans le secteur des bureaux et des écoles, il convient de distinguer entre deux types de mesures:

- les mesures visant à réduire la puissance électrique installée en tant que telle
- les mesures visant à réduire l'utilisation de la puissance électrique installée par le biais d'un réglage, c'est-à-dire en diminuant le nombre d'heures de pleine charge.

Les considérations sur la rentabilité du premier type sont simples: la différence des coûts de capital et d'entretien est mise en parallèle avec la différence des coûts énergétiques, qui se calculent facilement en fonction d'un temps d'utilisation annuel donné.

S'agissant du second type de mesures, affectant les réglages de lumière, la **réduction atteignable des heures de fonctionnement ou de pleine charge** est l'un des facteurs clés pour évaluer la rentabilité (à part les coûts proprement dits des mesures et les hypothèses sur la durée de vie, les intérêts et le prix du courant), raison pour laquelle elle est traitée en priorité dans le sous-chapitre suivant avant les calculs de rentabilité proprement dits.

5.5.1 Effets des réglages de lumière pour les éclairages avec tubes fluorescents

La réduction atteignable des heures de fonctionnement ou de pleine charge grâce aux réglages de lumière est la différence entre la situation initiale sans réglage et la situation avec réglage. Dans le second cas, les heures de fonctionnement ou de pleine charge – à supposer que la mesure soit acceptée – dépendent essentiellement du local (profondeur du local, rapport entre la surface vitrée et la surface de sol), du type et du régime d'utilisation de la protection solaire, de la qualité de la technique utilisée ainsi que du réglage (pour une utilisation donnée, donc surtout de paramètres techniques¹⁰). Ceci, contrairement à la situation initiale sans réglage, où c'est notamment le comportement de l'utilisateur qui est déterminant. La situation de référence est donc prépondérante pour l'évaluation de la rentabilité des réglages de lumière. On peut se demander sur combien d'heures de pleine charge il faut tabler dans le cas de la commande manuelle de la lumière (dans les grands immeubles de bureaux, la commande manuelle par les utilisateurs est partiellement combinée avec un arrêt programmé le soir, par ex. à 22 heures au plus tard). S'agissant du comportement de l'utilisateur dans les bâtiments de bureaux, on a fait les constatations suivantes (Source: www.energie.ethz.ch).

- L'éclairage est enclenché pendant 60% des heures normales de bureau.
- La plupart des utilisateurs allument immédiatement la lumière en arrivant à leur place de travail (en général, c'est le service de nettoyage qui l'éteint, mais seulement le soir)
- Il n'y a aucun lien entre la quantité de lumière naturelle et l'enclenchement de la lumière artificielle.
- Si l'enclenchement de l'éclairage des bureaux peut se faire pour deux parties distinctes (fenêtres, zone intérieure), les heures d'enclenchement sont quasiment identiques pour les deux parties.

Il s'agit ici d'indications très approximatives et entachées d'une très grande incertitude. En réalité, **il manque en Suisse des données fiables sur l'utilisation de l'éclairage dans les divers types de bâtiments commerciaux**. Ceci concerne en particulier les éclairages sans réglage, commandés manuellement. Les anciens bâtiments ont pratiquement tous ce type d'éclairage. Pour les éclairages avec réglage, on peut se baser sur les résultats de simulations.

¹⁰ Exception: si la protection solaire est commandée manuellement, les heures de fonctionnement ou de pleine charge dépendent aussi fortement des utilisateurs en ce qui concerne le réglage de lumière

Pour les différentes utilisations et différents réglages, il existe des estimations spécifiques des heures de fonctionnement, voir Tableau 88 (Source: St. Gasser, SAFE, modèle de calcul Energybox „Lichttool“, projet, état 16.6.05); mais les cas sans réglage sont entachés d'une grande incertitude. Pour la modulation liée à la présence de personnes, on a prévu une réduction forfaitaire de 20%. S'agissant de la modulation combinée, liée à la présence de personnes et à la lumière du jour, la réduction est de 37% (verre par rapport à surface de sol 20%) ou d'environ 56% (verre par rapport à surface de sol 30%). La valeur absolue de la réduction atteignable en tant que diminution des heures de pleine charge est plus faible pour les écoles que pour les bureaux, surtout du fait que les écoles ont déjà un plus petit nombre d'heures de fonctionnement dans la situation initiale. Au lieu de 710 heures de réduction comme pour les bureaux, la réduction atteignable, avec une modulation liée à la présence de personnes et à la lumière du jour, est «seulement» de 520 heures, soit en tout cas 25% de moins. En conséquence, les surcoûts de capital et de maintenance/entretien pour les écoles devraient être inférieurs de 25% pour atteindre la même rentabilité que pour les bureaux.

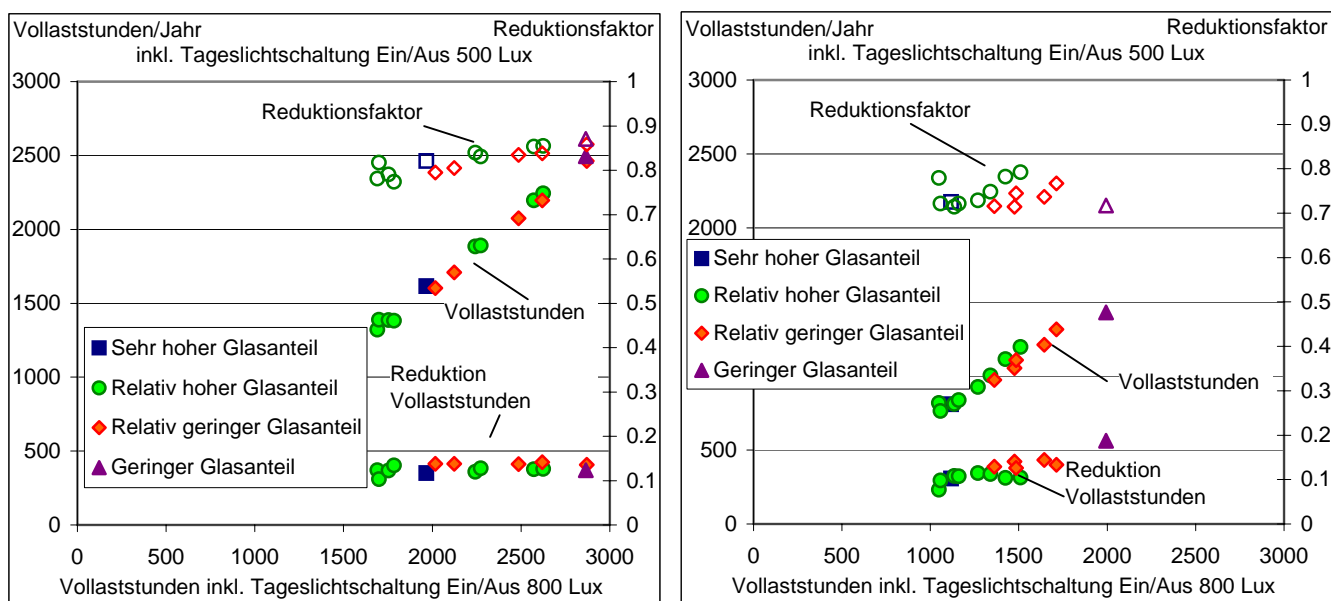
| Utilisation Réglage de lumière | Bureaux | | | Ecoles | | |
|-----------------------------------|----------|-------------|--------------------------|----------|-------------|--------------------------|
| | sans | présence | présence et lumière jour | sans | présence | présence et lumière jour |
| Verre / surface de sol 20% | 1900 | 1520 (-380) | 1190 (-710) | 1380 | 1100 (-280) | 860 (-520) |
| Verre / surface de sol 30% | 1420 (*) | 1140 (-280) | 620 (-800) | 1040 (*) | 830 (-210) | 460 (-580) |

Tableau 88 Heures de fonctionnement pour différents réglages de lumière et réduction des heures de fonctionnement par rapport à la situation sans modulation (entre parenthèses) pour bureaux et les écoles, degré de réflexion «normal», valeurs arrondies (Source: St. Gasser, modèle de calcul Energybox „Lichttool“, projet, état 16.6.05) (*) Remarque: même avec un rapport verre / surface de sol de 30%, le nombre des heures de fonctionnement annuel dans la situation sans réglage pourrait s'élever à 1900 h (bureaux) ou à environ 1400 h (écoles), selon le comportement des utilisateurs

Pour comparaison, la Graphique 76 représente les heures de pleine charge d'éclairages bien réglés à l'exemple d'une grande pièce orientée vers le sud et d'une petite pièce orientée vers l'ouest, cela selon deux critères différents d'enclenchement/déclenchement. Le critère d'enclenchement/déclenchement de 500 lux (sur la place de travail à une hauteur de 0.8 m) satisfait aux exigences de la technique d'éclairage. Avec un critère d'enclenchement/déclenchement de 800 lux, on a essayé d'approcher une commande manuelle de l'éclairage (on peut notamment supposer que l'éclairage, avec la commande manuelle, sera déclenché plus tard, c'est-à-dire quand l'éclairage de la lumière du jour sera plus puissant; en réalité, il faut tabler sur un comportement de l'utilisateur assimilable à l'hystérésis).

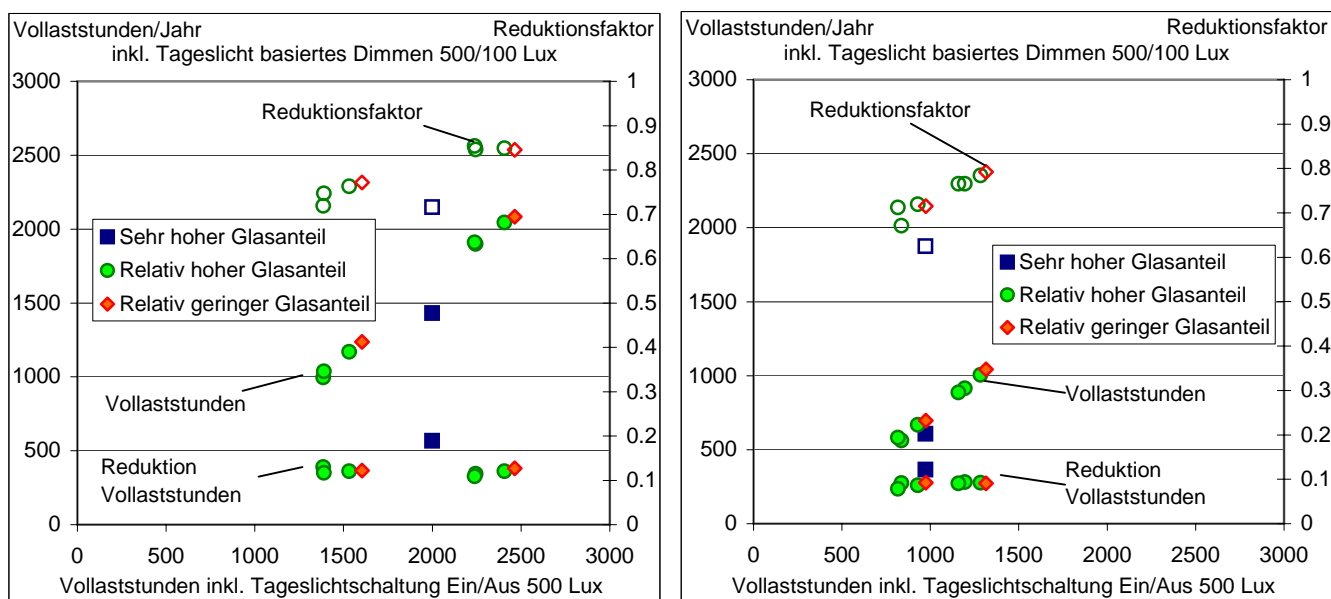
Les heures de pleine charge varient énormément en fonction de la part de vitrages, de la qualité et de l'utilisation de la protection solaire, ainsi que du degré de transmission de lumière (attention: parallèlement à diverses parts de vitrages, on a peut-être une combinaison de différentes qualités de fenêtres et de protections solaires, c'est-à-dire qu'une comparaison «toute chose étant égale par ailleurs» est impossible entre les diverses parts de vitrages). Fait intéressant, la réduction avec un réglage adéquat de la lumière (enclenchement/déclenchement vers 500 lux) – par rapport à un réglage avec un seuil plus élevé – est relativement constante, en particulier dans la grande pièce orientée vers le sud. La réduction absolue oscille entre 300 et un peu plus de 400 heures par année (grande pièce plein sud) ou entre au moins 200 et plus de 500 heures par an (petite pièce ouest). Quant à la réduction relative, elle varie entre 15% et 25% (grande pièce plein sud) ou entre 20% et 30% (petite pièce ouest). Par contre, le minimum atteignable d'heures de pleine charge avec réglage de l'éclairage varie de manière significative: pour la grande pièce plein sud, il est d'au moins 1600 h/an (motif: protection solaire renforcée), alors qu'il est d'environ 1000 h/an pour la petite pièce ouest.

En annexe, des graphiques analogues au Graphique 76 documentent d'autres pièces (Graphiques 138 à 140). Pour la grande pièce ouest (Graphique 138), les chiffres sont identiques à ceux de la grande pièce plein sud, tandis que pour la petite pièce plein sud (Graphique 139), ils se situent entre la grande pièce plein sud et la petite pièce ouest. Les pièces d'angle (pour lesquelles on suppose des vitrages vers les deux orientations) sont un peu plus spéciales: les heures de pleine charge sont relativement moindres, tant pour le critère d'enclenchement/déclenchement de 800 lux que pour celui de 500 lux. Même pour de telles pièces, il est aussi possible de réduire les heures de pleine charge de 150 à 400 heures/an.



Graphique 76 Heures de pleine charge d'éclairages avec réglage (enclenchement/déclenchement) pour une grande pièce plein sud (graphique de gauche) et une petite pièce orientée vers l'ouest (graphique de droite). Géométrie grande pièce: profondeur de pièce 7 m, place de travail 5m; géométrie petite pièce: profondeur de pièce: 4 m, place de travail: parts de vitrages (surface verre/surface façades): forte part de vitrages: 0.68, part de vitrages relativement élevée: 0.38, part de vitrages relativement faible: 0.26, part de vitrages moindre: 0.18

Pour neuf des quinze cas représentés dans le Graphique 76, on a simulé, après le réglage enclenchement/déclenchement, l'effet d'une variation d'éclairage. L'intensité lumineuse de l'éclairage avoisine les 100% entre 0 et 100 lux de lumière du jour, puis diminue continuellement jusqu'à 500 lux de lumière du jour. Les résultats correspondants pour une grande pièce plein sud (graphique de gauche) et pour une petite pièce ouest se trouvent dans le Graphique 77, alors que les résultats pour les autres pièces sont dans l'annexe (Graphiques 141 à 143).



Graphique 77 Heures de pleine charge pour éclairages réglés (variation entre 100 et 500 lux) pour une grande pièce plein sud (graphique de gauche) et une petite pièce ouest (graphique de droite). Géométrie selon Graphique 76

Par rapport à un réglage enclenchement/déclenchement basé sur la lumière du jour, un variateur d'éclairage permet encore de réduire considérablement les heures de pleine charge. A l'exception des pièces d'angle, on peut atteindre une réduction de 250 à 500 heures/an (avec une très forte part de vitrages, même de 600 heures/an). En général, les réductions relatives oscillent entre 20% et au moins 30%, dans certains cas également moins ou plus. Les réductions mentionnées concernent l'intensité lumineuse de l'éclairage et non pas la consommation d'électricité. La réduction atteignable de la consommation d'électricité est moindre, car la puissance électrique absorbée, notamment dans la plage de puissance inférieure, n'évolue pas linéairement par rapport à l'intensité lumineuse. La réduction des heures de pleine charge «électrique» est à peu près entre un tiers et la moitié inférieure (il s'agit d'une estimation, car le rapport entre l'intensité lumineuse et la consommation d'électricité n'a pas pu être prise en compte dans la simulation pour des raisons techniques).

Comparativement à l'estimation sur la commande manuelle de l'éclairage, c'est-à-dire au réglage enclenchement/déclenchement de 800 lux, les heures de pleine charge de l'éclairage reculent de 30% à 50%. Selon la situation initiale, cela représente bien 600 à environ 1400 heures de pleine charge/an. L'utilisation combinée de détecteurs de présence permet une nouvelle réduction. Selon une première approximation, on estime que les effets de détecteurs de présence et de réglages liés à la lumière du jour se superposent. L'impact des détecteurs de présence est d'autant plus grand qu'ils sont conçus spécialement en fonction de la place de travail. L'expérience tend à montrer que l'impact est le plus faible avec les éclairages au plafond dans les bureaux collectifs, moyen avec les éclairages au plafond dans les petits bureaux et maximum avec des lampes sur pied spécialement conçues pour la place de travail.

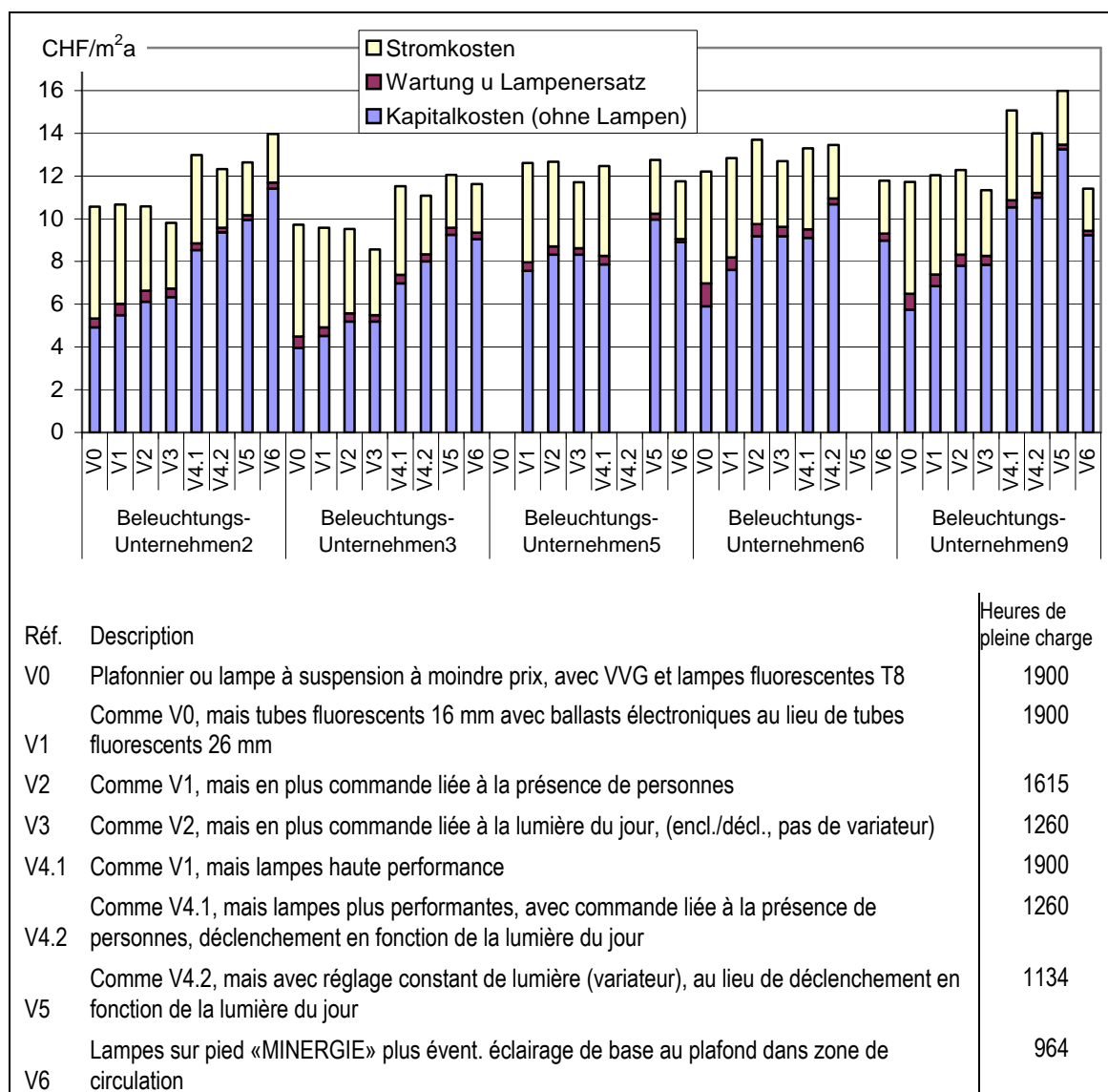
Il convient de relever ici que les réductions indiquées représentent des valeurs «ceteris paribus». L'effet peut être modifié suite à des mesures supplémentaires. Par ex. si l'on utilise dans le même temps des vitrages avec un coefficient de transmission moindre (remplacement des fenêtres, verres antisolaires au lieu de verres thermo-isolants, triple vitrage au lieu de double vitrage), l'effet peut être sensiblement réduit (voir Chap. 3.4 et Chap.6).

5.5.2 Considérations de rentabilité pour les éclairages avec tubes fluorescents

Le Graphique 78 représente les coûts annuels avec leur structure calculés sur la base des indications fournies par les entreprises. Les mesures prises en compte sont décrites dans la légende du graphique. Le renouvellement des lampes n'a pas fait l'objet d'un examen plus approfondi. En effet, on suppose qu'une part importante des lampes T12 (ou T38) a déjà été remplacée par des lampes T8, puisqu'il s'agit là d'une mesure superficielle n'exigeant aucun travail dans l'électricité. On peut notamment utiliser les mêmes ballasts électroniques.

La plus grande part des coûts concerne les lampes, la deuxième par ordre d'importance le courant, alors que la maintenance et le remplacement des lampes représentent une infime part des coûts (grâce aux lampes relativement bon marché et à leur longue durée de vie). On peut faire les constatations suivantes:

- S'agissant de l'interprétation: selon les dires des entreprises, les lampes soi-disant «bon marché» (V0) des entreprises 2 et 3 ne conviennent pas aux écrans des places de travail. S'il faut éviter de les utiliser dans les bureaux ou les écoles, on peut très bien les employer ailleurs (par ex. dans les zones de circulation).
- Les réglages de lumière ne provoquent pas ou peu de surcoûts. Quant aux surcoûts d'investissements affectant les lampes ou le montage, ils sont plus ou moins compensés par la réduction des coûts de courant.
- Un réglage plus poussé (lié à la présence de personnes et à la lumière du jour, en tant que réglage enclenchement/déclenchement ou réglage permanent) est un peu moins onéreux qu'un simple réglage lié à la présence de personnes. Les différences sont toutefois relativement faibles.
- Avec la variante des lampes sur pied, certaines entreprises enregistrent des coûts annuels moindres et d'autres des coûts supérieurs par rapport à un éclairage au plafond avec une fonctionnalité comparable (détecteurs de présence, réglage lié à la lumière du jour).



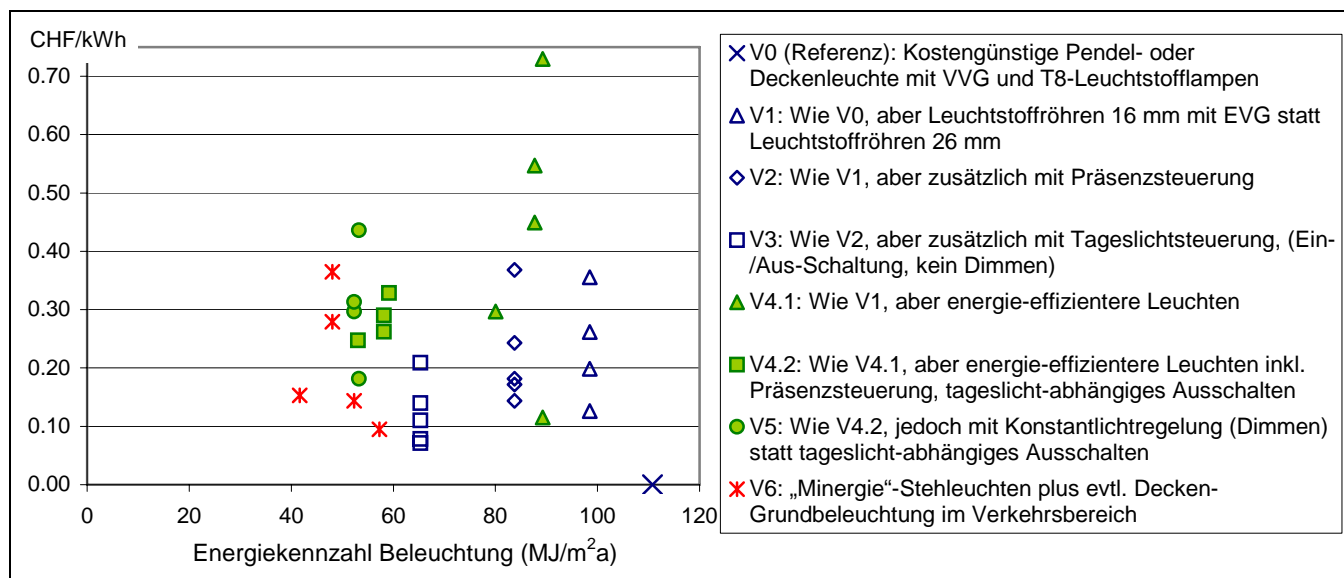
Graphique 78 Cas 1: Coûts annuels spécifiques (CHF/m²) de systèmes d'éclairage dans un nouvel immeuble de bureaux, utilisation bureau collectif, heures de pleine charge par an selon légende du graphique, amortissement sur 15 ans, intérêt réel 3%, prix de courant 17 ct./kWh (Source: entreprises spécialisées en éclairage 2, 3, 5, 6 et 9, sondage, calcul et représentation CEPE)

Dans le Graphique 79, les coûts moyens bruts des éclairages plus performants (réglages inclus) sont représentés en fonction de l'indice énergétique d'éclairage. Si les coûts moyens sont inférieurs au prix déterminant pour le courant (selon l'entreprise de distribution et la structure tarifaire 15 à 20 ct./kWh, en partie aussi en dessus), les mesures correspondantes seraient rentables. Les résultats montrent que tel est le cas pour nombre de mesures et d'entreprises. Mais ils démontrent également une assez grande dispersion.

S'agissant de l'interprétation des résultats, il faut garder deux aspects en mémoire:

- Les coûts marginaux et également les coûts moyens spécifiques réagissent de manière très sensible aux incertitudes ou aux coûts d'investissement des différentes variantes, du fait que les coûts marginaux se basent sur une différence relativement faible entre deux montants tout aussi importants l'un que l'autre.
- Les autres bénéfices éventuels, non énergétiques, concernant la qualité de l'éclairage et le confort d'utilisation, mais aussi les problèmes éventuels d'acceptation des éclairages avec réglage ne sont

pas chiffrés en francs. On estime qu'à partir de la variante de référence, ces bénéfices vont plutôt augmenter et non diminuer (à moins que les problèmes d'acceptation excèdent les autres bénéfices). Malgré cette négligence, la consommation d'énergie consacrée à l'éclairage se réduit environ de moitié en matière de rentabilité.

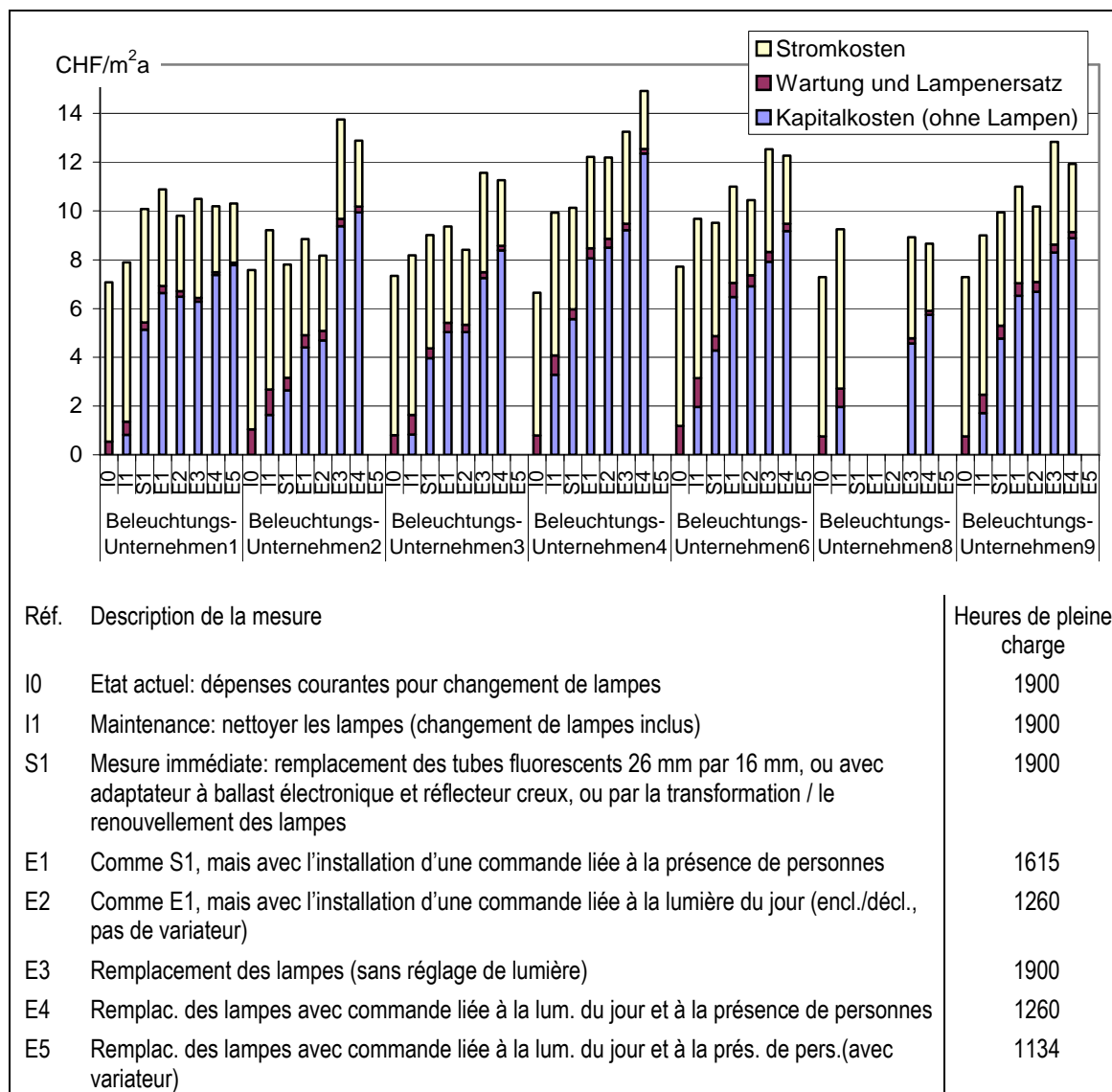


Graphique 79 Cas 1: Coûts moyens bruts (CHF/kWh) de systèmes d'éclairage dans un nouvel immeuble de bureaux, utilisation bureau collectif, amortissement et heures de pleine charge par an selon Graphique 78, intérêt réel 3% (Source: entreprises spécialisées en éclairage 2, 3, 5, 6, sondage, calcul et représentation CEPE)

Le Graphique 80 montre les coûts annuels d'éclairages dans l'état actuel, ainsi que les mesures d'entretien, immédiates et de renouvellement pour les anciens éclairages. Ces chiffres se basent sur les indications de coûts des entreprises et sur les caractéristiques techniques de la grille de sondage en annexe (Chap. 9.6.3, p.303), ainsi que sur les hypothèses émises dans la légende du Graphique 80.

- En comparaison de l'état actuel (dépenses courantes pour l'énergie plus changement courant des lampes), la « mesure immédiate » renouvellement/transformation des lampes provoque un surcoût net de 1 à 4 CHF/m²a. La pose simultanée d'un réglage de lumière augmente la rentabilité. Par rapport à la maintenance, qui comprend par ex. le nettoyage des lampes, le surcoût net est relativement faible.
- La mesure immédiate « renouvellement des lampes avec adaptateur à ballast électronique et réflecteur creux » (ne figure pas dans le Graphique 80) provoque pratiquement les mêmes coûts annuels que l'état actuel, soit comme les dépenses courantes pour l'électricité. Il convient donc de considérer cette mesure comme rentable. Avec le même nombre de lampes, les coûts annuels varient entre 6 et 7 CHF/m²a. Trois quarts environ de cette somme concernent les coûts de matériaux (quelque 60 CHF pour l'adaptateur, le réflecteur et le ballast électronique). Les coûts de travail sont relativement faibles, parce que cette mesure ne présuppose aucun démontage de la lampe et aucun aménagement des appareils auxiliaires existants et que le renouvellement peut être effectué par le personnel de l'entreprise. En remplaçant deux lampes par une seule, les coûts annuels s'élèvent à environ 5 CHF/m²a.
- **La réduction des dépenses courantes (dépenses pour l'énergie et le changement de lampes) ne justifie pas à elle seule le remplacement des lampes, avec ou sans réglage de lumière** (les lampes appelées « lampes de rénovation » pour plafonds abaissés se rapprochent le plus du seuil de rentabilité). S'il faut de toute façon remplacer les lampes actuelles en raison de leur âge et de leur état, ou si on les remplace pour des questions esthétiques ou lors d'une rénovation générale, les nouvelles lampes recèlent un énorme potentiel pour améliorer l'efficacité énergétique et notamment la performance au niveau de la technique d'éclairage.

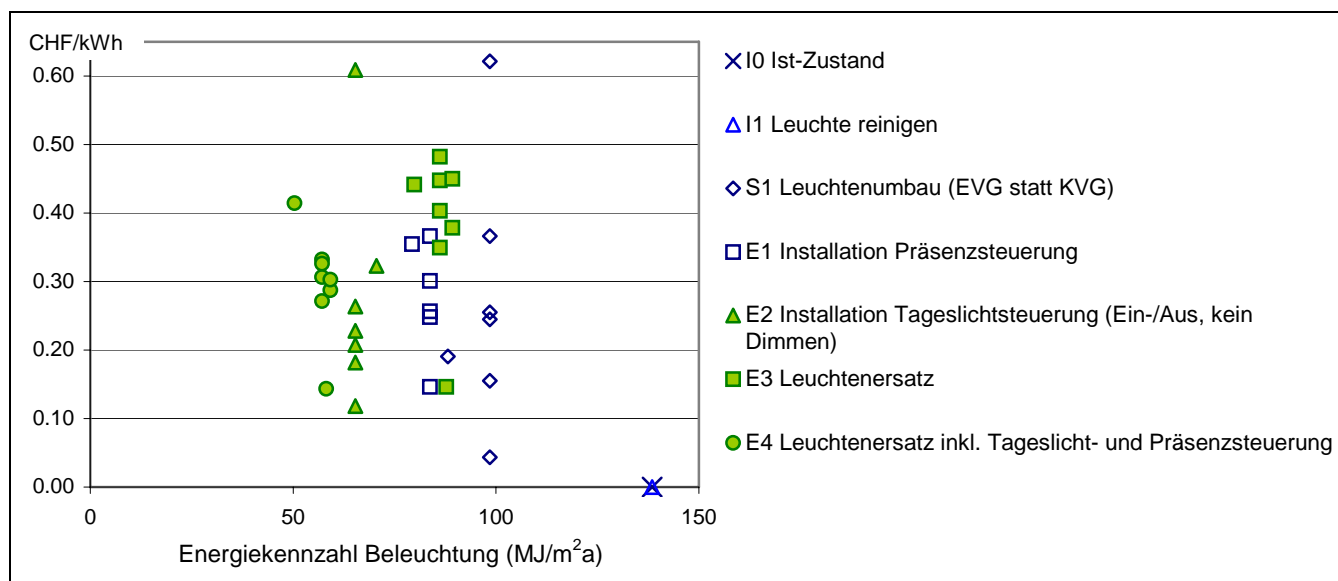
- S'il faut de toute façon remplacer les lampes, on peut considérer le surcoût net des **réglages comme plus ou moins sans incidence de frais supplémentaires** (certaines entreprises enregistrent un surcoût moindre et d'autres une réduction moindre).



Graphique 80 Cas 2: Coûts annuels spécifiques (CHF/m²/a) d'éclairages pour maintenance et renouvellement, à l'exemple d'un bureau collectif, heures de pleine charge par an, selon légende du graphique, amortissement sur I1: 5 ans, S1 à E2: 10 ans, E3 à E5: 15 ans, intérêt réel 3%, prix du courant 17 ct./kWh (Source: entreprises spécialisées en éclairage 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, sondage, calcul et représentation CEPE)

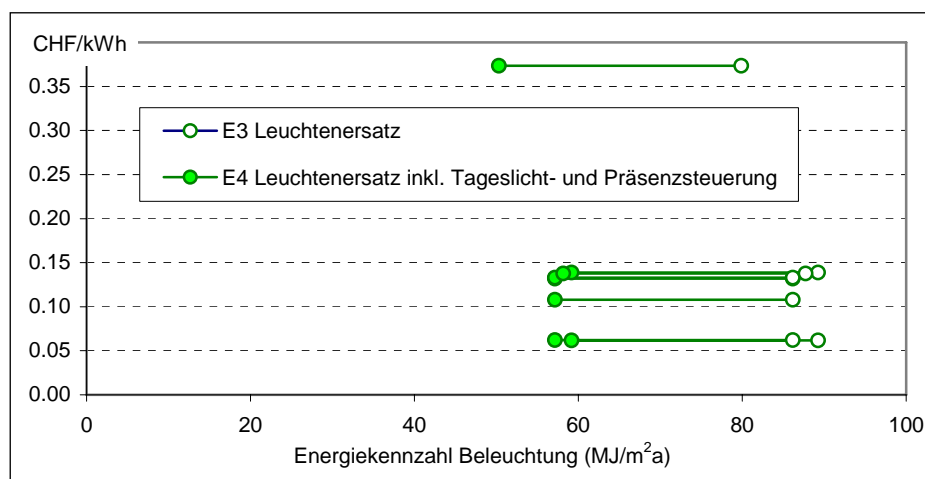
Il convient de rappeler ici que la rentabilité des mesures de rénovation dans le domaine de l'éclairage dépend fortement des hypothèses émises pour la situation de référence. Si l'on prévoit quelque cinq à dix CHF par lampe pour le nettoyage et les dépenses courantes du changement de lampes dans la situation de référence, les coûts annuels de la situation de référence augmentent alors de 0.5 à 2 CHF/m²a, si bien que les mesures de renouvellement s'avèrent comparativement plus rentables que dans le Graphique 80. Il en va de même pour l'hypothèse relative au rythme d'entretien: si, dans la situation de référence, les lampes sont effectivement nettoyées à des intervalles relativement courts (deux à trois ans, comme le veut la technique d'éclairage), les coûts annuels de la situation de référence augmentent également. Il faudrait peut-être aussi prendre en compte les travaux d'entretien d'un montant identique pour les variantes de renouvellement.

Le Graphique 81 représente les coûts moyens bruts spécifiques de renouvellements d'éclairages plus performants (réglages inclus) par rapport à la maintenance en fonction de l'IDE d'éclairage. S'agissant des coûts spécifiques, la dispersion est considérable, en particulier pour la mesure de transformation des lampes. Les coûts spécifiques d'une transformation de lampes sont en partie inférieurs au prix déterminant pour le courant (hypothèse: durée de vie 10 ans). Le simple remplacement des lampes permet de réduire l'IDE d'éclairage d'environ un tiers, mais les coûts spécifiques ne sont inférieurs au prix du courant (sans l'évaluation des bénéfices additionnels en matière de technique d'éclairage) que pour une seule entreprise. La prise en compte du réglage de lumière réduit les coûts moyens bruts spécifiques.



Graphique 81 Cas 2: Coûts moyens bruts (CHF/kWh) de modernisations d'éclairages par rapport à la maintenance, utilisation bureau collectif, amortissement et heures de pleine charge par an selon Graphique 80, intérêt réel 3% (Source: entreprises spécialisées en éclairage 1, 2, 3, 4, 6, 8 et 9, sondage, calcul et représentation CEPE)

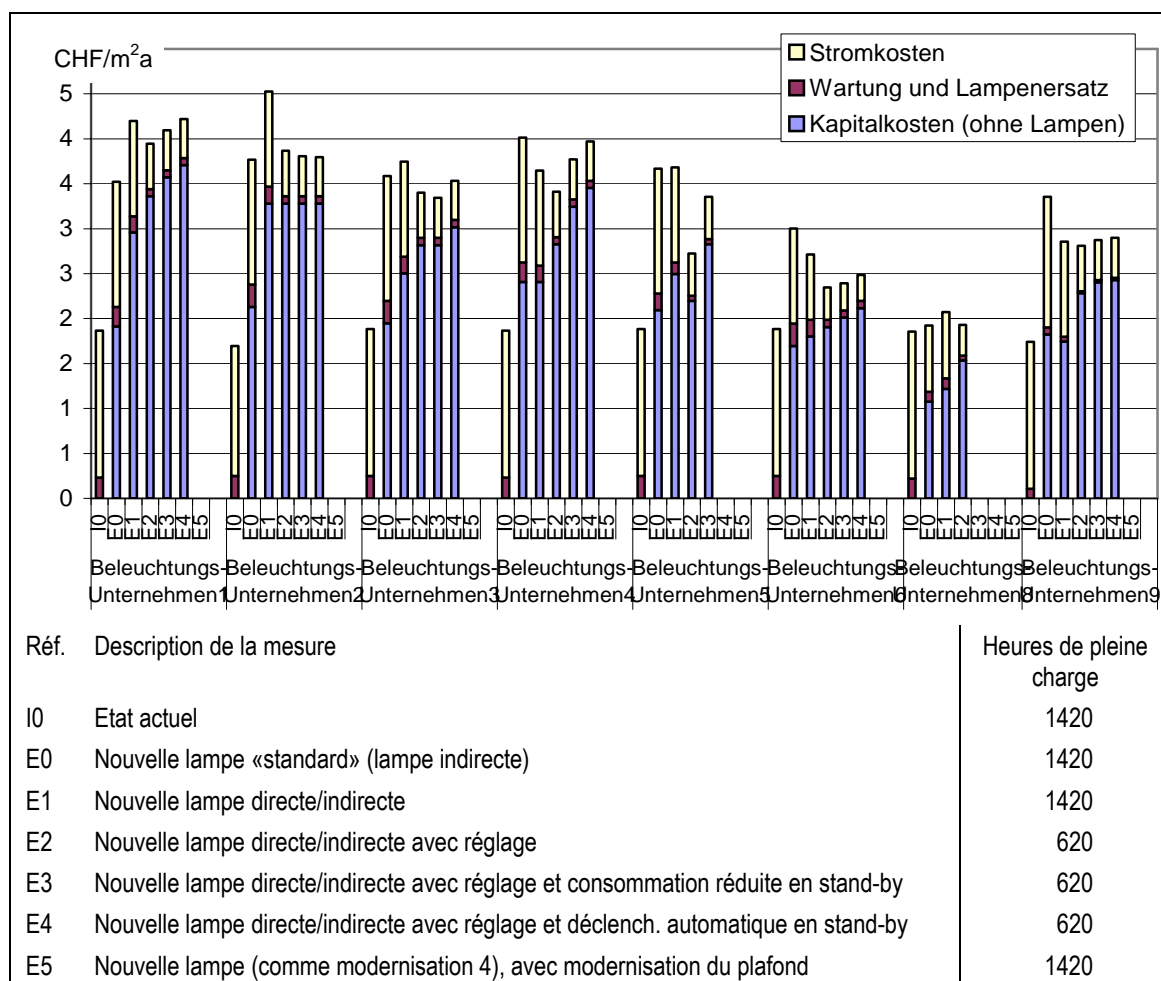
Le Graphique 82 représente les coûts marginaux bruts spécifiques de réglages d'éclairage en comparaison des renouvellements d'éclairage (remplacement des lampes) sans réglage. Le graphique met en évidence l'indice énergétique de référence de l'éclairage (désigné E3), l'amélioration atteignable (longueur de la ligne horizontale), ainsi que les coûts marginaux bruts spécifiques (position de la ligne horizontale sur l'axe y). A l'exception d'une seule entreprise, les coûts marginaux bruts spécifiques sont tous inférieurs à 15 ct./kWh, c'est-à-dire que les réglages de lumière sont considérés comme rentables. Ceci est valable avec l'hypothèse émise pour les heures de pleine charge selon le Graphique 80. Elles sont considérées comme très réalistes. Notamment dans les pièces relativement profondes et sans réglage, il arrive fréquemment que tout l'éclairage soit enclenché dès que la lumière artificielle est nécessaire au fond de la pièce. Comparativement, les réglages d'éclairage permettent une réduction considérable, en particulier à proximité des fenêtres (cf. résultats de simulation des grandes et petites pièces).



Graphique 82 Cas 2: Coûts moyens bruts (CHF/kWh) de réglages d'éclairages comparativement aux modernisations d'éclairages sans réglage, utilisation bureau collectif, amortissement et heures de pleine charge par an selon Graphique 80, intérêt réel 3% (Source: entreprises spécialisées en éclairage 1, 2, 3, 4, 6, 8 et 9, sondage, calcul et représentation CEPE)

Lorsqu'on procède au remplacement des lampes, par ex. dans le cadre de la rénovation de l'intérieur du bâtiment ou parce que les lampes ou certaines parties critiques sont en fin de vie, il est donc recommandé d'étudier soigneusement l'option «réglage de l'éclairage» pour chaque cas, car les résultats laissent entrevoir une bonne rentabilité.

Le Graphique 83 représente les coûts annuels de lampes sur pied existantes et de nouvelles lampes sur pied. En comparaison du bureau collectif, le niveau des coûts est notamment inférieur parce que la surface de 20 m² prévue pour deux lampes est relativement grande. S'agissant de l'interprétation: dans l'entreprise 8, on part de l'idée qu'une lampe sur pied suffit pour un bureau de deux personnes (alors que dans les autres entreprises on a prévu deux lampes sur pied).



Graphique 83 Cas 3: Coûts annuels spécifiques (CHF/m²a) d'éclairages lors de la maintenance et de la modernisation, à l'exemple du bureau pour deux personnes, 20 m², éclairage indirect existant avec lampes sur pied, heures de pleine charge par an selon légende du graphique, amortissement sur 15 ans, intérêt réel 3%, prix du courant 17 ct./kWh (Source: entreprises spécialisées en éclairage 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 et 9, sondage, calcul et représentation CEPE)

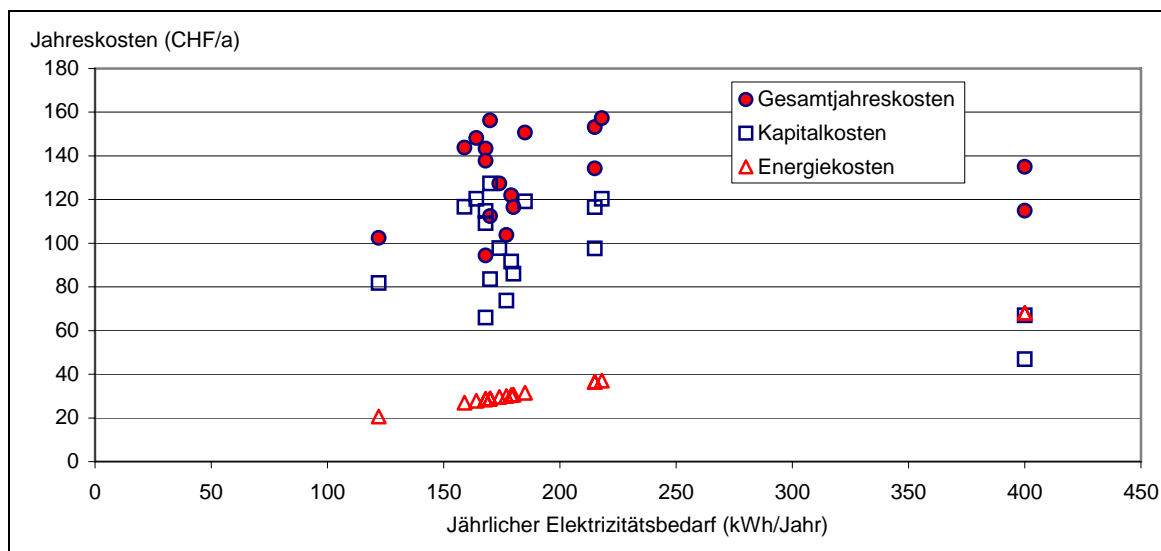
Il convient de retenir les faits suivants:

- Comme cela a déjà été relevé pour les plafonniers, le seul argument de la réduction des coûts énergétiques ne peut justifier le remplacement des lampes. **Par contre, si l'on parvient à remplacer deux lampes existantes par une seule, les coûts annuels sont comparables, voire légèrement inférieurs.**
- Le surcoût du réglage de lumière provoque un surcoût net inférieur selon certains fournisseurs et une réduction nette des coûts selon d'autres.
- Tous les fournisseurs de lampes sur pied ne vendent pas des lampes sur pied avec perte réduite (< 1 W) ou déclenchement automatique en stand-by. Lors du sondage, certaines entreprises de planification ou d'installation ont affirmé que ces lampes étaient produites par un autre fournisseur, ce qui rend impossible une comparaison ceteris paribus (puisque d'autres caractéristiques changent aussi). Conclusion: on peut retenir que les différences de coûts entre les lampes avec perte standard en stand-by et celles avec perte réduite en stand-by ou avec déclenchement automatique en stand-by sont minimes.

Le Graphique 84 représente les coûts moyens bruts spécifiques des modernisations d'anciens éclairages avec lampes sur pied. Si l'on note une forte dispersion des coûts spécifiques, ils sont en grande partie inférieurs au prix déterminant pour le courant. Cela signifie que les surcoûts des lampes

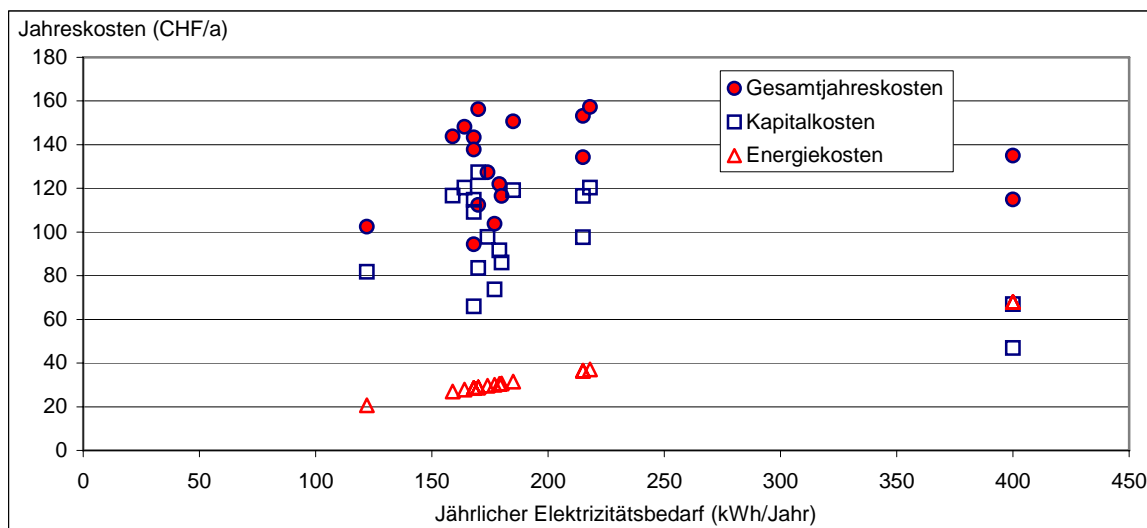
sur pied plus performantes avec réglage (enclenchement et déclenchement liés à la présence de personnes, variation en fonction de la lumière du jour) peuvent être compensés par la réduction des coûts énergétiques.

Pour compléter, il convient de mentionner ce qui suit (les résultats n'apparaissent pas ici): par rapport aux dépenses courantes pour l'électricité (c'est-à-dire par rapport à une non-intervention), le simple remplacement des lampes peut réduire considérablement l'indice énergétique d'éclairage, mais les coûts spécifiques sont généralement supérieurs au prix du courant (sans l'évaluation des bénéfices additionnels en matière de technique d'éclairage).



Graphique 84 Cas 3: Coûts moyens bruts (CHF/kWh) des modernisations d'éclairages avec lampes sur pied, utilisation bureau pour deux personnes, amortissement et heures de pleine charge par an selon Graphique 83, intérêt réel 3% (Source: entreprises spécialisées en éclairage 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 et 9, sondage, calcul et représentation CEPE)

Pour comparaison, le Graphique 85 représente les coûts énergétiques, les coûts de capital et les coûts annuels totaux. Les coûts annuels totaux des lampes sur pied performantes sont supérieurs à ceux des lampes sur pied standards selon certains fournisseurs et inférieurs selon d'autres. Il est donc possible de réduire les besoins énergétiques de plus de la moitié sans surcoût. Cela est même le cas, si l'on néglige d'autres bénéfices des lampes économiques du topten, comme par ex. une part supplémentaire de lumière directe ou des charges thermiques moindres.



Graphique 85 Coûts annuels (CHF/a) de lampes sur pied en fonction de la consommation annuelle d'électricité, rabais -33%, durée de vie économique 15 ans, intérêt réel 3%, prix du courant 17 ct./kWh (Source: www.topten.ch, état 17.11.05, représentation CEPE compte tenu du Graphique 57)

Dans ces comparaisons, seuls les bénéfices directs sont évalués sous forme de coûts énergétiques réduits, mais pas les bénéfices indirects découlant de l'amélioration de la qualité d'éclairage. Ces bénéfices indirects pourraient s'avérer considérables et surpasser les effets directs par leur importance, comme le laisse entendre Dehoff (2005) avec l'aperçu bibliographique sur les rapports entre l'éclairage et la santé. Il conviendrait également d'examiner les rapports entre l'éclairage et la productivité.

5.5.3 Commerce de détail

Dans le commerce de détail, on considère en principe la combinaison entre l'éclairage de base et l'éclairage dit «ponctuel».

Dans le commerce de détail, l'éclairage de base est généralement assuré par des tubes fluorescents. En partant de l'éclairage de bureaux, on peut, par analogie, appliquer les rapports coûts/bénéfices au commerce de détail, tout en tenant compte de quelques différences essentielles: rapports géométriques différents, heures de pleine charge quotidiennes prolongées, en général pas d'utilisation de la lumière du jour. D'une part, le surcoût de lampes et de ballasts électroniques plus performants peut se compenser plus facilement que dans les bureaux en raison du plus grand nombre d'heures de pleine charge. D'autre part, si les possibilités de réglage de lumière existent aussi, elles ne sont pas aussi importantes que dans les bureaux: pour nettoyer ou pour remplir les rayons en dehors des heures d'ouverture des magasins, il ne faut pas autant de lumière que pendant les heures de vente. Des mesures appropriées d'optimisation énergétique permettent donc de réduire la consommation d'électricité. On renonce ici à la mise en œuvre quantitative de ces considérations pour se concentrer ci-après sur l'éclairage ponctuel.

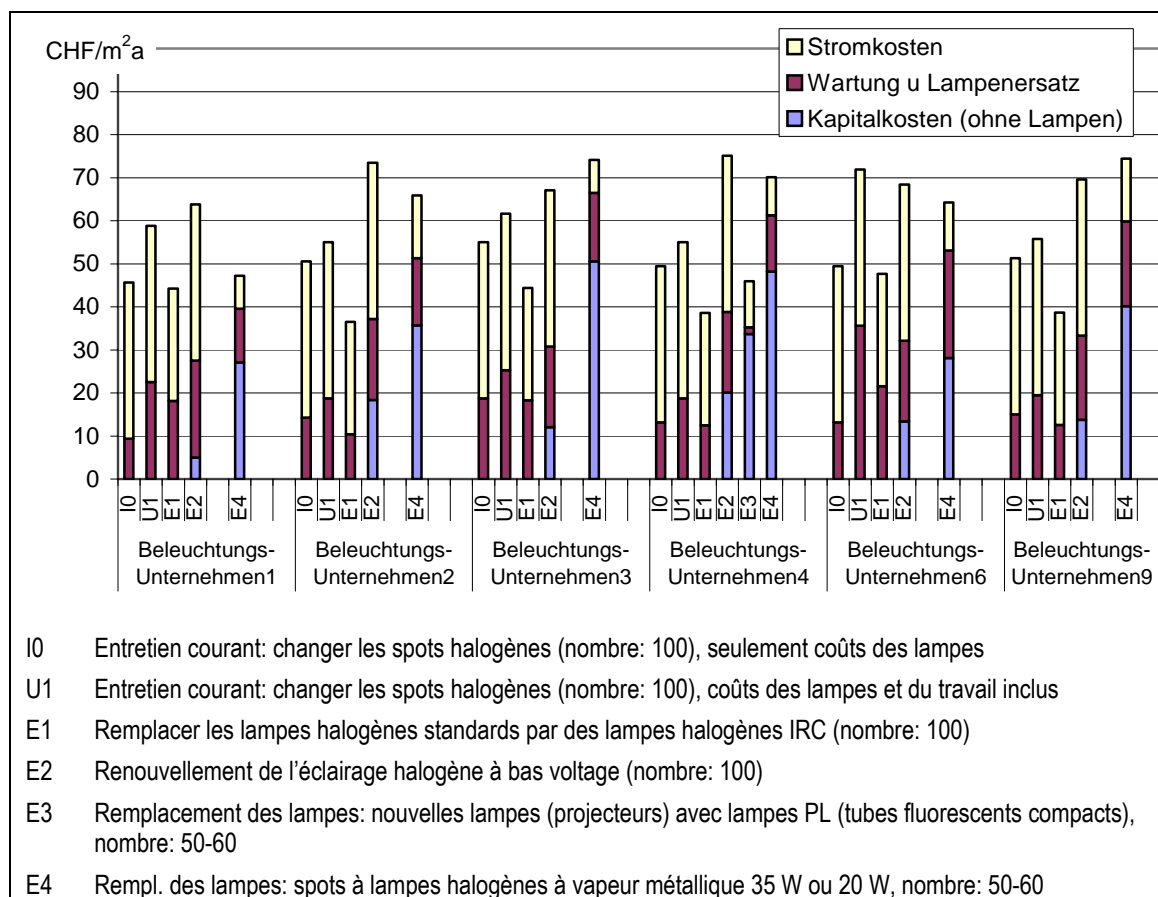
Le Graphique 86 représente les coûts annuels des éclairages ponctuels dans le commerce de détail. Avec 40 à plus de 70 CHF/m²a, les coûts annuels totaux sont sensiblement plus élevés que pour les éclairages de base avec tubes fluorescents, où les coûts varient entre 2 CHF/m²a (faible densité d'occupation et disposition optimale) et 15 CHF/m²a (voir Chap. 5.5.1). Dans la situation initiale avec lampes halogènes conventionnelles à bas voltage, les coûts d'électricité sont très élevés (40 à 50 CHF/m²a). A cela s'ajoutent les frais non négligeables pour le remplacement des lampes de 10 à plus de 20 CHF/m²a, selon que les coûts de travail pour remplacer les lampes soient (doivent être) inclus ou non. Les lampes halogènes à bas voltage sont relativement bon marché, mais leur durée de vie n'est que d'environ 2000 h, ce qui nécessite plus d'un changement de lampes par an puisque les heures de pleine charge sont généralement de 3000 h/a.

On peut donc faire les constatations suivantes:

- Si l'on remplace les lampes halogènes conventionnelles en tant que mesure immédiate par des lampes halogènes IRC, les coûts annuels peuvent être légèrement réduits (par rapport aux dépenses courantes pour l'électricité et le matériel) ou sensiblement réduits (au cas où les coûts de travail sont inclus dans la situation de référence). Les lampes IRC sont certes plus chères à l'achat, mais leur durée de vie est double, soit 4000 h, et elles consomment 30% d'électricité en moins.
- En comparaison des deux situations de référence I0 et U1 (voir légende du Graphique 86), le remplacement de l'ancien éclairage halogène par des spots à lampes halogènes à vapeur métallique entraîne un surcoût net moindre. Même si les lampes et les ampoules sont sensiblement plus chères à l'achat, le surcoût est modeste puisqu'il faut moins de lampes, que leur durée de vie est plus longue (12000 h au lieu de 2000 h) et surtout que la consommation de

courant est nettement plus faible (en supposant une durée de vie de 7 ans; une plus longue durée de vie améliore encore la rentabilité).

- S'il faut de toute façon remplacer l'éclairage halogène conventionnel à bas voltage (par ex. dans le cadre de la rénovation du magasin), cas E2 selon Graphique 86, la variante avec spots à lampes halogènes à vapeur métallique devient intéressante. Les entreprises interrogées pensent que ces lampes s'imposeront sous peu, surtout qu'un spot de 20 W sera bientôt disponible (puissance minimale actuelle: 35 W).



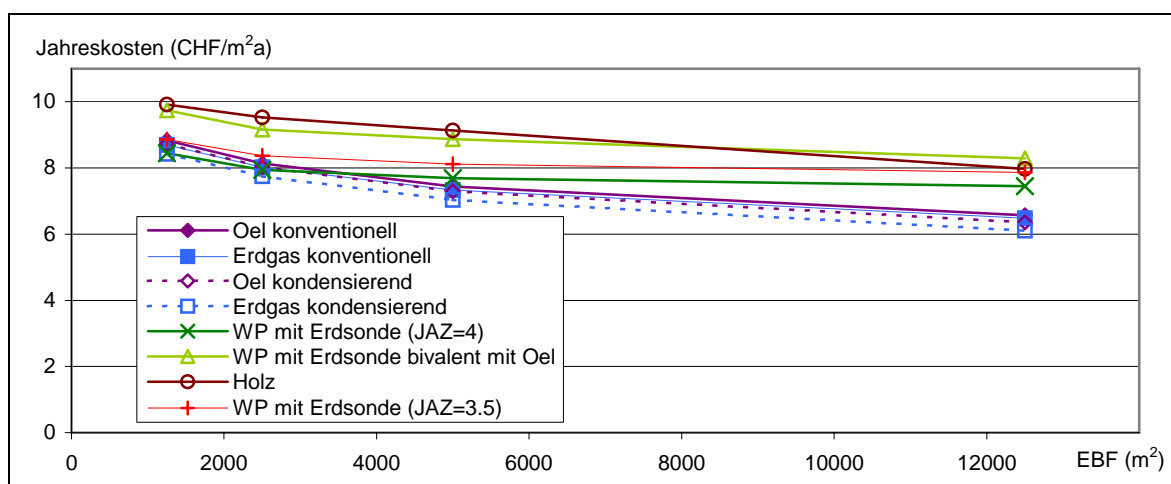
Graphique 86 Cas 4: Coûts annuels spécifiques (CHF/m²/a) d'éclairages ponctuels dans le commerce de détail pour la maintenance et la modernisation, 3000 heures de pleine charge par an, amortissement sur 7 ans, intérêt réel 3%, prix du courant 17 ct./kWh (Source: entreprises spécialisées en éclairage 1, 2, 3, 4 et 6, sondage, calcul et représentation CEPE)

5.6 Production de chaleur

Les coûts annuels spécifiques des différents systèmes de production de chaleur résultent des coûts de capital spécifiques, des coûts d'entretien (Chap.4.6.2) et des coûts énergétiques. Les coûts de capital ont été calculés sur la base des coûts d'investissement spécifiques (Chap.4.6.1) et d'un taux d'intérêt réel de 3% selon la méthode des annuités, compte tenu d'une puissance requise de 40 W/m² et d'un IDE de 240 MJ/m²a. Les taux d'utilisation annuels présumés pour calculer les coûts énergétiques figurent dans les graphiques ci-après. Pour tous les types d'installations, on a supposé en plus des pertes de distribution de 4%. Les effets d'échelle des prix de l'énergie ont été négligés (en réalité, le niveau des prix du combustible dans la plage de puissance supérieure est inférieur de 1 à 2 ct./kWh et on relève également des différences pour le prix du courant entre les diverses catégories de clients). Comme les effets relatifs sont plus importants pour les combustibles, cette simplification représente une évaluation plutôt conservatrice des pompes à chaleur.

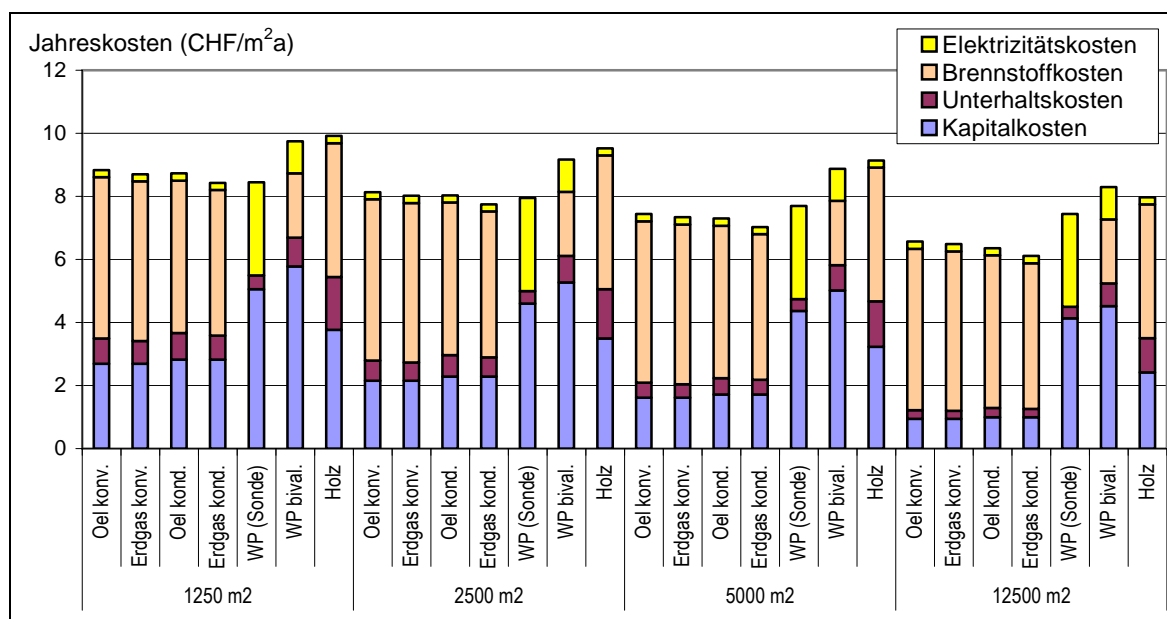
5.6.1 Bâtiments neufs

Pour les petits et moyens bâtiments peu gourmands en énergie, les coûts annuels des chauffages fossiles et des PAC sont d'un niveau comparable (Graphique 87). S'agissant des grands bâtiments, il faut compter un surcoût de 1 à 1.5 CHF/m²a pour les PAC, suivant le taux d'utilisation annuel atteint. Il convient de préciser que les coûts annuels des PAC réagissent avec une grande sensibilité par rapport au taux d'utilisation annuel atteint. Même une variation de 4 à 3.5 peut modifier le classement dans la plage de puissance inférieure et générer un surcoût plus élevé dans la plage de puissance supérieure. Un changement dans le classement peut aussi intervenir entre les deux agents énergétiques fossiles, le mazout et le gaz naturel, selon les coûts locaux de raccordement au gaz naturel, l'estimation des coûts des locaux et la politique des prix du fournisseur de gaz naturel ou les coûts de raccordement, le prix des prestations et des travaux. Les coûts annuels des systèmes de chaudière à condensation (gaz ou mazout) sont légèrement inférieurs à ceux des chauffages fossiles conventionnels. Les coûts annuels des PAC bivalentes et des chauffages à bois sont toujours plus élevés que ceux des autres types d'installations. Les chauffages au bois soutiennent la concurrence des pompes à chaleur dans la plage de puissance supérieure. En particulier les maîtres d'ouvrage publics (communes) qui possèdent leur propre bois-énergie sont les utilisateurs potentiels de ces techniques, car la facture globale «Exploitation forestière – Exploitation des bâtiments» peut être améliorée grâce à l'utilisation de chauffages à bois.



Graphique 87 Coûts annuels de différents systèmes de production de chaleur en fonction de la SRE (intérêt réel=3%, prix d'énergie fossile=0.07 CHF/kWh, prix des pellets 0.055 CHF/kWh, prix du courant=0.17 CHF/kWh, COPA PAC=3.5 ou 4, taux d'utilisation annuel du chauffage à pellets=0.9)

La structure des coûts annuels démontre clairement comment, dans la plage de puissance inférieure, les coûts de capital plus élevés des pompes à chaleur peuvent être compensés par une réduction des coûts énergétiques et comment les rapports se décalent de la plage de puissance inférieure au domaine supérieur (Graphique 88). D'un graphique analogue, il ressort qu'avec un prix inférieur pour les agents énergétiques fossiles (5 ct./kWh, 50 CHF/100 litres), les chauffages non fossiles sont beaucoup moins concurrentiels (Graphique 144). Le choix d'un agent énergétique dépend donc fortement des attentes des décideurs ou du futur prix de l'énergie. Ces attentes sont liées aux événements sur le marché mondial, mais peuvent également être influencées par les mesures de politique énergétique (taxe incitative sur le CO₂).



Graphique 88 Structure des coûts annuels de différents systèmes de production de chaleur (intérêt réel=3%, prix de l'énergie fossile=0.07 CHF/kWh, prix des pellets 0.055 CHF/kWh, prix du courant=0.17 CHF/kWh, COPA PAC=3.5 ou 4, taux d'utilisation annuel du chauffage à pellets=0.9)

On constate un décalage structurel analogue en défaveur des installations liées à de plus grands investissements (pompes à chaleur et bois), si les acteurs, dans leur optique de gestion, tablent sur une durée de vie plus courte et/ou sur un taux d'intérêt réel plus élevé. (Graphique 144 en annexe, graphique du milieu). Dans ces cas, les pompes à chaleur ne sont même plus concurrentielles dans la plage de puissance inférieure (surcoût d'au moins 1 CHF/m²a).

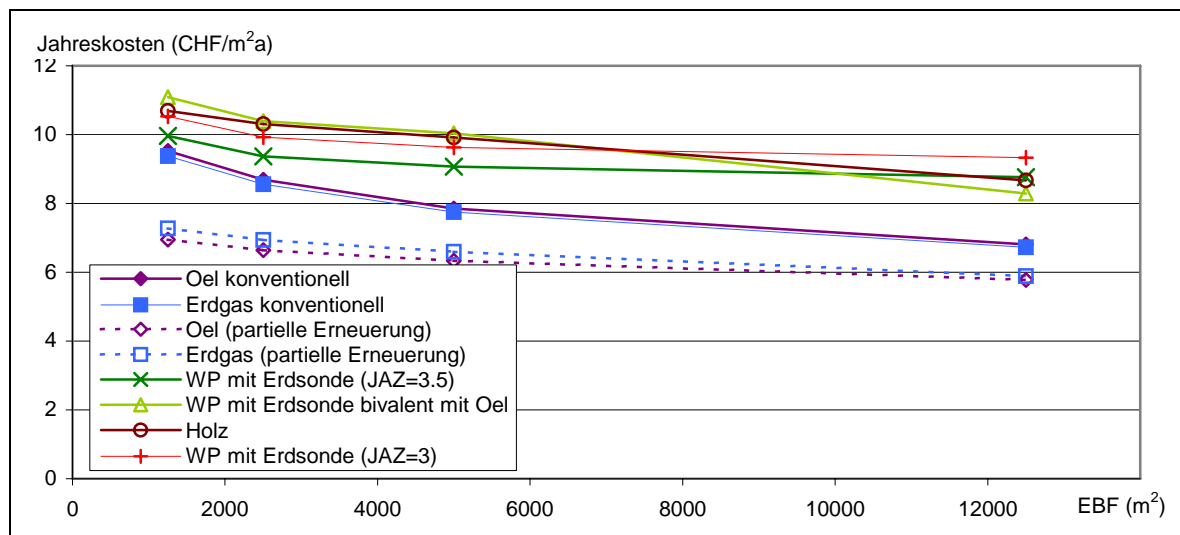
Au niveau de la technique et de la rentabilité, l'utilisation de pompes à chaleur dans les bâtiments du secteur des services est intéressante, notamment si la production et la distribution de chaleur ainsi que le refroidissement du bâtiment sont liés. En combinant les techniques pour la distribution de chaleur et de froid (éléments de construction thermoactifs) et pour les apports de chaleur ou le postrefroidissement (sondes terrestres), on peut chauffer et refroidir avec la même machine. Il faut toutefois relever que ladite machine est superflue pour une grande partie des besoins de refroidissement (by-pass) et que le refroidissement s'effectue par la simple circulation dans la sonde terrestre (expérience empirique A+W, résultat de simulation Dott, Afjei et al., 2006). Les sondes terrestres peuvent être utilisées pratiquement partout, sauf dans les zones de protection des eaux souterraines. A long terme, il faudrait veiller au rendement de la géothermie en cas de forte densité de construction et de forte pénétration du marché, car le flux de chaleur terrestre est limité (voir par ex. Brögli 1999). Une exploitation durable est possible grâce à l'utilisation combinée comme source de chaleur pendant la période de chauffage et comme dissipateur thermique en été (postrefroidissement du refroidissement du bâtiment, complété éventuellement par la chaleur excédentaire d'installations solaires).

5.6.2 Bâtiments existants

En principe, les coûts totaux de production de chaleur pour les bâtiments existants sont identiques à ceux des bâtiments neufs, à part le niveau de prix plus élevé (moins de concurrence) et les surcoûts des travaux d'adaptation et de l'enlèvement des anciens équipements. C'est pourquoi on a prévu d'une manière générale 20% de plus de coûts d'investissement pour les bâtiments existants, à l'exception de la rénovation partielle (r. p.). La rénovation partielle des installations de production de chaleur joue un rôle non négligeable dans les bâtiments existants, ceci à cause de la différente durée de vie des diverses parties de l'installation et parce que l'usure des pièces est tout à fait aléatoire. Une rénovation partielle comprend généralement la production de chaleur (en l'occurrence: chaudière et

brûleur), le montage avec transport et travaux sanitaires, mais sans la cheminée, la citerne et le raccordement au gaz. Par conséquent, les coûts d'investissement sont inférieurs d'au moins 50% pour les chauffages au mazout, alors qu'ils varient entre 30% et 40% pour les chauffages au gaz (plage de puissance supérieure ou inférieure). Par ailleurs, pour les anciens bâtiments, on table souvent sur des coefficients de performance annuels inférieurs, parce qu'on ne peut pas toujours adapter l'actuelle distribution de chaleur aux exigences de la technique des pompes à chaleur (températures de départ plus basses).

Pour la comparaison ci-après (Graphique 89), on a pris des bâtiments dont l'enveloppe a été rénovée et pour lesquels la température de départ est à un niveau modéré (hypothèses: IDE=240 MJ/m²a, puissance thermique demandée 40 W/m). Contrairement aux bâtiments neufs, les coûts des installations non fossiles, pour toute la plage de puissance, sont nettement au-dessus des chauffages au mazout et au gaz (Graphique 89). Pour les pompes à chaleur, ceci est dû aux coûts de capital plus élevés par rapport aux nouvelles constructions, mais également aux coefficients de performance annuels moindres. La différence de coûts est particulièrement flagrante en comparaison des coûts de rénovation partielle des installations fossiles. Les coûts de substitution non amortissables peuvent donc être considérables. Ceci vaut également pour le passage du mazout au gaz naturel, comme le montre la différence entre les coûts totaux du gaz naturel et les coûts de rénovation partielle du chauffage (actuel) au mazout.



Graphique 89 Coûts annuels de différents systèmes de production de chaleur en fonction de la SRE (intérêt réel=3%, prix de l'énergie fossile=0.07 CHF/kWh, prix des pellets 0.055 CHF/kWh, prix du courant=0.17 CHF/kWh, COPA PAC=3 ou 3.5, taux d'utilisation annuel du chauffage à pellets=0.9)

En complément d'information, le Graphique 144 (graphique inférieur) en annexe représente la structure des coûts annuels des différents systèmes de production de chaleur.

6 Coûts/bénéfices au niveau du bâtiment

Les douze exemples concrets ci-après montrent l'évolution du niveau de confort et des coûts annuels pour une série de mesures d'efficacité énergétique et/ou de confort, en faisant la distinction entre construction et rénovation de bâtiment. Les coûts annuels sont représentés dans leur structure en distinguant entre coûts de capital, d'entretien, de combustible et d'électricité. Les hypothèses émises pour les indices de coût et la structure des coûts de capital sont documentées en annexe. La conversion des coûts d'investissement en coûts de capital annuels s'effectue selon la méthode des annuités et en fonction de la durée de vie économique usuelle des différents éléments de construction, équipements et composants; la durée de vie économique dépend de la durée de vie technique (en l'occurrence, supposée un peu plus courte). Les calculs se basent sur un taux d'intérêt réel de 3%, un prix du combustible de 7 ct./kWh et un prix de l'électricité de 17 ct./kWh. Le niveau de confort exemplaire est représenté par le nombre d'heures avec dépassement de la valeur-limite de la température ambiante (selon la courbe de la valeur-limite du Graphique 10, p. 97).

Par ailleurs, on a pris en compte les incidences des mesures énergétiques et de confort sur le dimensionnement des installations techniques, notamment sur la puissance requise de la production de chaleur et de froid ainsi que de la distribution de froid (pour le refroidissement de l'air pulsé). Cela présuppose que ces retombées soient effectivement prises en compte dans la planification et la réalisation pratique, c'est-à-dire que les installations soient dimensionnées avec précision et de cas en cas (et pas seulement avec des valeurs approximatives). Les coûts de capital présumés sont documentés dans l'annexe 9.8.1, p. 317.

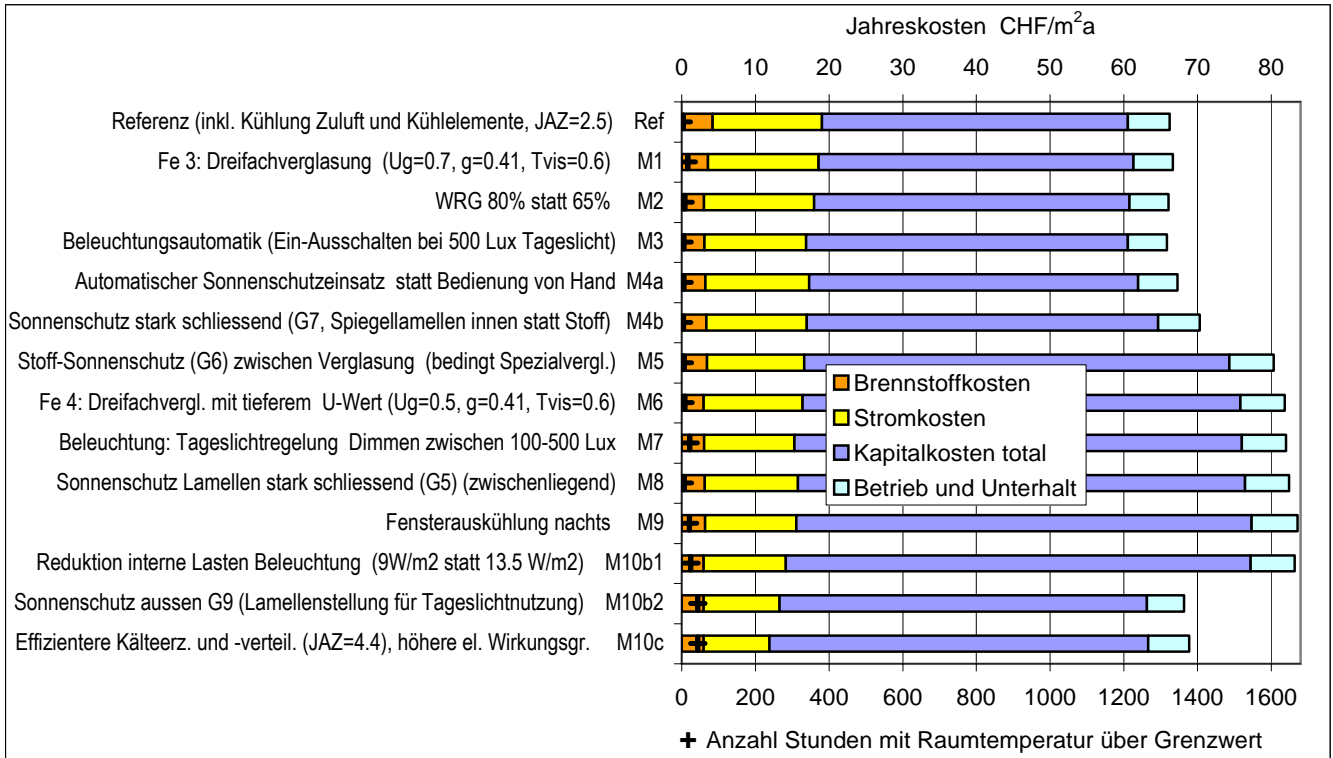
6.1 Bâtiments neufs

Pour les types de bâtiments BN1.1a à BN1.1c (Graphiques 90 à 92), il s'agit de bâtiments avec une forte part de vitrages (part des fenêtres 80%, soit part nette de vitrages près de 70%) et des charges internes élevées.

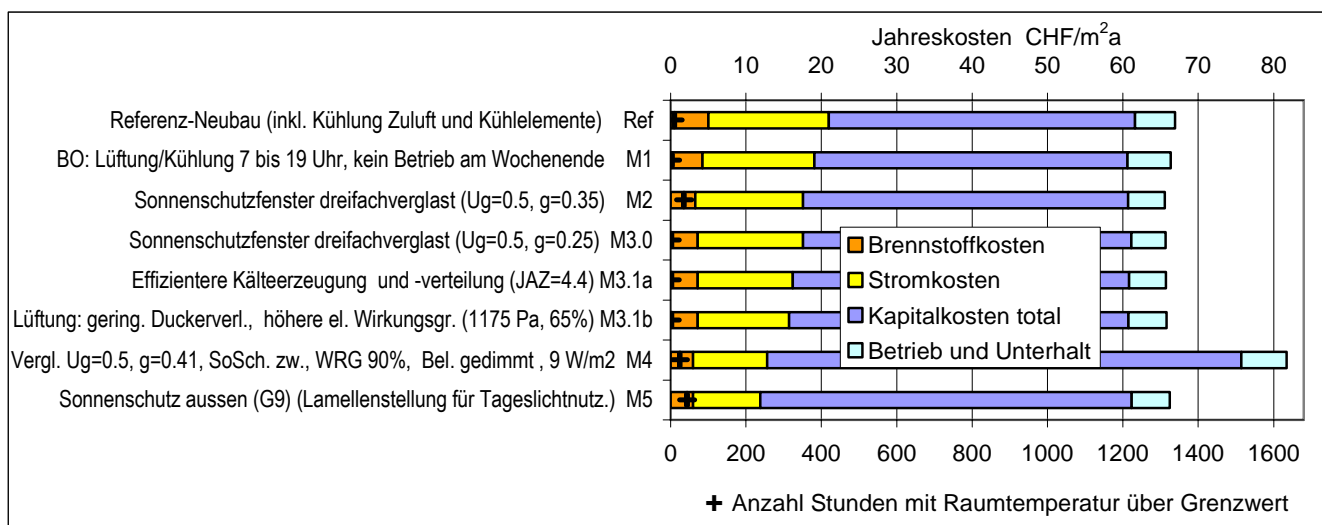
Pour la première catégorie de bâtiments BN1.1a (Graphique 90), on a pris une situation de référence avec refroidissement actif et ventilation avec refroidissement de l'air frais. S'agissant des mesures suivantes M1 à M4a, les coûts de capital sont légèrement supérieurs, mais peuvent être plus ou moins compensés par la réduction des coûts énergétiques. Les mesures M4b (lamelles réfléchissantes spéciales) et surtout M5 (protection solaire entre les verres) réduisent également les coûts énergétiques, alors que les coûts annuels augmentent sensiblement, car la dernière mesure est très onéreuse (coûts d'investissement jusqu'à quelques centaines de CHF/m²). Certaines des mesures M6 à M10.1 ci-après n'entraînent pas de surcoût, tandis que d'autres augmentent légèrement les coûts annuels nets, ceci tout en réduisant successivement les besoins en énergie (voir également Graphique 13). En prévoyant finalement (M10b) une protection solaire extérieure au lieu d'une protection solaire placée entre les verres, les coûts annuels totaux peuvent être plus ou moins ramenés au niveau de la situation de référence (net +3 CHF/m²a), ceci tout en améliorant sensiblement l'efficacité énergétique (IDE_{el} -125 MJ/m²a, soit -40%, IDE_{comb} -60 MJ/m²a, soit -30%) et en respectant les besoins de confort. Cette neutralité des coûts est aussi due à la capacité frigorifique moindre (coûts de capital réduits de 3 à 4 CHF/m²a). Il convient de relever encore que, sur la demande électrique restante de 190 MJ/m²a, plus de la moitié, soit 116 MJ/m²a, est consacrée aux appareils. Il devient dès lors manifeste qu'il ne faut pas seulement prêter attention à l'électricité affectant le bâtiment, mais également aux autres applications électriques.

Des constatations analogues s'imposent pour le cas BN1.1b; mais à partir de la même situation de référence, les mesures ont été classées dans un ordre différent. Si entre-temps le film intercalaire

augmente considérablement les coûts annuels, les mesures d'efficacité énergétique proprement dites se réalisent sans majoration des coûts, compte tenu du cycle de vie, et tout en améliorant sensiblement l'efficacité énergétique ($IDE_{el} -150 \text{ MJ/m}^2\text{a}$, soit -45% , $IDE_{comb} -100 \text{ MJ/m}^2\text{a}$, soit -40%) et en respectant les besoins de confort (voir Graphique 91).



Graphique 90 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BN1.1a: Neubau eines grossen Bürohochhauses, EBF 10'000 m2, hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m2, U-Wert Aussenwand 0.29 bzw. 0.77 W/m2K (Wert ohne bzw. mit Wärmebrücken, innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung (Druckverluste 1200 Pa, Ventilatorwirkungsgrad 55%) mit WRG (thermischer Wirkungsgrad 65%), Fenstertyp 2 (Ug=1.1, g=0.52, Tvis=0.73, Uf=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (Kühldecke/Umluftkühler) ohne Leistungsbeschränkung, JAZ=2.5



Graphique 91 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BN1.1b: Neubau eines grossen Bürogebäudes, EBF 10'000 m², hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², Fassaden-U-Wert 0.77 W/m²K (inkl. WB), innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Fenstertyp 2 (Ug=1.1, g=0.52, Tvis=0.73, Uf=1.8), Beleuchtung: manuell (800 Lux), Zuluftkühlung und Kühlelemente

Si l'on prévoit l'ouverture des fenêtres lors de surchauffe, il est plus facile de satisfaire aux exigences relatives à la surchauffe que sans le recours à cette possibilité du free cooling. Toute une série de mesures sont cependant nécessaires pour réduire le nombre d'heures de température intérieure élevée en dessous de 200 ou 100 h/semestre (type de bâtiment BN1.1c, Graphique 92). Les mesures sont comparées à deux situations de référence, la situation de référence désignée «Test» étant plutôt de nature didactique, car les besoins de confort y sont largement dépassés. La seconde situation de référence Réf2 comporte un refroidissement actif et un refroidissement de l'air frais: on peut alors se demander si les critères de confort peuvent être atteints sans ces refroidissements.

Jusqu'à la mesure M4b, les coûts annuels totaux restent quasiment constants ou augmentent légèrement. Les mesures plus ou moins neutres au niveau des coûts comprennent l'amélioration du coefficient de performance du RC, l'utilisation d'une fenêtre à triple vitrage avec valeur U et valeur g moindres ainsi qu'un réglage (simple) de l'éclairage. L'augmentation nette (modérée) des autres mesures (meilleure protection solaire) est due à la réduction des coûts énergétiques insignifiante ou quasiment nulle, qui ne permet pas de compenser les coûts d'investissement plus élevés. Le bénéfice d'une meilleure protection solaire doit aussi être pris en compte dans l'amélioration du confort. Dans le bilan, les coûts annuels jusqu'à la mesure M4b sont inférieurs à la situation de référence Réf 2, pour laquelle les critères de confort sont respectés.

La différence de coût la plus frappante est provoquée par la protection solaire placée entre les verres (M5). Dans l'optique de la physique du bâtiment, cette solution est préférable à la protection solaire placée à l'intérieur, mais elle entraîne des coûts d'investissement élevés (le coût du m² de façade augmente de quelques centaines de CHF). Ces coûts élevés sont dus à une façade à «double peau de verre» ou à des vitrages spéciaux avec protection solaire intégrée. La protection solaire à l'extérieur, meilleure variante au niveau de la physique du bâtiment et bonne variante au niveau des coûts, n'est pas prévue pour ce type de bâtiments, pour lequel seules les variantes destinées aux façades lisses et structurées sont envisageables.

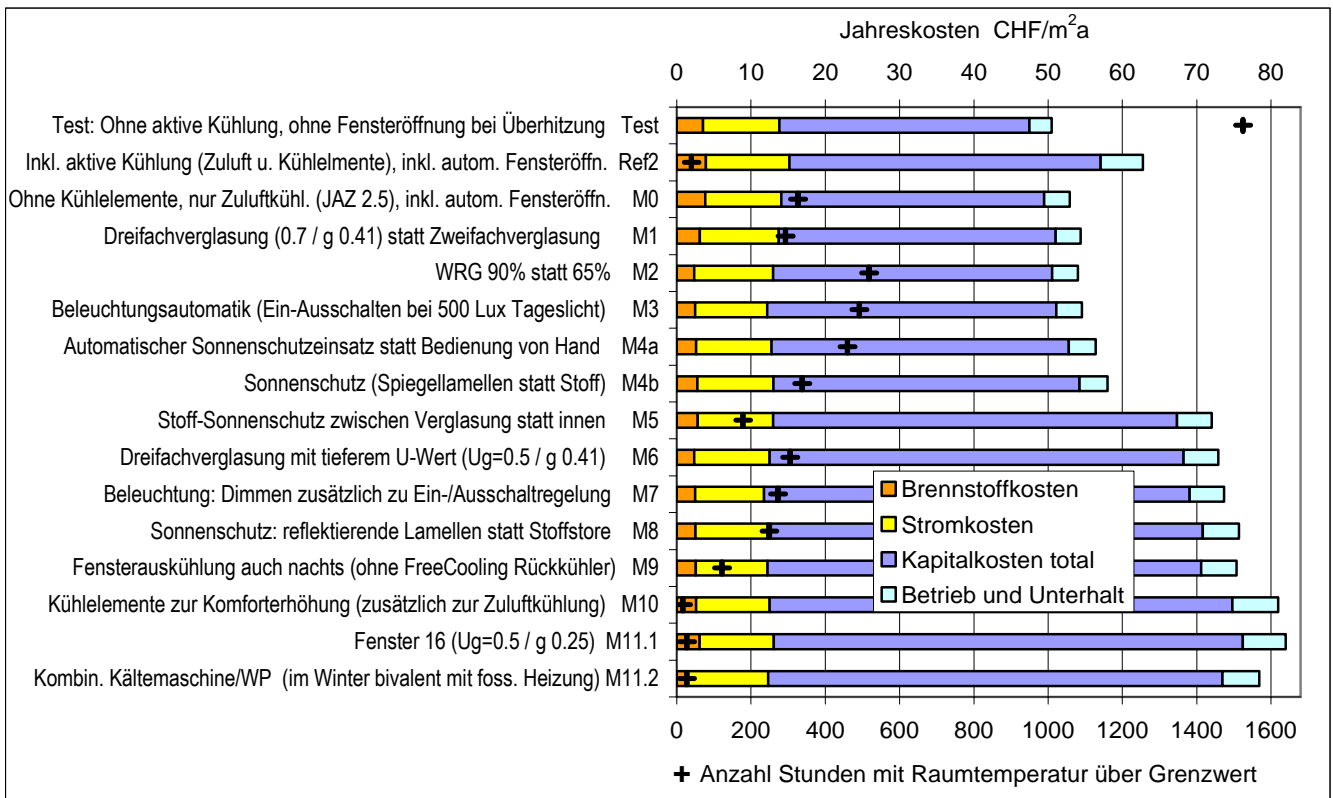
S'agissant des mesures M1 à M9, elles permettent finalement d'atteindre un confort acceptable (elles comprennent le refroidissement de l'air frais, sans lequel les besoins de confort ne peuvent être atteints dans un bâtiment avec une part de vitrages de 80%). De jour comme de nuit, l'ouverture

réglée des fenêtres est un facteur déterminant. Il faut préciser que le bénéfice de l'ouverture des fenêtres n'a l'importance escomptée que si l'air acheminé vers l'intérieur n'est pas plus chaud que la température extérieure présumée. Ceci n'est peut-être que partiellement le cas pour une façade métal et verre ou également pour d'autres types de façades. Il est particulièrement délicat d'évaluer une façade «à double peau de verre» où les fenêtres s'ouvrent seulement vers l'espace intermédiaire du vitrage (pour M5 et les paquets de mesures suivantes, on prévoit une protection solaire intégrée dans le vitrage et non pas une façade «à double peau de verre»)¹¹. Par rapport à la situation de référence Réf2 avec refroidissement actif, il faut prévoir avec des surcoûts importants pour les mesures M1 à M9, notamment à cause de la protection solaire placée entre les verres (M5). Comme le gain d'efficacité énergétique de cette mesure s'avère relativement modeste, on peut considérer comme plus rentables les investissements dans un refroidissement actif de haute performance (par ex. avec possibilité de free cooling) et dans d'autres mesures d'efficacité énergétique.

M10 présuppose un refroidissement actif, qui permet encore un confort accru, grâce au refroidissement de l'air pulsé ou aux plafonds réfrigérants. La mesure M11.1, qui a été définie comme visant à réduire la consommation d'énergie de refroidissement, ne produit qu'un effet moindre d'un point de vue absolu, car la consommation d'énergie de refroidissement est déjà relativement faible, compte tenu de la possibilité d'ouvrir les fenêtres, dans la situation de comparaison directe (M10). Il n'en résulte aucun gain net d'efficacité électrique, parce que les besoins d'éclairage et de chaleur augmentent sensiblement (voir également Graphique 14 sur la structure de la demande énergétique). Une réduction des coûts est toutefois réalisable, si la production de chaleur et de froid est assurée (au moins partiellement) par la même installation (M11.2).

Par rapport à M9 ou M10, la substitution partielle du chauffage fossile par une pompe à chaleur permet encore de réduire considérablement la demande de combustibles (malgré une aggravation «temporaire» de plus de 30 MJ/m²a à cause de verres antisolaires dans M11.1 jusqu'à plus de 160 MJ/m²a), ceci moyennant des coûts nets moindres (surcoût pour l'électricité inclus). Le prix de l'économie énergétique pour cette substitution est un léger accroissement de la consommation d'électricité (environ 20MJ/m²a, soit au moins 10% de la consommation totale de courant, appareils inclus). Mais cet accroissement serait plus important sans les mesures d'efficacité dans l'éclairage. S'agissant de la consommation d'électricité, il est aussi très difficile d'évaluer les mesures dans le domaine de la protection solaire (vitrages avec valeur g moindre, protection solaire avec valeurs seuils inférieures, protection solaire renforcée, etc.).

¹¹ Les avis des entreprises interrogées divergeaient sur le besoin d'entretien de la protection solaire placée entre les verres, moteur et réglage inclus. On estime qu'en cas de défaut de la protection solaire ou du moteur, il faut remplacer tout l'élément du vitrage. On a tablé sur un besoin d'entretien de 1% des coûts d'investissement par an.



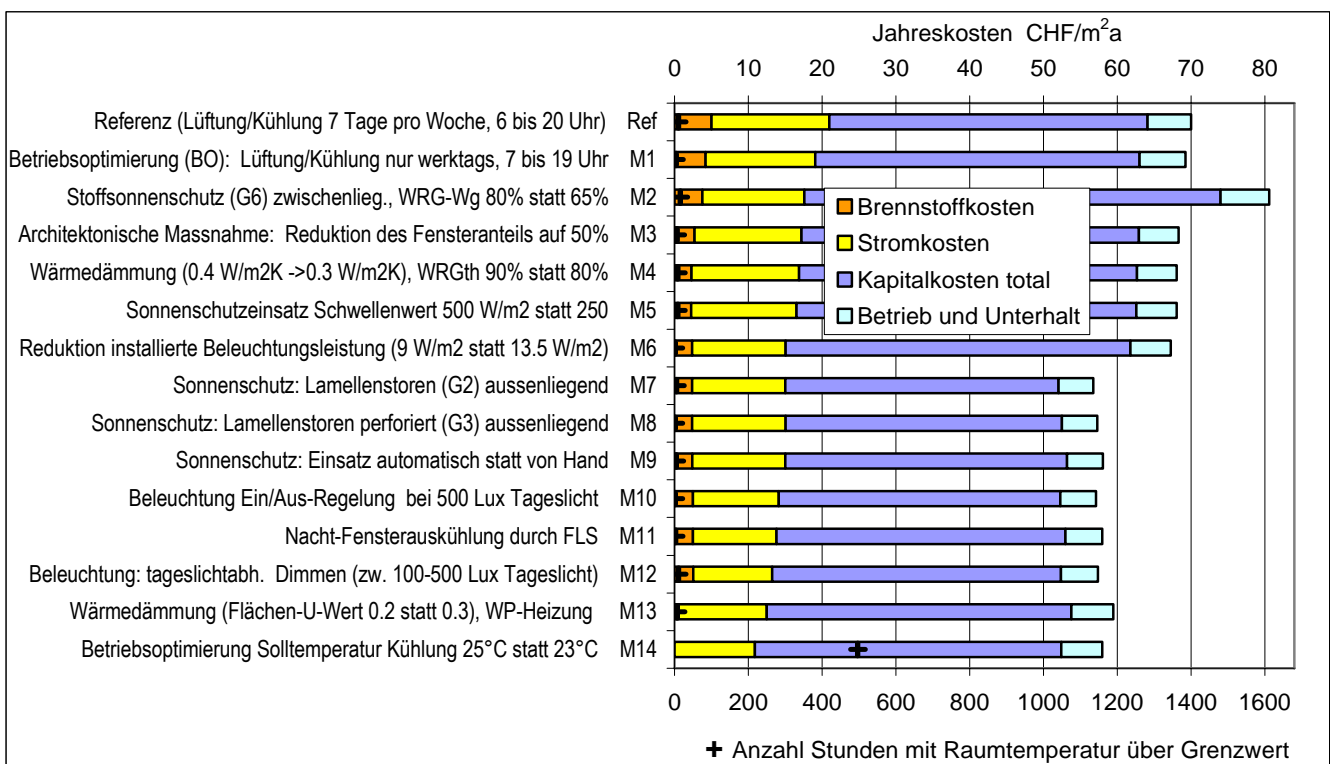
Graphique 92 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiment BN1.1c: Neubau eines Bürogebäudes, hoher Fensteranteil (80%), inkl. automatische Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Fall Test), Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 0.29, innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Fenstertyp 2 (Ug=1.1, g=0.52, Tvis=0.73, Uf=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), Kühlung der Zuluft und Kühlelement (Kühldecke/Umluftkühler)

Conclusion pour le cas BN1.1c: En partant de l'idée que la situation de référence doit répondre aux exigences énergétiques, mais également aux besoins de confort, il ne faut pas prendre le cas désigné «Test» comme référence, mais le cas Réf2 (avec refroidissement actif) ou éventuellement aussi les cas M5 et M9. Par rapport à ces cas-là, les besoins de confort sont aussi respectés sans éléments réfrigérants et on peut réaliser des gains d'efficacité énergétique; quant au niveau énergétique atteint, il n'est toutefois pas inférieur à celui des cas avec refroidissement actif (BN1.1a et BN1.1b).

Pour le type de bâtiments BN1.2a, il s'agit de la même situation initiale que dans le cas précédent BN1.1, c'est-à-dire d'un nouvel immeuble de bureaux avec forte proportion de vitrages, charges internes élevées et refroidissement du bâtiment. Avec la mesure M3, on peut mettre en évidence l'effet de la mesure architectonique d'une plus faible part de vitrages: les coûts annuels nets reculent d'au moins 10 CHF/m²a (et compensent le surcoût de la protection solaire placée entre les verres, M2), ceci notamment en raison des coûts de capital moins élevés (les coûts d'une façade opaque sont supposés inférieurs à ceux d'une façade vitrée avec protection solaire intégrée), mais aussi à cause des coûts de combustible moindres (réduction significative de la consommation de combustible de 190 à 140 MJ/m²a). En fin de compte, les coûts énergétiques ne reculent que légèrement (d'environ 0.5 CHF/m²a), car la réduction des coûts de combustible est quasiment compensée par l'augmentation des coûts d'électricité (avec une part de vitrages moindre, l'indice énergétique électricité augmente d'environ 15 MJ/m²a, compte tenu des besoins d'éclairage plus importants). Les quatre mesures suivantes (isolation thermique renforcée, rendement supérieur du RC, amélioration du concept d'éclairage) sont quasiment neutres au niveau des coûts jusqu'à la mesure M7, suivie d'une baisse de

coûts: en changeant le paradigme de la protection solaire (placée à l'extérieur au lieu d'entre les verres), on note une forte réduction des coûts des fenêtres et des coûts d'entretien de la protection solaire.

Les mesures d'efficacité énergétique M8 à M13, qui visent à réduire les besoins d'éclairage et de refroidissement, n'entraînent en général pas de surcoûts (Graphique 93). Le chauffage à PAC et l'isolation thermique renforcée des façades provoquent un surcoût net de 2 CHF/m²a (dans cet exemple, on n'a pas prévu de possibilités de synergie avec la production de froid, ceci contrairement au cas BN1.1). Le surcoût de la PAC serait plus élevé si elle était installée sans les autres mesures dans la situation de référence, car, dans la situation de référence, la puissance thermique requise d'environ 330 kW est nettement supérieure à celle de M13 qui n'est que d'environ 150 kW. La puissance requise pour le refroidissement et les coûts de capital correspondants diminuent considérablement entre la Réf et M13 (de 340 à 220 kW, ou de 3 CHF/m²a).

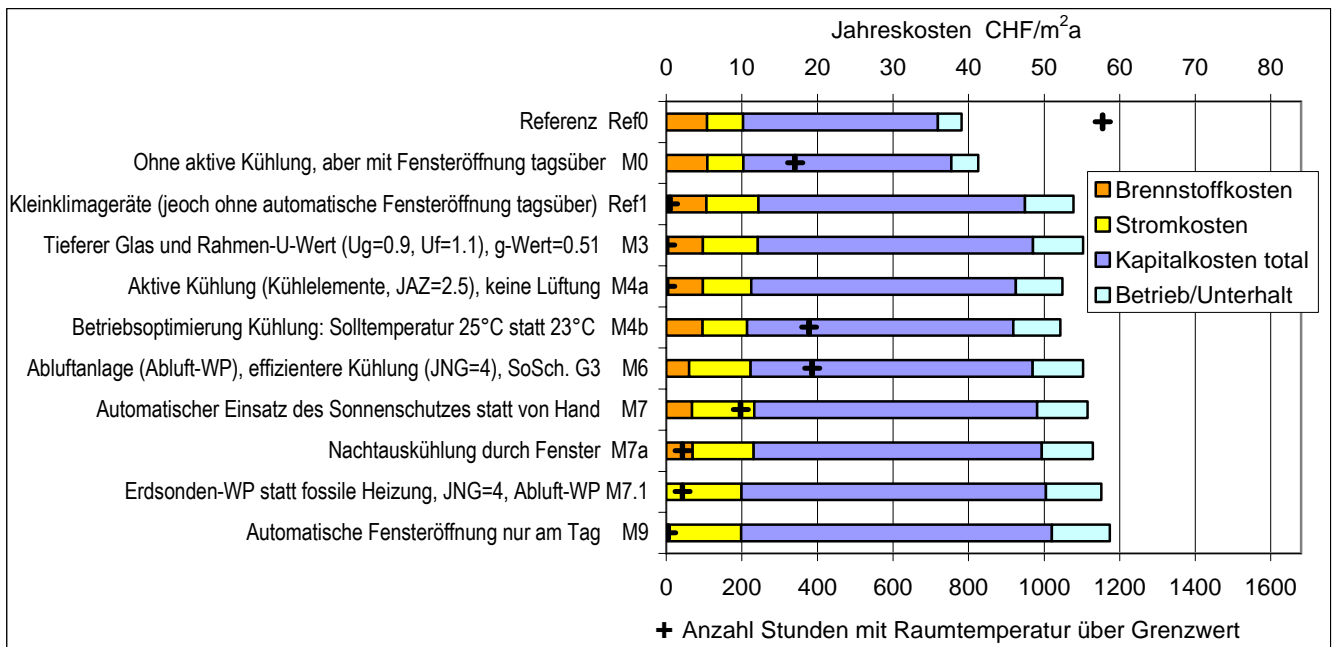


Graphique 93 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BN1.2a. BN1.2a: Neubau eines mittleren Bürohochhauses, EBF 4600 m², hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 0.29, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (Kühldecke oder Umluftkühler), JAZ=2.5, Fenster Typ 2 (Ug=1.1, g=0.52, Tvis=0.73, Uf=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux)

Par rapport à l'économie mentionnée, suite à la substitution d'une protection solaire placée entre les verres par une protection extérieure, la dernière hausse de coûts due au remplacement du chauffage fossile par une PAC à sonde doit être considérée comme modeste.

Le cas BN1.2 démontre clairement que les coûts totaux et la consommation d'énergie sont fortement dépendants des décisions architecturales et conceptuelles ainsi que du choix des matériaux (concernant les façades), tant positivement que négativement. Certaines de ces mesures sont de véritables mesures «win-win»: une protection solaire extérieure permet de réduire les coûts de l'enveloppe du bâtiment (comparativement à une protection placée entre les verres) et d'améliorer la protection contre la surchauffe.

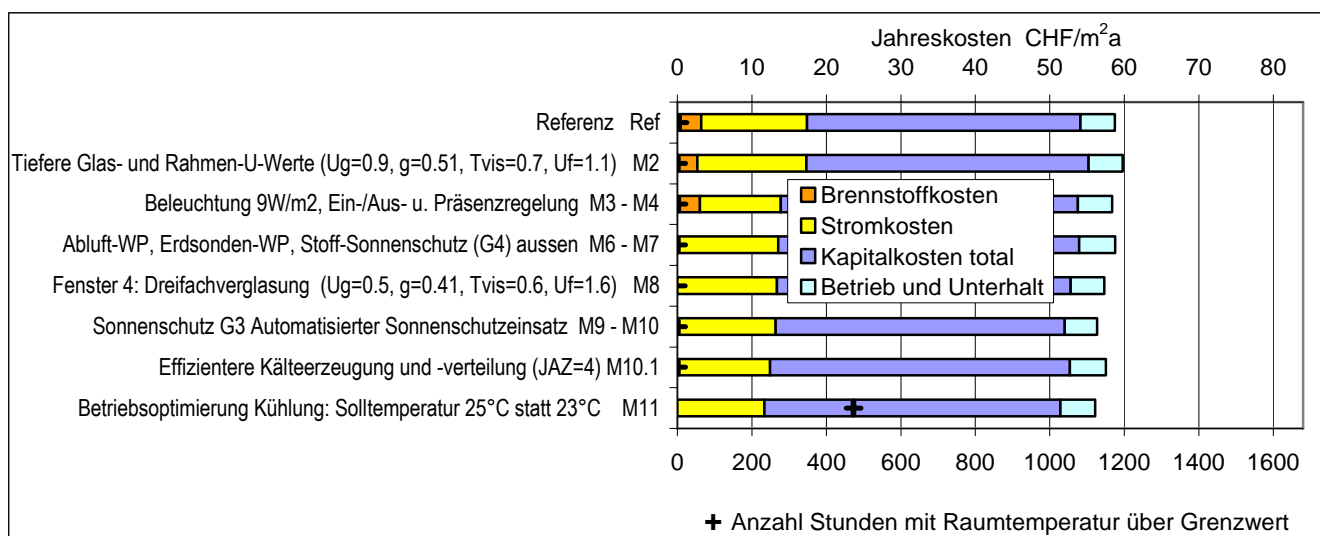
Le cas BN2.1a (Graphique 94) représente deux situations de référence. L'une (Réf0) met en évidence des coûts annuels inférieurs, mais ne respecte nullement les exigences de confort. Une fois encore, la Réf0 sert donc uniquement d'illustration, et seule la Réf1 peut être considérée comme mode de référence pour une nouvelle construction. Il comporte un refroidissement actif (air frais et air pulsé). Une augmentation des coûts faible à modérée peut être due au choix des fenêtres avec un cadre amélioré, à l'installation d'une ventilation (évacuation de l'air vicié), à la substitution du chauffage fossile par une PAC à sonde et au système d'aération par les fenêtres. L'évacuation d'air vicié avec ouvertures d'aération et PAC alimentée à l'air vicié améliore l'efficacité énergétique en même temps que le confort (hygiène de l'air). Par rapport à la Réf1, les coûts énergétiques diminuent globalement d'environ 2 CHF/m²a, alors que les coûts annuels nets augmentent d'environ 5 CHF/m²a, compte tenu du bénéfice de la ventilation et de la réduction et substitution de la consommation de combustible (fossile). S'agissant du courant, il résulte une augmentation nette de 25 MJ/m²a, parce que dans cet exemple, on n'a pas prévu d'autres mesures d'efficacité électrique pour compenser cette hausse.



Graphique 94 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BN2.1a: Bürogebäude-Neubau, relativ hoher Fensteranteil (50%), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G4), keine mechanische Lüftungsanlage (Fensterlüftung), keine Kühlung, Metallfassade, ohne Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser M0 und M7a und folgende), Fenster Typ 2 (Ug=1.1, g=0.52, Tvis=0.73, Uf=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

A la différence du cas ci-dessus, le cas BN 2.2a permet une substitution totale du combustible en même temps qu'un gain net d'efficacité électrique et qu'une baisse des coûts annuels (Graphique 95). Cette différence dans le résultat net est essentiellement due au fait que les coûts de la ventilation sont déjà pris en compte dans la situation de référence et qu'on a supposé une amélioration dans les vitrages des fenêtres, dont l'impact sur les coûts est plus important qu'une amélioration dans les cadres des fenêtres, conformément à l'hypothèse émise plus haut pour le cas BN2.1a. Les mesures d'efficacité concernant l'éclairage dépassent à peine le seuil de rentabilité et provoquent une légère diminution des coûts annuels (M3 à M4). Une évacuation de l'air vicié avec PAC est légèrement plus onéreuse qu'une ventilation avec RC (en tout cas si l'on n'a pas prévu de coûts pour la distribution d'air dans les pièces, ce qui est le cas ici), mais la différence est minime. Dans le présent cas BN2.2, on

constate globalement une substitution totale de la demande de combustibles (soit 150 MJ/m²a) et (malgré tout) une réduction de l'indice énergétique électricité de 300 à 180 MJ/m²a.



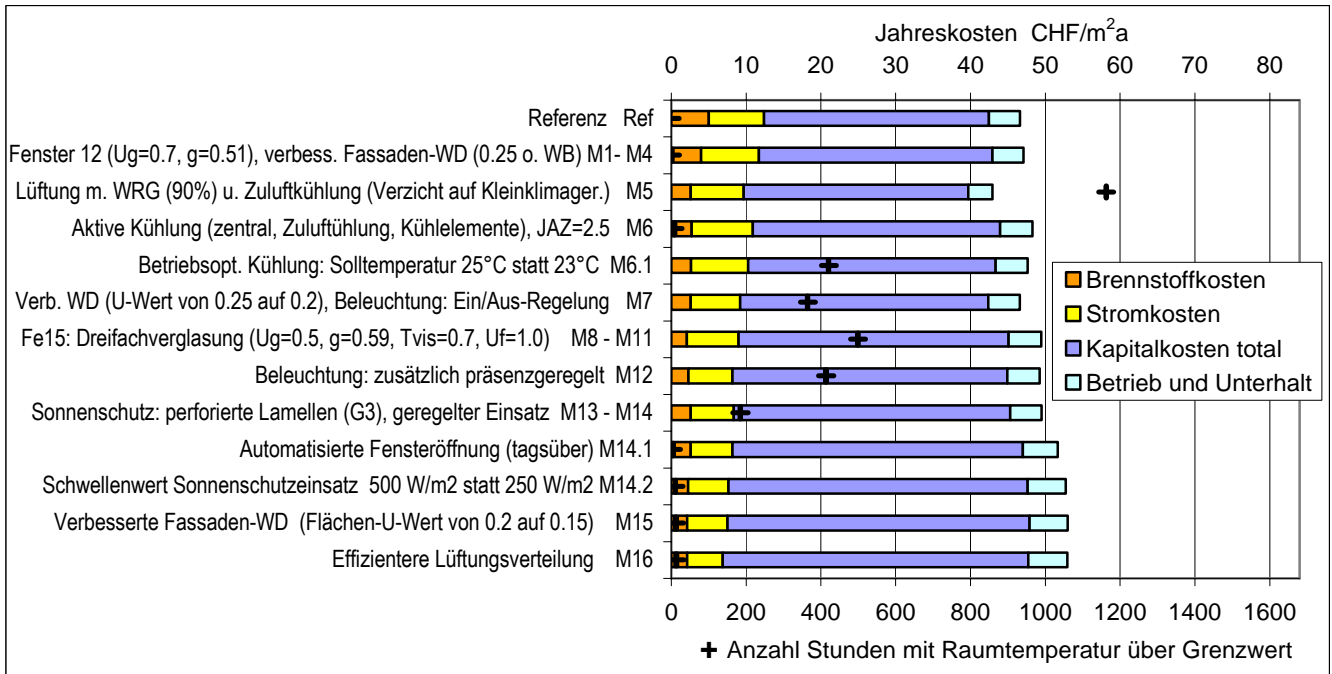
Graphique 95 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BN2.2a: Bürogebäude mit relativ hohem Fensteranteil (50%) und Metallfassade, ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), hohe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G2), mechanische Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (JAZ=2.5, Solltemperatur=25°C), Fenstertyp 2 (Ug=1.1, g=0.52, Tvis=0.73), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 13.5 W/m²

S'agissant du cas BN2.3, l'indice énergétique chaleur dans la situation de référence est d'environ 260 MJ/m²a. Avec des mesures modestes affectant l'enveloppe du bâtiment (isolation thermique renforcée, valeur U moindre pour les fenêtres), cet indice se réduit de 50 MJ/m²a, tout en maintenant des coûts annuels constants (M1 à M4, Graphique 96). L'installation d'une ventilation avec RC (M5) peut générer une nouvelle réduction d'environ 70 MJ/m²a, mais les coûts annuels augmenteraient (la baisse des coûts de combustible est plus ou moins compensée par l'augmentation des coûts d'électricité¹², si bien que le «solde est tout à fait insuffisant» pour amortir les coûts de capital), si l'on ne renonçait pas dans le même temps aux petits climatiseurs. Avec le seul refroidissement de l'air frais, les critères de confort ne sont néanmoins pas respectés, raison pour laquelle on a prévu une distribution de froid hydraulique et des éléments réfrigérants dans les pièces pour M6, ce qui implique à nouveau un surcoût. Les améliorations apportées aux cadres de fenêtres et le système automatique d'aération par les fenêtres entraînent également un accroissement des coûts nets.

Indirectement, une valeur seuil plus élevée pour la protection solaire engendre aussi un surcoût (M14.2) à cause de la capacité frigorifique nettement supérieure (42 kW_{th} au lieu de 30 kW_{th}). Une valeur seuil plus élevée tout au long de l'année (protection solaire seulement à partir de 500 W/m² au lieu de 250 W/m²) n'est donc pas problématique pour des raisons énergétiques ou de coûts énergétiques (la consommation nette d'électricité ne change guère, car l'augmentation de la consommation d'énergie de refroidissement compense quasiment la réduction des besoins d'éclairage avec un réglage lié à la lumière du jour, et la consommation de combustible recule même de 20 MJ/m²a), mais à cause des coûts de capital plus élevés pour le froid. On en déduit donc que la valeur seuil pour la protection solaire doit être fixée différemment selon les saisons: une valeur faible pendant la période de plein été, qui détermine la capacité frigorifique maximale, permet d'économiser

¹² Ceci est dû à deux facteurs: d'une part, le RC a un coefficient de performance de 90%, mais la réduction de la demande d'énergie thermique est nettement inférieure, car le renouvellement de l'air de la ventilation est beaucoup plus élevé que celui de l'aération par les fenêtres; d'autre part, le prix du courant est environ deux fois et demie supérieur à celui du combustible.

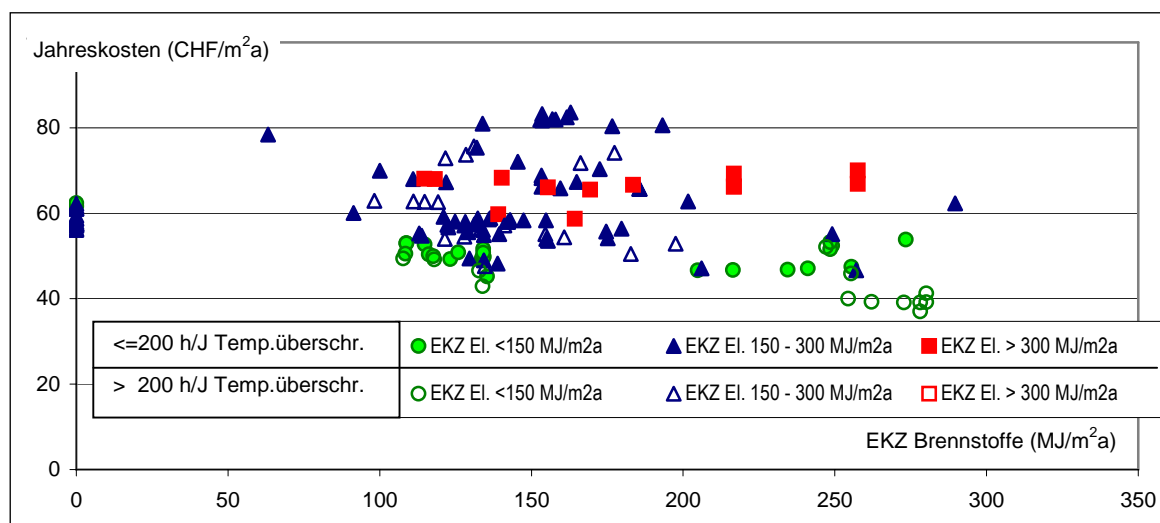
des coûts de capital, tandis qu'une valeur plus élevée pendant les autres périodes réduit la demande énergétique pour l'éclairage et la chaleur et – peut-être la chose la plus importante pour les utilisateurs du bâtiment – améliore la relation avec l'extérieur.



Graphique 96 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BN2.2a: Bürogebäude mit relativ hohem Fensteranteil (50%) und Metallfassade, ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), hohe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G2), mechanische Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (JAZ=2.5, Solltemperatur=25°C), Fenstertyp 2 (Ug=1.1, g=0.52, Tvis=0.73), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 13.5 W/m²

Conclusion: Avec des mesures compensatoires appropriées au niveau de la technique et de l'entreprise, le conflit d'objectifs entre l'efficacité énergétique et le confort se résout aisément: dans le même temps, on peut atteindre une efficacité élevée tant pour le combustible que pour l'électricité, ainsi qu'un confort accru (voir également Graphique 19, p. 110 et Graphique 28, p. 122), ceci avec des coûts annuels comparativement moindres. Les coûts annuels dépendent beaucoup moins du niveau d'efficacité énergétique que du niveau de confort souhaité. Dans les cas de faible IDE électricité, les coûts annuels sont même inférieurs à ceux où l'IDE électricité est moyen ou élevé (Graphique 97), cela pour les deux différents niveaux de confort (moins ou plus de 200 h selon la hauteur de la température ambiante souhaitée). Pour un IDE électricité et un niveau de confort donnés, l'évolution des coûts annuels en fonction de l'IDE combustibles moindre est plus ou moins constante, c'est-à-dire que les mesures en question sont – dans le contexte du bâtiment – rentables (moyennant un taux d'intérêt réel de 3%, un prix du combustible de 7 ct./kWh, un prix du courant de 17 ct./kWh).

Les Graphiques 181 et 183 en annexe donnent un aperçu des coûts annuels, de l'indice énergétique électricité et du nombre d'heures de surchauffe en fonction de l'IDE combustibles.



Graphique 97 Coûts annuels en fonction de l'IDE combustibles pour différents IDE électricité et niveaux de confort (à l'aune du nombre d'heures de température élevée dans les pièces plein sud)

6.2 Rénovation des bâtiments existants

Comme base de comparaison pour les paquets de mesures de rénovation, on distingue entre:

- l'état actuel et les dépenses courantes pour l'énergie et éventuellement l'entretien
- les rénovations du bâtiment et des installations dans le cycle de rénovation. Un état énergétique inchangé en fonction des éléments de construction et des types d'installations et/ou une rénovation avec améliorations énergétiques servent ici de base de comparaison, ce qui est indiqué pour chaque cas ci-après.

Les Graphiques 182 et 184 en annexe donnent un aperçu des coûts annuels, de l'indice énergétique électricité et du nombre d'heures de surchauffe en fonction de l'IDE combustibles.

Le premier exemple traité concerne la rénovation d'un immeuble de bureaux de construction récente (année de construction après le milieu des années 1970, BB4). Dans la première variante BB41, on estime que la façade (métallique) est encore en bon état et ne doit pas encore être rénovée. C'est pourquoi la situation de référence et les mesures d'efficacité énergétique et de rénovation se focalisent sur le reste de l'enveloppe du bâtiment (fenêtres, protection solaire) et sur les installations du bâtiment.

S'agissant de l'enveloppe du bâtiment, on suppose qu'en l'état actuel, des travaux d'entretien sont nécessaires pour les fenêtres métalliques existantes. Mais en général, l'entretien de fenêtres métalliques est peu onéreux, puisqu'il s'agit de produits solides à longue durée de vie (20 CHF/m²). D'autre part, la qualité énergétique des fenêtres métalliques de cette époque est souvent peu satisfaisante, si bien qu'il faut envisager leur remplacement. Concernant les installations du bâtiment dans la situation de référence «Réf», on prévoit une rénovation des installations de ventilation et de climatisation, mais sans modifications conceptuelles ni améliorations énergétiques. On a notamment tablé sur les mêmes taux de renouvellement de l'air et les mêmes coefficients de performance annuels. Il faut donc faire une différence entre l'état actuel et la situation de référence Réf, notamment en ce qui concerne les coûts de capital (cf. Graphique 98): cette différence de 16 CHF/m²a est considérée comme importante.

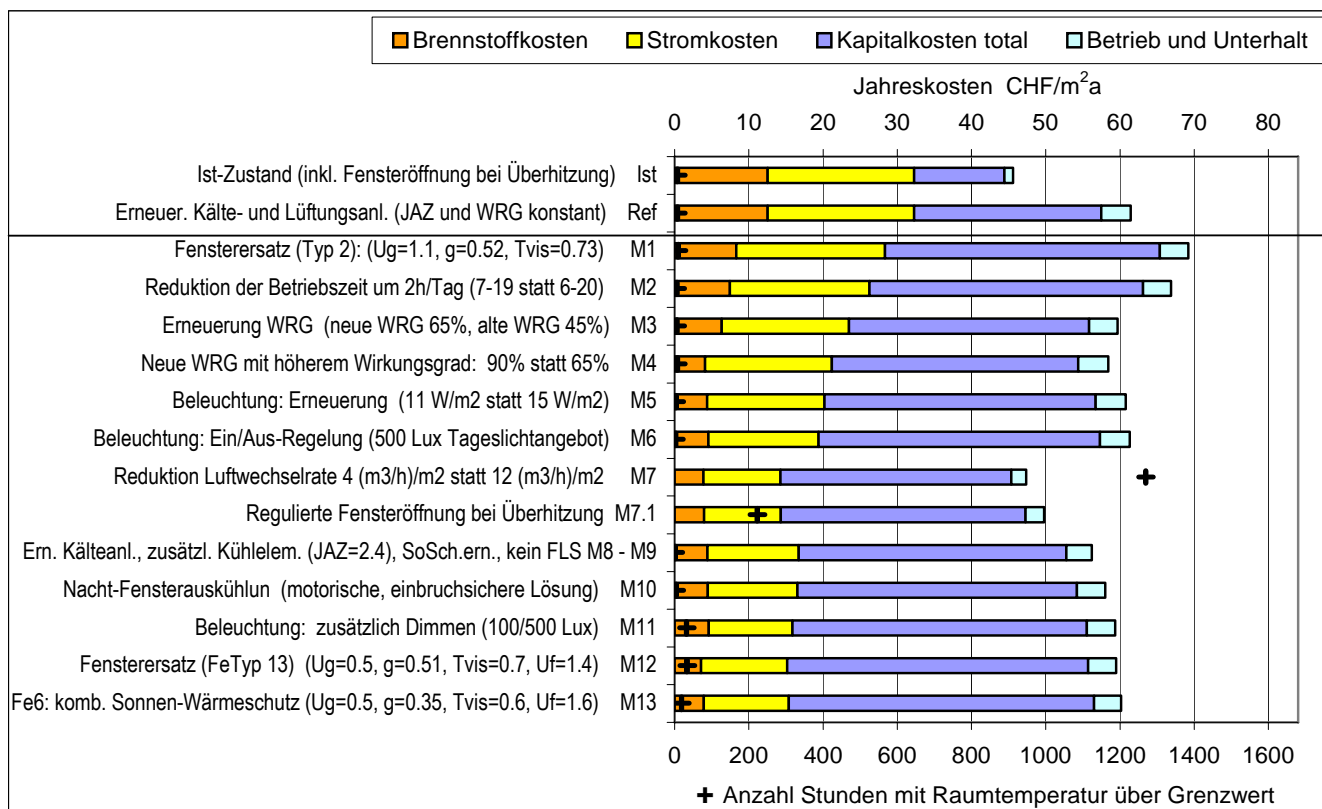
Le remplacement de fenêtres métalliques sur une façade de métal est devisé à plus de $800 \text{ CHF/m}^2_{\text{fenêtre}}$ (y. c. échafaudage, démontage/élimination, montage et tous les travaux annexes, cf. Graphique 36, p. 146). Même en évaluant les surcoûts effectifs à seulement 650 CHF/m^2 , les coûts annuels nets s'élèvent à quelque $8 \text{ CHF/m}^2_{\text{SRE}}$ a, voir Graphique 98, M1. Dans le présent exemple, le remplacement des fenêtres pour des raisons purement énergétiques n'est donc pas rentable par rapport aux travaux d'entretien (contrairement à des fenêtres en bois, où l'entretien peut s'avérer nettement plus onéreux et le remplacement nettement meilleur marché, parce que la pose est souvent plus simple, voir par ex. BB1 ci-après).

Pour ce type de bâtiments, la ventilation consomme une part importante de l'énergie, tant thermique (260 sur $640 \text{ MJ/m}^2\text{a}$, soit 40%) qu'électrique (160 sur $410 \text{ MJ/m}^2\text{a}$, soit 40%, ou 50% en ajoutant le courant consacré au refroidissement de l'air frais, ceci en raison des taux élevés de renouvellement de l'air et des pertes de charges, ainsi que des coefficients de performance moindres et des modes de fonctionnement non coordonnés. Les mesures touchant à ce secteur sont donc d'autant plus importantes. Grâce aux mesures d'optimisation énergétique (OE) prises dans les bâtiments de cette époque, la demande énergétique entraîne souvent une réduction des coûts nets, c'est-à-dire que les coûts des mesures OE sont plus que compensés par la diminution des coûts énergétiques (M2 par rapport à M1). Si l'on choisit un coefficient de performance plus élevé lors de la rénovation d'une installation de RC, il n'en résulte pas non plus de surcoûts, à condition d'opter pour un équipement de haute performance (coefficient de performance thermique de 80% à 90%) (selon la comparaison entre M3 et M4, une installation avec un rendement de 65% n'est pas indiquée tant au niveau énergétique qu'au niveau des coûts). Ces constatations sont valables à condition que la nouvelle installation de RC ait les mêmes dimensions que l'ancienne. Si, dans le cadre de la rénovation, on adapte le renouvellement de l'air aux exigences de l'hygiène de l'air, (soit une forte diminution), on peut utiliser un équipement d'une capacité moindre, ce qui génère d'autres économies importantes sur les coûts de capital. (M7), même en prenant en compte certains travaux d'adaptation (30% des coûts du RC).

La réduction significative du taux de renouvellement de l'air fait toutefois apparaître un important problème de surchauffe (l'air frais est refroidi tant dans la situation de référence qu'après la rénovation de l'aération, car la capacité frigorifique est trop basse (M7) si le taux de renouvellement de l'air de $4 \text{ (m}^3\text{/h)/m}^2$ est adapté aux exigences de l'hygiène de l'air. On peut partiellement remédier à cette aggravation (M5) grâce à une modernisation de l'éclairage ou à un système automatisé d'aération par les fenêtres (M7.1), ou à des dispositifs ayant une fonction identique, par ex. ouvertures d'aération automatiques. Si cela s'avère impossible dans un cas isolé, on peut compenser intégralement la diminution de confort en installant une meilleure protection solaire à réglage automatique et une distribution de froid hydraulique avec refroidissement de l'air pulsé ou plafonds réfrigérants (en plus du refroidissement de l'air frais déjà existant). Il en résulte alors des surcoûts par rapport à M7, tandis que les coûts annuels nets sont inférieurs comparés à la situation antérieure à l'adaptation des taux de renouvellement de l'air (M9 comparativement à M6 ou à M1). Les autres mesures d'optimisation énergétique telles que production et distribution de froid de haute performance ou la réduction de la consommation d'énergie de refroidissement (M9.1 à M10), l'utilisation de fenêtres avec une valeur U moindre (M12 et M13), provoquent une légère augmentation des coûts nets à partir de M9.

Interactions entre les coûts et les paquets de mesures: Lors des présents calculs, on a pris en compte le fait que les mesures concernant l'enveloppe et les installations du bâtiment exigeaient une puissance moindre et donc que la rénovation des installations de production concernées (production de chaleur et de froid) permettait des économies de coûts, à condition de réaliser toutes les mesures en question simultanément ou de rénover les équipements de production par étapes et selon leur importance au niveau consommation. Par exemple, la puissance thermique requise diminue facilement de 1000 kW à 300 kW , soit d'environ 70% (on n'a pas tenu compte ici du surdimensionnement des anciennes installations). En renouvelant le chauffage après ou en même temps que les mesures dont il est question ici, on peut réduire les coûts d'investissement de plus de

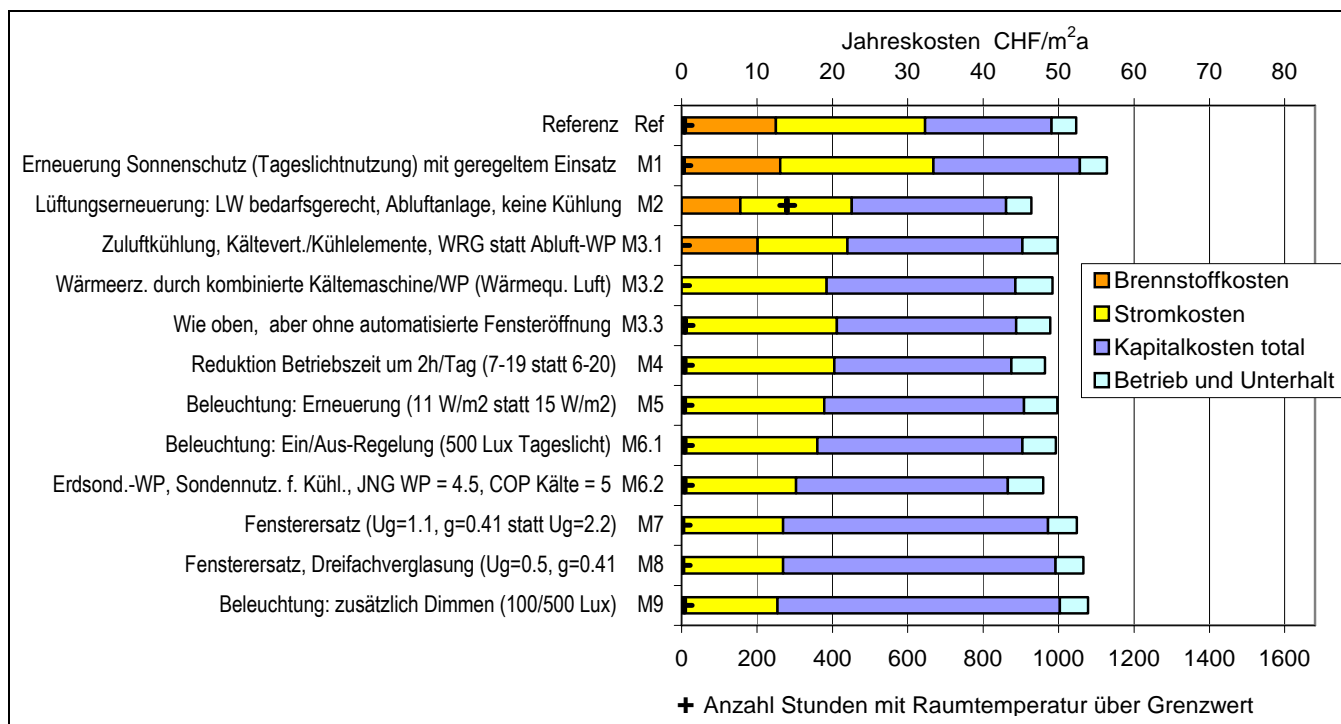
20 CHF/m²_{SRE} (environ 50% des frais d'installation) ou les coûts de capital et d'entretien de 2.5 CHF/m²a. Si toutes les mesures ne sont pas réalisées simultanément, il faut additionner ces montants répartis sur les différentes mesures, de sorte que les coûts de la dernière mesure soient augmentés de ces montants. La capacité frigorifique requise diminue également de manière significative (ceci malgré l'installation supplémentaire de plafonds réfrigérants), soit de 660 kW_{froid} à 270 kW_{froid}, ce qui équivaut à une baisse de 60%. Cela provoque une réduction des coûts d'investissement d'environ 50 CHF/m²_{SRE} et à une réduction des coûts de capital et d'entretien d'au moins 5 CHF/m²a. Si la nouvelle installation a un COP d'interprétation plus élevé, la puissance électrique relative peut encore être réduite.



Graphique 98 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BB4.1a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode ab 1976, 8600 m², rel. hoher Fensteranteil (50%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser M7.1 und M10 folgende), Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand 1.3 W/m²K (ohne WB), hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel: 12 m³/h/m²) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenster Typ 1 (Ug=2.2, g=0.7, Tvis=0.8, Uf=1.8)

Conclusion sur le cas BB4.1 (Graphique 98): Globalement, le train de mesures permet de réaliser un gain important d'efficacité énergétique, soit une réduction de l'énergie de chauffage de 440 MJ/m²a (-70%) et dans le même temps une réduction de la consommation d'électricité de 180 MJ/m²a (-42%). Par rapport à l'état actuel, les coûts annuels nets se montent au total à 15 CHF/m²a, l'essentiel de ces coûts étant imputable à la rénovation de la ventilation, au remplacement des fenêtres et au refroidissement supplémentaire. Ces coûts créent évidemment les valeurs à neuf correspondantes, car l'état des installations est qualifié de «neuf» et non plus d'«ancien». La dernière mesure citée est plutôt une mesure de confort, comme d'ailleurs le remplacement des fenêtres, qui accroît également le confort, en particulier si les places de travail sont à proximité des fenêtres. Par rapport à la situation de référence, on note une légère réduction des coûts annuels d'environ 2 CHF/m²a.

S'agissant du **cas BB4.2**, on suppose que, dans la situation de référence «Réf», les installations existantes de production de froid et de chaleur (fossile) doivent être renouvelées. Les coûts d'investissement correspondants s'élèvent à 160 CHF/m² et les coûts de capital à environ 10 CHF/m²a (Graphique 99); sans tabler sur une amélioration énergétique (COPA=2.0). Compte tenu du renouvellement élevé de l'air avant comme après la rénovation, il n'y a aucun problème de surchauffe. Dans la situation de référence, on a encore prévu des coûts de remise en état pour les fenêtres et la protection solaire de quelque 130 CHF/m² éléments de construction*



Graphique 99 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BB4.2a: Bürogebäude der Bauperiode 1976-2000, 8600 m², relativ hoher Fensteranteil (50%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser M2 bis M3.2) Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne WB 1.3 W/m²K, hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenstertyp 1 (Ug=2.2, g=0.7, Tvis=0.8, Uf=1.8)

La mesure M2 comprend la rénovation de la ventilation (inefficace), remplacée par une installation avec l'air évacué. Cela permet de supprimer les anciens canaux d'air frais et l'espace ainsi libéré peut être partiellement utilisé pour de plus grands canaux d'évacuation de l'air. Pour compléter l'équipement, il faut encore prévoir des ouvertures d'aération sur la façade. Concernant la mesure M2 – pour cause d'illustration – on renonce à un refroidissement¹³. Il en résulte aussi une baisse considérable des coûts de capital. En revanche, il faut accepter une baisse de confort. Comparativement, la mesure M3.1 prévoit la rénovation complète de la distribution d'air et l'utilisation d'une ventilation «classique» avec RC. En plus, on installe un refroidissement de l'air frais et une distribution de froid hydraulique, ce qui génère un surcoût net d'environ 3 CHF/m²a (soit le prix à payer pour un confort accru).

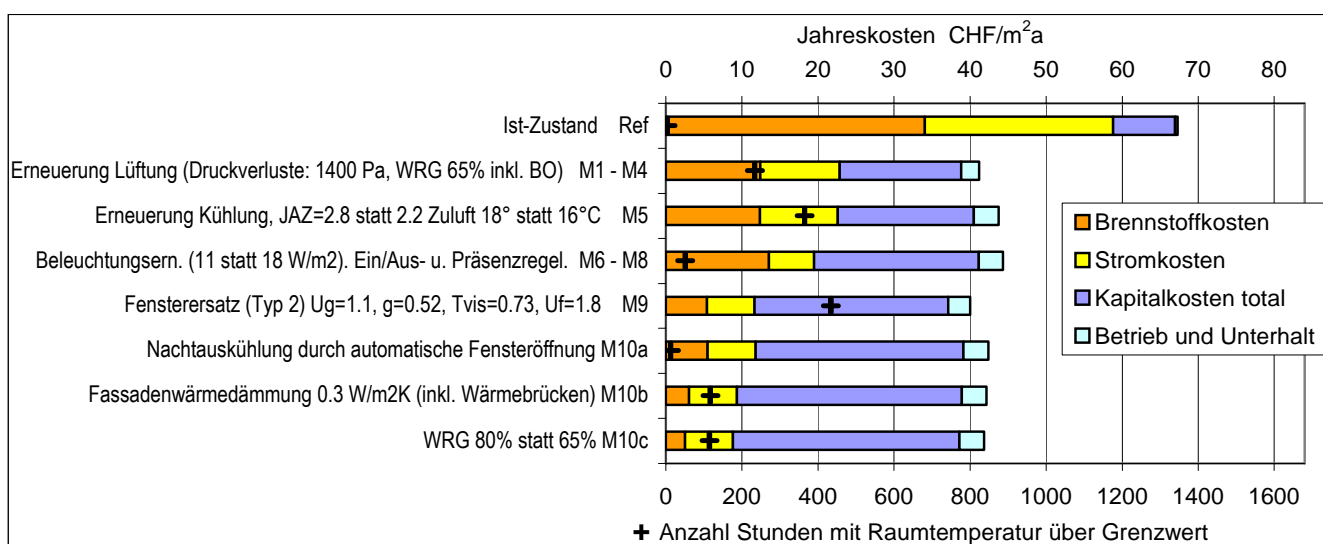
En combinant la production de froid et la production de chaleur (une seule installation servant de machine frigorifique et de pompe à chaleur), on peut remplacer intégralement la demande de combustibles et ceci, moyennant une augmentation insignifiante des coûts annuels (M3.2). Une

¹³ Le dispositif de parapet combiné avec RC et refroidissement de l'air frais et de l'air pulsé intégré fait l'objet de BB2.

planification et conception adéquate (par ex. free cooling par sondes terrestres) avec les COPA supérieurs correspondants peuvent même provoquer une réduction nette des coûts (M6.2). Par rapport à l'entretien courant, le renouvellement complet de l'éclairage (M5) entraîne un surcoût net d'environ 2 CHF/m²a (la plus-value du nouvel éclairage en tant que telle n'est pas prise en compte). Par contre, le surcoût pour le réglage de l'éclairage peut être plus ou moins compensé par la réduction des coûts d'électricité (M6). Le surcoût s'avère plus important pour le remplacement des fenêtres que pour la modernisation de l'éclairage, car on suppose en l'occurrence que le remplacement de fenêtres métalliques sur une façade de métal revient relativement cher (650 CHF/m² travaux d'adaptation et élimination inclus, voir M7).

Dans la situation de référence **pour le type de bâtiments BB3.1a**, on prévoit la rénovation des fenêtres (80 CHF/m²) et des façades (35 CHF/m²), ainsi que la modernisation de l'éclairage (25 CHF/m²), mais sans amélioration énergétique. L'état actuel se caractérise par une ancienne ventilation sans RC avec pertes de charges élevées et renouvellement de l'air élevé (deux fois plus élevé que les exigences de l'hygiène de l'air, soit 8 (m³/h)/m²).

Une forte réduction de l'énergie et des coûts est donc possible dans le domaine de la ventilation (Graphique 100, M1-M4). Bien que la situation initiale telle que représentée ici (taux élevé de renouvellement de l'air, pertes de charges élevées, pas de RC, fonctionnement 24 heures sur 24) devienne de plus en plus rare dans la réalité, le présent exemple démontre clairement l'importance que peuvent revêtir les mesures OE et de rénovation dans le domaine de la ventilation. La réduction des taux de renouvellement de l'air et/ou des périodes de fonctionnement de la ventilation agit sur deux plans: il y a d'une part la réduction d'énergie électrique utilisée pour l'air pulsé et d'autre part, celle de l'énergie consacrée au réchauffement ou au refroidissement de l'air extérieur. L'exemple montre par ailleurs que la réduction des taux de renouvellement de l'air, la pose d'un RC et l'élévation de la température de l'air frais peuvent engendrer des problèmes de surchauffe (M5). Cela peut néanmoins être compensé par d'autres mesures, en l'occurrence des mesures d'éclairage qui sont au seuil de la rentabilité (M6 à M8) et qui, en même temps, peuvent aussi accroître le confort de manière significative (de près de 400 h/an avec un dépassement de la valeur seuil de la température de moins de 50 h/an).



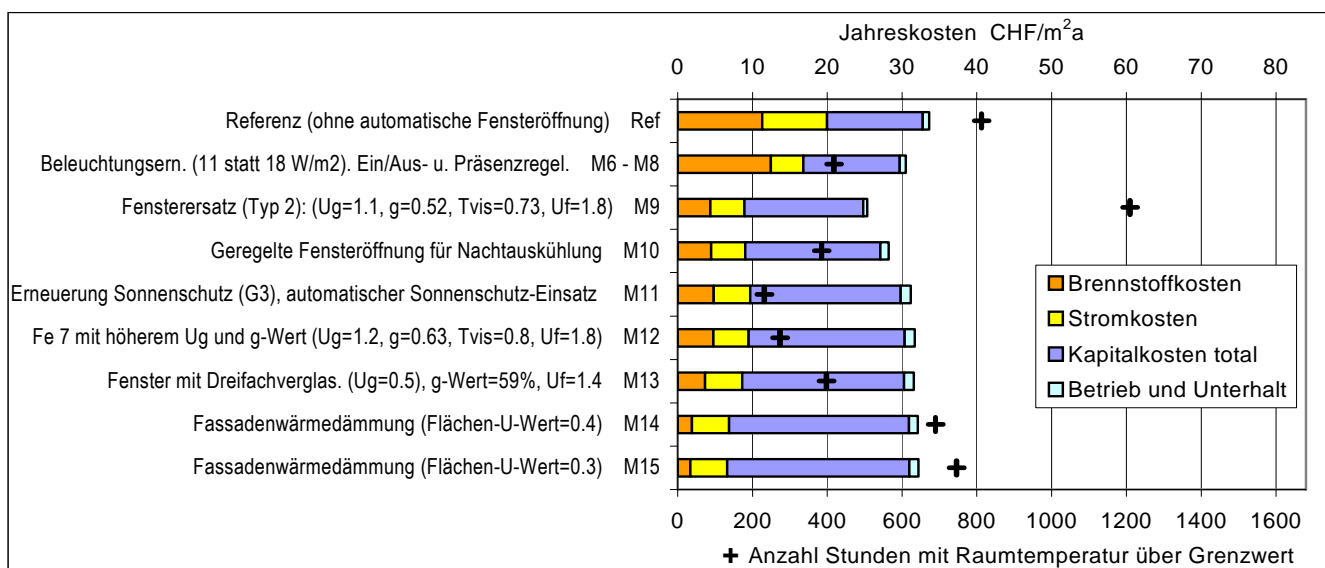
Graphique 100 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BB3.1a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1960-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Werte ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, alte mechanische Lüftung ohne WRG mit hohen Druckverlusten (2300 Pa), Kühlung der Zuluft, Luftwechsel doppelt so hoch wie lufthygienisch erforderlich, 24h/Tag, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Mauerwerk, Fenster Typ 0 (Ug=3.0, g=0.75, Tvis=0.82, Uf=2.2)

Le remplacement des fenêtres doit être considéré comme rentable (M9) en comparaison de la maintenance supposée ici avec des coûts de 80 CHF/m². Le surcoût d'une fenêtre avec une valeur g spécialement élevée (supérieure à la valeur standard habituelle pour une valeur U déterminée) ne peut juste pas être amorti (M12). Dans le présent exemple, le refroidissement nocturne par les fenêtres améliore le confort, mais augmente la demande de combustibles et d'électricité, si bien qu'il subsiste obligatoirement un surcoût net, car les coûts énergétiques (2-3 CHF/m²a) s'additionnent aux coûts d'investissements. L'isolation thermique finale de la façade peut être réalisée à des coûts annuels constants, car les isolations thermiques des façades en maçonnerie ou en béton sont rentables par rapport à la rénovation supposée. Ceci est valable avec un prix de l'énergie de 5 à 6 ct./kWh pour les épaisseurs d'isolation actuelles (12 cm, U = 0.25-0.3), en partie également pour des valeurs supérieures (on a supposé ici 7 ct./kWh).

Le cas BB3 met en lumière deux phénomènes: dans les anciens bâtiments, les besoins en chaleur et en électricité peuvent être considérablement réduits parallèlement à une réduction des coûts annuels totaux. Si le confort diminue avec certaines mesures, cela peut être compensé par des mesures compensatoires et plus ou moins neutres au niveau des coûts.

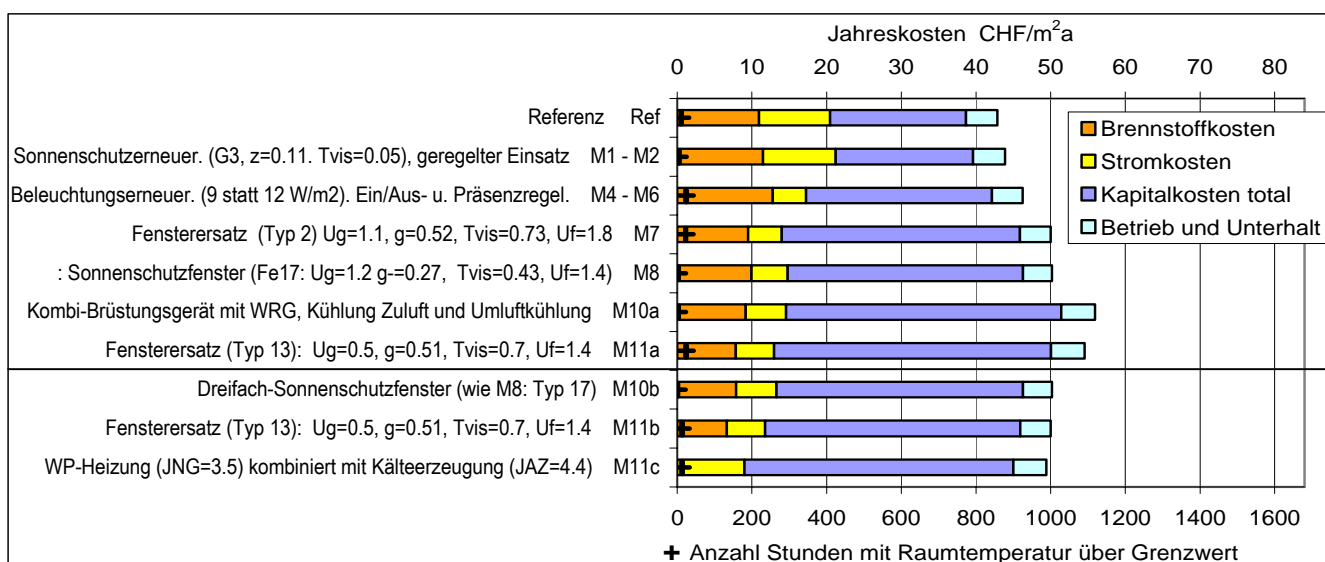
Contrairement au type de bâtiments précédent, le type de bâtiments suivant BB3.2a concerne un simple immeuble de bureaux sans ventilation ni refroidissement. Malgré les charges internes moindres, la situation de référence se caractérise par un nombre considérable d'heures de surchauffe (cf. Graphique 101). Dans la situation de référence, on prévoit d'une part la rénovation du chauffage et d'autre part la modernisation de l'éclairage, mais sans amélioration énergétique. Cette hypothèse est tout à fait plausible, comme l'ont démontré les expériences de la Ville de Zurich. L'évaluation de certaines modernisations de l'éclairage dans les bâtiments scolaires a montré que la puissance installée d'éclairage était même plus élevée après la modernisation que dans la situation initiale.

Le renouvellement de l'éclairage permet de diminuer sensiblement la consommation de courant et les charges thermiques internes correspondantes, ce qui génère un confort nettement supérieur (paquet M6-M8) et qui réduit les coûts annuels d'environ 3 CHF/m²a (pour des coûts d'investissement supplémentaires estimés à 45 CHF/m²; comparativement aux dépenses courantes pour l'énergie ou aux mesures de rénovation superficielles et peu onéreuses, il résulterait un léger surcoût net de <1-2 CHF/m²a). Si le remplacement des fenêtres réduit la consommation de combustibles, la puissance thermique demandée et les coûts annuels nets (entre autres à cause de la réduction des coûts de capital pour la rénovation du chauffage de 2 CHF/m²a), il réduit à néant l'augmentation de confort mentionnée (M9), à moins que le remplacement des fenêtres soit complété par un système automatique d'aération par les fenêtres (M10) et une rénovation de la protection solaire (M11). Les mesures renforcées d'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment peuvent encore réduire la consommation de combustibles (moyennant un surcoût relativement moindre), tout en augmentant à nouveau la surchauffe (M12 à M15). D'autres mesures permettraient de compenser cette surchauffe, par ex. une aération automatique par les fenêtres, également pendant la journée.



Graphique 101 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BB3.2a: Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), alte Fenster (hohe Lüftungsverluste durch Undichtigkeit), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten durch Geräte und Personen, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, ohne mechanische Lüftung, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Fenster Typ 0 (Ug=3.0, g=0.75, Tvis=0.82, Uf=2.2)

S'agissant du cas BB2 étudié ci-dessous (immeuble de bureaux existant, avec charges internes moindres et une faible part de vitrages), la consommation d'énergie de refroidissement est assez faible malgré l'utilisation de petits climatiseurs (22 MJ/m²a). La réduction des coûts énergétiques théoriquement atteignable avec des mesures de protection contre la surchauffe est donc faible et ces mesures entraînent un surcoût net (Graphique 102).



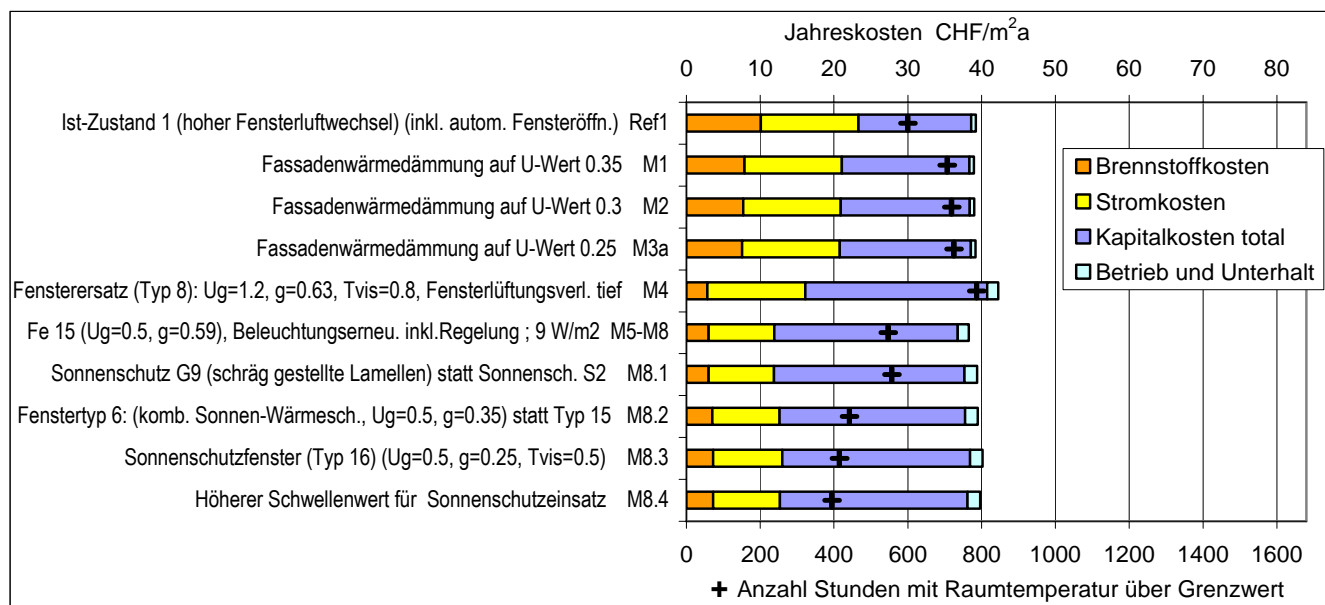
Graphique 102 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BB2a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 1150 m², eher geringer Fensteranteil (35%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Leichtbau, U-Wert Aussenwand 1.5 W/m²K (Werte ohne Wärmebrücken): Fassade energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional), geringe interne Lasten, Beleuchtung (15 W/m²), Sonnenschutz aussen (Flachlamelle, G1), Kleinklimageräte, Solltemperatur 23°C, Fenster Typ 1 (Ug=2.2, g=0.7, Tvis=0.8, Uf=1.8)

Si l'éclairage ne doit pas être de toute façon renouvelé (ce qu'on a supposé ici), le remplacement d'un éclairage au plafond par des lampes sur pied n'est pas rentable. Le gain d'efficacité énergétique suite à la réduction de la consommation d'électricité est toutefois remarquable. Le remplacement des fenêtres (M7) provoque certes une réduction de la demande de chauffage, mais n'est pas rentable dans cet exemple (moyennant 80 CHF/m² de coûts de maintenance dans la situation de référence, les coûts de remplacement des fenêtres se montent tout de même à 600 CHF/m²), ceci au contraire du cas précédent BB3.1a, M9 (Graphique 110). La fenêtre suivante, avec verres antisolaires et cadre de valeur U supérieure, augmente les besoins en chaleur (compte tenu des gains d'énergie solaire moindres) et la demande électrique (à cause des besoins d'éclairage plus élevés).

S'agissant de l'architecture et du type de construction, le cas BB1 est relativement proche d'un bâtiment d'habitation. Mais on a supposé que les charges internes dues aux appareils et aux personnes ainsi qu'à l'éclairage étaient élevées. De ce fait, on note un immense problème de surchauffe dans la situation de référence, malgré une part de surfaces vitrées relativement faible; même avec une ouverture automatique des fenêtres lors de surchauffe, la valeur seuil de la température ambiante est encore dépassée pendant 600 h/an. Ci-après, dans la situation de référence, on fait la distinction entre les fenêtres relativement peu étanches (BB1.1) et celles relativement étanches (BB1.2 et BB1.3 en annexe, BB1.4). Dans les cas BB1.1 à BB1.3, on a prévu l'ouverture automatique des fenêtres lors de surchauffe.

Dans la situation de référence des cas BB1.1 à BB1.4, on a tablé sur une rénovation des façades pour 35 CHF/m², une rénovation des fenêtres pour 100 CHF/m² et une modernisation de l'éclairage sans efficacité énergétique pour 80 CHF/m².

L'isolation thermique standard des façades (0.35 W/m²K) comme l'IT renforcée (réduction de 0.1 W/m²K supplémentaire) provoquent une réduction insignifiante des coûts annuels (cf. Graphique 103, M1 à M3a). Le remplacement des fenêtres avec un verre thermo-isolant (U_g=1.2 W/m²K) et une valeur g relativement élevée (63%) augmente les coûts nets dans la situation initiale des fenêtres non étanches (cf. M4 avec M3a). Ces mesures réduisent massivement les besoins en chaleur, tout en aggravant encore le problème de surchauffe. Cela peut être (sur)compensé par la modernisation de l'éclairage avec une réduction des coûts de 3-4 CHF/m²a (M5-M8).

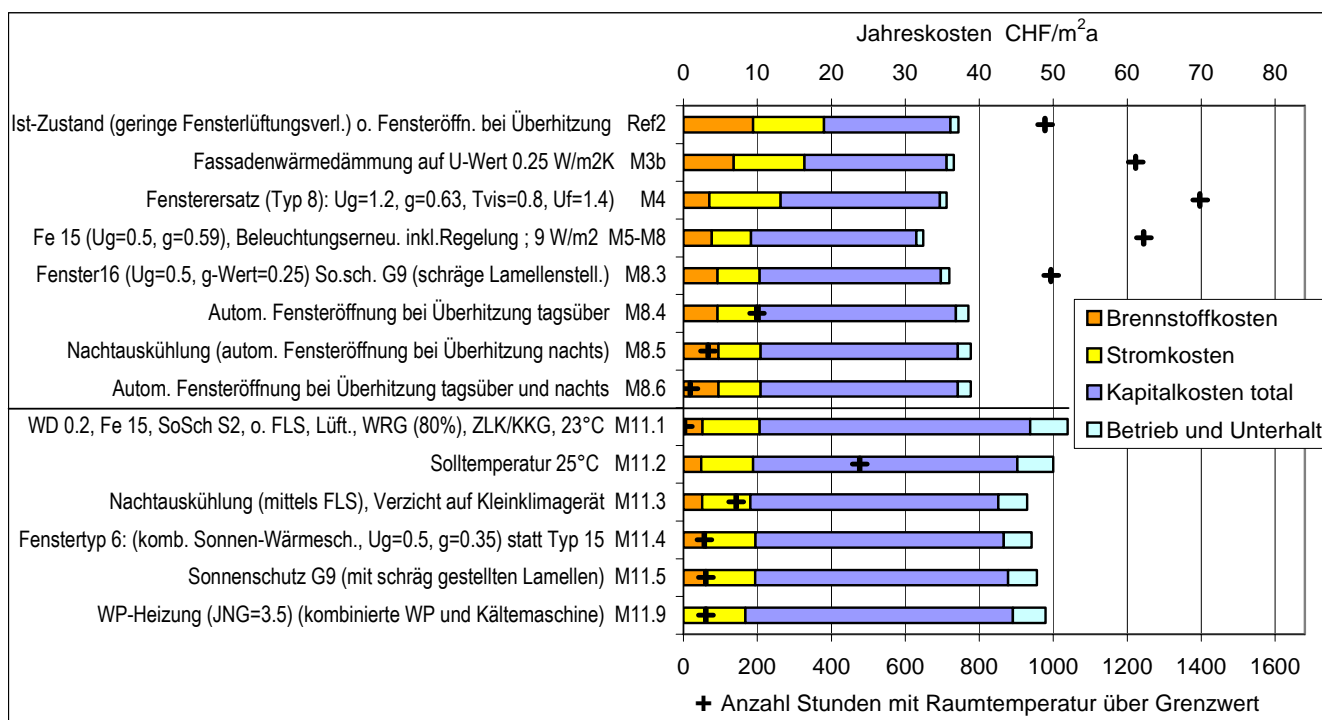


Graphique 103 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BB1.1: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², hohe interne Lasten, geringer Fensteranteil (25%). Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (Ug=3.0, g=0.75, Tvis=0.82, Uf=2.2), Lüftungsverluste durch bestehende Fenster hoch, Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollläden aussen (S2), keine Kühlung.

S'agissant de l'électricité, les mesures d'éclairage réduisent l'indice énergétique électricité d'environ 90 MJ/m²a (de 280 à 190 MJ/m²a). Par rapport aux coûts d'entretien et de maintenance de 20 CHF/m², les coûts d'investissement de la modernisation de l'éclairage de 100 CHF/m² génèrent un surcoût net moindre de 0.5 CHF/m²a. Concernant les bénéfiques, le renouvellement de l'éclairage améliore toutefois sensiblement le confort; le nombre d'heures d'inconfort diminue d'environ un tiers. Les mesures affectant les autres charges internes (appareils, ordinateurs, écrans, imprimantes, etc.) peuvent entraîner une baisse substantielle de la consommation globale d'électricité, car elles s'élèvent tout de même à 120 MJ/m²a, et ces améliorations relatives ont un fort impact absolu.

Conclusion sur BB1.1: Moyennant des coûts annuels constants, on peut réaliser un gain d'efficacité énergétique de 330 MJ/m²a (-64%) pour les combustibles et de 90 MJ/m²a (-32%) pour l'électricité, ainsi qu'une amélioration sensible du confort. Il faut toutefois relever que les mesures envisagées sont insuffisantes et qu'il en faudrait d'autres pour satisfaire aux exigences.

Pour le cas BB1.4, on peut également procéder à l'isolation thermique des façades, au remplacement des fenêtres et à la modernisation de l'éclairage pour des coûts annuels constants, voire légèrement inférieurs, par rapport aux coûts de remise en état supposés (Graphique 104, jusque et avec M8.3). Mais, malgré l'utilisation de fenêtres à verres antisolaires (g=0.25) et une protection solaire avec une meilleure utilisation de la lumière du jour, le problème de surchauffe n'est toujours pas résolu (comme en l'état actuel, après avoir encore empiré entre-temps, voir M3b à M8). Si l'on admet une ouverture (optimale) des fenêtres lors de surchauffe, le niveau de confort s'accroît pour devenir plus ou moins acceptable (M8.4, environ 200 h/an), alors qu'une ouverture automatique des fenêtres, aussi pendant la nuit, permet de répondre entièrement aux besoins de confort (moyennant des coûts nets de 1 à 2 CHF/m²a).



Graphique 104 Structure des coûts annuels pour le type de bâtiments BB1.4: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (Ug=3.0, g=0.75, Tvis=0.82, Uf=2.2), Lüftungsverluste durch Fenster tief, keine Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2), „manueller“ Einsatz; keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

Si cela s'avère impossible dans un cas concret particulier ou si l'on installe des climatiseurs et une ventilation avec RC pour des questions de confort, il faut prévoir des surcoûts nettement supérieurs, comme l'alternative M11.1 (cette variante avec ventilation et refroidissement peut aussi être considérée comme nouvelle situation de référence), soit avec 13 CHF/m²a comparativement à M8.6. En choisissant une température standard moins basse (25°C au lieu de 23°C) pour le refroidissement, on peut économiser sur les coûts annuels nets, compte tenu de la réduction de la demande électrique et de la réduction de la puissance requise (au total environ 2 CHF/m²a)¹⁴. Le refroidissement nocturne par les fenêtres (avec refroidissement de l'air frais), permet de répondre aux besoins de confort sans climatiseurs (ou autres éléments réfrigérants) (M11.3), ce qui diminue encore les coûts.

Conclusion: s'agissant de la rénovation des bâtiments: les mesures d'efficacité énergétique proprement dites sont plus ou moins réalisables sans majoration de coûts ou moyennant un surcoût net modéré. Le confort thermique s'accroît considérablement pendant la saison froide et sans soleil, mais diminue sensiblement durant les périodes ensoleillées en été ou entre saisons, compte tenu de la surchauffe croissante (isolations thermiques, fenêtres). Inversement, la réduction des charges internes, en particulier suite à la modernisation de l'éclairage, augmente fortement le confort thermique. Les mesures d'hygiène de l'air ou de confort thermique au sens strict du terme (ouverture automatique des fenêtres, installation de réfrigération) ou les mesures combinées en matière d'énergie et de confort (ventilations avec RC et refroidissement de l'air frais) provoquent des hausses de coûts beaucoup plus importantes.

¹⁴ Concernant le nombre d'heures indiqué, il s'agit seulement de faibles dépassements de valeur (<1°C)

6.3 Conclusions

Les principales conclusions et principes qui en découlent figurent dans les tableaux suivants.

Règles de planification et d'investissements

- Les isolations thermiques et les fenêtres équipées de vitrages isolants sont des éléments essentiels pour les bâtiments à faible consommation d'énergie. Les mesures correspondantes sont rentables ou n'entraînent qu'un surcoût modéré (pour les épaisseurs d'isolation jusqu'à environ 20 cm ou des valeurs $U \leq 0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$).
- Les fenêtres à gain solaire (fenêtres à vitrage isolant avec valeur g supérieure par rapport au standard du marché pour un verre de valeur U donnée) ne sont pas conseillées pour les bureaux, parce qu'elles augmentent l'inconfort estival ou la consommation d'énergie de refroidissement et ne réduisent que modestement la demande de chauffage.
- Les fenêtres à verres antisolaires (avec une valeur g particulièrement basse) améliorent le confort estival, mais augmentent les besoins en chaleur (avec un régime d'utilisation de la protection solaire identique). Pour les bâtiments sans refroidissement, avec des besoins de refroidissement moindres ou avec un refroidissement très efficace, la consommation nette de courant augmente également (la hausse des besoins d'éclairage est plus forte que la réduction de l'électricité de refroidissement à cause de la transmission de lumière moindre). Dans les bâtiments avec un refroidissement inefficace ($\text{COPA} < 2$), la consommation nette de courant recule.
- Les éclairages de haute performance et les réglages d'éclairages sont des éléments essentiels pour les bâtiments à faible consommation d'énergie et à confort thermique. Les mesures correspondantes sont rentables ou n'entraînent qu'un surcoût modéré.
- Plus les charges thermiques internes (non réduisibles) sont élevées, plus un refroidissement actif devient nécessaire, afin de garder le niveau de confort requis pendant les périodes chaudes et caniculaires. Par rapport à l'absence de refroidissement actif, un refroidissement actif provoque évidemment un surcoût.
- Le refroidissement actif devrait privilégier une efficacité élevée. L'important en l'occurrence est une différence de température moindre entre l'eau de refroidissement et le postrefroidissement, c'est-à-dire un mode de fonctionnement dynamique de l'installation et de la distribution de froid (voir Wellig et al 2006). Il s'agit d'utiliser les potentiels du «froid provenant directement de l'air extérieur» (air extérieur, évaporation, sondes terrestres).
- Même dans les bâtiments refroidis, si la protection solaire ferme très bien, le danger existe que la demande électrique nette augmente, parce que la réduction de la consommation d'énergie de refroidissement (compte tenu des charges externes moindres) est dépassée par la demande induite supplémentaire pour l'éclairage, d'autant plus que les rejets de chaleur devraient être évacués par la climatisation pendant les périodes de chaleur.
- La pose d'une ventilation pour des raisons purement énergétiques est discutable. Grâce à la récupération de chaleur (ou à la PAC alimentée à l'air vicié), on peut réaliser des gains en efficacité dans la demande de chauffage, mais même en appliquant le minimum de l'hygiène de l'air, le renouvellement de l'air est généralement supérieur à celui de l'aération par les fenêtres, ce qui réduit les gains en efficacité. Par ailleurs, seules les installations très bien conçues au niveau de la consommation d'électricité, atteignent un rapport satisfaisant de substitution aux combustibles. Dans tous les cas, l'installation d'une ventilation pour des raisons purement énergétiques génère des coûts marginaux relativement élevés.
- S'agissant des ventilations existantes ou nécessaires du point de vue de l'hygiène de l'air (par ex. endroits exposés aux bruits), on veillera à ce que les pertes de charges soient aussi basses que possible (mesure directe pour les besoins en électricité concernant l'acheminement de l'air) et à ce que les ventilateurs soient très performants, afin que le rapport de substitution électricité/chaleur soit le plus favorable possible. Pour réduire les pertes, il y a par ex. le concept de la PAC alimentée à l'air vicié et les ouvertures d'aération/dispositif de parapet.

Règles de planification et d'investissements

- L'ouverture automatique des fenêtres ou les dispositifs de parapet avec ouvertures d'aération améliorent considérablement le confort. En effet, à part quelques jours de pointe, l'air extérieur, durant une grande partie des journées avec besoins de refroidissement, est plus frais que la température ambiante (avec une forte part de vitrages, le refroidissement est déjà nécessaire pendant quelques jours de janvier, et même avec une part de vitrages moyenne ou faible, la saison de refroidissement ne se limite pas aux seuls mois d'été). Cette mesure engendre des coûts annuels d'environ 10 CHF/m²a.
- Les installations de RC avec un coefficient de performance élevé (plus de 85%) impliquent des coûts d'investissement (légèrement) supérieurs, qui sont compensés par les coûts de combustibles moindres.
- Avec une bonne enveloppe du bâtiment et une distribution de chaleur à basse température, les PAC sont une bonne solution technique visant à remplacer les combustibles. Dans le domaine de puissance inférieur, les coûts annuels sont inférieurs à ceux d'un chauffage fossile.

Tableau 89 Règles de planification et d'investissements applicables aux bâtiments neufs et aux bâtiments existants

| Différenciation des cas | Règles de planification et d'investissements |
|-------------------------|--|
| Généralités | <ul style="list-style-type: none"> - Une forte densité d'occupation et partant une forte dotation en appareils génèrent des charges internes élevées. <u>Sans refroidissement actif</u> (plafonds réfrigérants, refroidissement de l'air pulsé, éléments de construction thermoactifs ou refroidissement de l'air frais), <u>il n'est pas possible de satisfaire entièrement aux exigences relatives à la protection contre la surchauffe</u> (températures élevées moins de 100 h/an) dans les pièces plein sud, même dans les bâtiments avec faible part de vitrages et avec un éclairage de haute performance. - Avec <u>un éclairage de haute performance, une très bonne protection solaire, une ouverture automatique des fenêtres ou des dispositifs de parapet</u> (refroidissement nocturne inclus) et des triples vitrages, <u>un simple refroidissement de l'air frais</u> permet d'atteindre un niveau de confort acceptable, même avec une part de vitrages élevée et une forte densité d'occupation. - Lors de <u>charges internes moindres</u> (personnes, appareils, éclairage), <u>un refroidissement passif</u> par les fenêtres et/ou avec ouvertures d'aération peut s'avérer <u>suffisant</u> (avec réglage, refroidissement nocturne inclus). - Architecture: les pièces profondes nécessitent davantage de lumière artificielle. On recommande un <u>rapport fenêtres/surface de sol entre 20% et 30%</u>. Avec des valeurs supérieures à 30%, les besoins de lumière artificielle ne peuvent quasiment plus se réduire, tandis qu'avec des valeurs inférieures à 20%, il faut prévoir une hausse rapide (ex. 15% au lieu de 20%: environ 1600 heures de pleine charge au lieu de 1100 heures de pleine charge pour 10 heures d'utilisation par jour), voir également (SIA 2003). Les <u>parts de vitrages trop élevées provoquent des charges thermiques qui varient fortement</u>, ce qui génère un confort hors normes ou des coûts d'investissements trop élevés pour l'installation de réfrigération. Par ailleurs les surfaces vitrées sont nettement plus onéreuses que les façades opaques (simples). |

| | |
|-----------------------------|---|
| Différenciation des cas | Règles de planification et d'investissements |
| Généralités | <ul style="list-style-type: none"> - Architecture: les pièces profondes nécessitent davantage de lumière artificielle. On recommande un <u>rapport fenêtres/surface de sol entre 20% et 30%</u>. Avec des valeurs supérieures à 30%, les besoins de lumière artificielle ne peuvent quasiment plus se réduire, tandis qu'avec des valeurs inférieures à 20%, il faut prévoir une hausse rapide (ex. 15% au lieu de 20%: environ 1600 heures de pleine charge au lieu de 1100 heures de pleine charge pour 10 heures d'utilisation par jour), voir également (SIA 2003). Les <u>parts de vitrages trop élevées provoquent des charges thermiques qui varient fortement</u>, ce qui génère un confort hors normes ou des coûts d'investissements trop élevés pour l'installation de réfrigération. Par ailleurs les surfaces vitrées sont nettement plus onéreuses que les façades opaques (simples). - Protection thermique de l'enveloppe du bâtiment: même pour les bâtiments avec des charges internes élevées, <u>l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment est un élément important de l'efficacité énergétique</u>. Avec des parts de vitrages relativement fortes, comme on les rencontre souvent dans les bâtiments neufs, <u>les vitrages et fenêtres de haute performance revêtent une grande importance</u> (le potentiel d'amélioration est supérieur à 50%, soit plus de 0.5 W/m²K (à titre de comparaison: isolations thermiques en dessus du minimum légal seulement 0.1 à 0.2 W/m²K). Il convient aussi d'exiger une faible valeur U du verre et des fenêtres pour des questions de confort. Les fortes épaisseurs d'isolation (>20cm) de façades ne recèlent qu'un faible potentiel d'amélioration (<0.1 W/m²K), donnent lieu à des défis en matière de construction et technique des ponts thermiques, et les bénéfices marginaux sont souvent insignifiants. - Protection solaire et dispositif antiéblouissant sur l'enveloppe du bâtiment: <u>protection solaire et dispositif antiéblouissant doivent si possible être séparés</u> (protection solaire extérieure, depuis en haut, dispositif antiéblouissant intérieur, depuis en bas). Ceci permet une utilisation ciblée. Une seconde solution optimale est une protection solaire avec forte utilisation de la lumière du jour (sélectivité). Le réglage de la protection solaire doit être conçu de telle sorte qu'elle soit utilisée parcimonieusement pendant la période de chauffage. - Ventilations: conception et réglage adaptés aux besoins (concentration de CO₂), pertes de charges moindres (<500 Pa), c'est-à-dire vitesses de l'air réduites, ventilateurs/moteurs de haute performance. - Installations techniques: la combinaison éléments de construction thermoactifs (dans ou sur les éléments de construction), dispositifs de parapet, PAC alimentée à l'air vicié, distribution d'eau froide et PAC - sondes terrestres s'est avérée favorable à maints égards (renouvellement automatique de l'air, confort accru, pas besoin de combustibles, consommation relativement faible de courant pour l'air pulsé, utilisations des rejets thermiques, refroidissement libre grâce à l'air extérieur et à la sonde terrestre). - Une <u>qualité d'exécution supérieure</u> et une <u>mise en service professionnelle</u> sont essentielles pour l'efficacité énergétique, et le temps investi est généralement rentable. |
| Refroidissement du bâtiment | <ul style="list-style-type: none"> - <u>Planifier et réaliser le refroidissement du bâtiment en tant que concept global</u> (différences de températures dynamiques moindres, utilisation de l'air frais provenant de l'extérieur et de la masse de stockage thermique, séparation de la ventilation et du refroidissement). |
| Sans ventilation mécanique | <ul style="list-style-type: none"> - <u>Ventilation automatique par les fenêtres ou dispositifs de parapet</u> pour l'hygiène de l'air et la protection contre la surchauffe, éventuellement éléments réfrigérants tels que plafonds réfrigérants, éléments de construction thermoactifs, refroidissement de l'air pulsé (avec contrôle de l'humidité) |

Tableau 90

Règles de planification et d'investissements applicables aux bâtiments neufs (selon l'importance de la mesure, s'appliquent également aux rénovations de bâtiments)

| Différenciation des cas | Règles de planification et d'investissements |
|--|--|
| Généralités | <ul style="list-style-type: none"> - En général, l'isolation thermique du toit, de la façade, du plafond de cave, etc. est rentable (notamment en comparaison de simples mesures de remise en état non énergétiques) ou entraîne seulement un surcoût modéré (moins de 1 à 2 CHF/m²a jusqu'à une valeur U de 0.2 W/m²K ou une épaisseur d'isolation de 20 cm). Les structures complexes et les revêtements onéreux de façades, encore fonctionnelles, constituent une exception. - Lors de charges internes élevées et pour les bâtiments sans refroidissement actif, les isolations thermiques aggravent encore l'inconfort estival, en particulier si la situation est déjà précaire. - Les modernisations d'éclairages s'avèrent surtout rentables, si les coûts de travail sont aussi pris en compte dans la base de comparaison «rénovations». |
| Sans ventilation | <ul style="list-style-type: none"> - Installation d'une ventilation ou d'un équipement avec PAC alimentée à l'air vicié: voir plus haut. - Installation d'un refroidissement actif: en principe, il est possible d'installer un simple refroidissement (sans ventilation mécanique); mais il est conseillé de le compléter par une ventilation mécanique à cause du danger d'eau de condensation. La distribution de froid par le réseau d'eau froide offre certains avantages, quand bien même les coûts annuels sont à peu près comparables. Les coûts annuels d'un refroidissement central, distribution incluse, sont comparables à ceux des petits climatiseurs. |
| Ventilation existante | <ul style="list-style-type: none"> - Mesures d'optimisation énergétique (OE): dans bien des cas, on peut réduire considérablement les périodes de fonctionnement et les courants volumiques d'air, sans devoir accepter des inconvénients majeurs concernant la qualité de l'air. Dans le même temps, les besoins en chaleur et en électricité diminuent. Les mesures OE sont généralement très rentables. - Pose d'un RC: si une ventilation existante n'est pas encore dotée d'un RC, il faut tout de suite envisager d'en installer un, au plus tard lors de la prochaine rénovation du monobloc. En général, l'installation d'un équipement de récupération de chaleur est rentable (pour autant que la conception des pièces le permette). - Renouvellement de la ventilation: la rénovation de la ventilation (préparation de l'air, mais surtout distribution de l'air) permet de réaliser des gains importants en efficacité, si les courants volumiques d'air font l'objet d'une nouvelle conception (adaptation aux besoins). |
| Ventilation existante avec refroidissement | <ul style="list-style-type: none"> - Mesures d'optimisation énergétique: réduction des besoins en chaleur et forte réduction des besoins en électricité (air pulsé et refroidissement) grâce à l'adaptation des périodes de fonctionnement et des courants volumiques d'air. Le cas échéant, des mesures compensatoires sont nécessaires pour éviter une diminution du confort (par ex. modernisation de l'éclairage). - Pose d'un RC: voir également Ventilation sans refroidissement. - Renouvellement de la ventilation: la séparation des fonctions de ventilation et de refroidissement permet de réduire considérablement les courants volumiques d'air. S'il faut malgré tout un refroidissement actif, le surcoût est moindre. |

Tableau 91 Règles de planification et d'investissements applicables aux bâtiments existants

Il convient de signaler ici les autres évaluations et analyses qui sont directement documentées dans le chapitre Résumé (p. 27ss).

7. Conclusions finales et recommandations

Le projet a pour objectif de calculer les coûts marginaux des mesures d'efficacité énergétique pour les bâtiments commerciaux. A cette fin, il convient de veiller aux faits suivants:

- Les mesures visant à améliorer la protection thermique et la protection solaire de l'enveloppe du bâtiment sont multifonctionnelles par nature, parce qu'elles modifient les caractéristiques du bâtiment (par ex. lumière pénétrant naturellement dans les pièces, modification des possibilités de refroidissement nocturne en été); elles peuvent entrer en conflit avec l'utilisation optimale du bâtiment (par ex. diminution du confort à certaines périodes de l'année, éclairage insuffisant). Les mesures, exigences et influences dans le domaine de l'éclairage sont aussi multifonctionnelles (diverses dimensions de la qualité de l'éclairage, dégagement de chaleur, besoins de refroidissement). Par principe, ces «effets de couplage» obligent à peser les avantages et désavantages des différents objectifs et à évaluer la corrélation financière des coûts et bénéfices, tels qu'on les connaît aussi pour le couplage chaleur force.
- Au niveau de la méthode, il n'est en principe pas possible de déterminer les coûts marginaux des mesures agissant simultanément sur la demande énergétique et sur le niveau de confort, si l'on ne traite pas également l'évaluation financière du changement de confort, ainsi que les coûts et bénéfices additionnels. Au plan méthodique, il est également difficile de fixer les coûts marginaux par rapport à une variante de référence pour la rénovation d'un bâtiment, s'il existe certaines prescriptions en matière de technique énergétique pour la rénovation (par ex. pour la ventilation avec récupération de chaleur) ou si les besoins de confort évoluent (par ex. meilleure qualité de l'air).

Compte tenu de cette situation initiale, les conclusions finales se répartissent entre une partie sur le contenu et une autre partie sur la méthode (cf. Chapitre 7.1 et 7.2), avant que les auteurs n'en déduisent quelques recommandations (cf. Chapitre 7.3).

7.1 Conclusions finales sur le contenu

Contrairement aux bâtiments d'habitation, les mesures de protection thermique pour les bâtiments commerciaux ont un réseau de causalité nettement plus complexe, non seulement au niveau de la physique du bâtiment et de la technique énergétique, mais également au plan socio-économique:

- Dans les hôpitaux, homes pour personnes âgées, écoles, immeubles de bureaux, bâtiments du commerce de détail ou halles de production, les possibilités (pour les employés) de quitter les pièces surchauffées et d'ouvrir les fenêtres (surtout la nuit) (comme dans les bâtiments d'habitation) sont limitées.
- Par ailleurs, les charges internes, souvent plus élevées à cause des machines de bureau et de production, de la forte densité d'occupation, de la circulation du public et de l'éclairage intensif, peuvent provoquer des températures ambiantes élevées durant le semestre d'été.
- Dans les locaux abritant des bureaux ou des écoles et dans les salles de conférences ou d'assemblées, il faut aussi respecter des valeurs seuils maximales pour le CO₂, afin de ne pas réduire les capacités à apprendre ou la productivité des utilisateurs des bâtiments.

A propos des conflits d'objectifs entre l'efficacité énergétique et le confort dans les bâtiments commerciaux

Dans les bâtiments commerciaux, on observe une multitude de prestations énergétiques: confort thermique en hiver et en été, renouvellement de l'air, éclairage. Les facteurs d'influence qui déterminent les besoins énergétiques sont tout aussi nombreux pour fournir ces prestations. Entre les différentes prestations énergétiques et les facteurs d'influence, il existe beaucoup d'interactions. Compte tenu de ces interactions, les mesures d'efficacité énergétique peuvent provoquer des conflits d'objectifs, en particulier entre les prestations énergétiques affectant la chaleur et l'électricité et entre la réduction des besoins énergétiques et l'inconfort thermique (surchauffe). Malgré les nombreux aspects à étudier individuellement, on peut d'ores et déjà retenir les points clés ci-après:

- S'agissant *des bâtiments commerciaux neufs*, les mesures appropriées peuvent considérablement améliorer ou péjorer le niveau de confort et la demande de combustibles. Il en va de même – concernant un niveau de confort donné – pour les besoins en électricité relatifs au bâtiment. Lors de prestations énergétiques supplémentaires par rapport à la situation de référence (par ex. ventilation, refroidissement) ou de mesures de substitution (RC, PAC), les potentiels d'efficacité électrique correspondants peuvent, dans une certaine mesure, être compensés. Il est prétentieux de vouloir réduire de manière significative la consommation électrique comme un tout par les seules mesures touchant au bâtiment. Il faudrait aussi de réduire les besoins en électricité des appareils, qui en consomment souvent beaucoup. Globalement, les architectes et ingénieurs spécialisés (concepteurs de l'éclairage, de l'électricité et de CVC) ont une plus grande marge de manœuvre pour réaliser une solution optimale lors d'une nouvelle construction que lors d'une rénovation. Le processus d'optimisation peut être soutenu par des modèles de simulation adéquats et des outils informatiques intégrés et faciles d'utilisation (par ex. SIA 380/4, configurateur d'éclairage, et SIA 380/4, outil de climatisation), ce qui permet de prendre les décisions appropriées pour une nouvelle construction.
- En comparaison des bâtiments neufs, la *rénovation des bâtiments commerciaux* présente une plus grande palette de mesures possibles ou nécessaires, compte tenu des différentes caractéristiques des bâtiments existants. Mais en matière énergétique, les principes fondamentaux sont les mêmes pour les anciens bâtiments que pour une nouvelle construction. Dans un premier temps, il s'agit de réduire les besoins énergétiques grâce à des mesures adéquates et dans un second temps, de couvrir les besoins résiduels de la manière la plus efficace possible. Les potentiels d'efficacité énergétique exploitables sont énormes par rapport à une nouvelle construction, tant pour l'énergie de chauffage que pour l'énergie électrique. Il convient d'utiliser le mieux possible les interactions positives (renouvellement de l'éclairage et de la ventilation, qui réduisent la demande d'énergie thermique, la consommation de courant et les situations d'inconfort) et d'éviter si possible les effets contraires (vitrages à valeur g élevée dans les bâtiments avec charges internes élevées, protection solaire automatique en dehors des périodes critiques). Si les effets contraires ne peuvent être évités (par ex. diminution de confort suite aux isolations thermiques et au remplacement des fenêtres, en présence de charges internes élevées), il ne faut généralement pas renoncer à la mesure envisagée, mais engager des mesures compensatoires (car l'effet primaire d'une mesure est en général prépondérant). Ceci signifie que, lors de la rénovation des bâtiments, les exigences posées aux architectes et aux ingénieurs spécialisés sont élevées, puisqu'ils doivent non seulement prendre en compte la complexité des conflits d'objectifs entre l'efficacité énergétique et le niveau de confort, mais encore les aspects de protection des monuments historiques, les espaces exigus, les interfaces, les différents cycles de vie, les restrictions de budgets d'investissements, etc.

De manière simpliste, le conflit d'objectifs entre l'efficacité énergétique et le maintien ou l'amélioration du confort s'exprime dans la règle suivante: avec certaines mesures, une réduction de la demande de combustibles entraîne une augmentation d'un quart ou de moitié de la consommation électrique. Inversement, certaines mesures d'efficacité affectant les applications électriques peuvent générer un renchérissement de moitié ou d'un quart pour le chauffage, suite à l'absence de

dégagement de chaleur durant la période de chauffage. La réduction d'un kWh d'électricité s'acquiert moyennant 0.25 à 0.5 kWh de combustible. Ceci est beaucoup moins qu'avec la production de courant dans les centrales, où il faut de 1.7 (dans une très bonne CCC) à 3 kWh de combustible par kWh, c'est-à-dire que ces mesures sont nettement préférables à la production d'électricité thermique. Le rapport de substitution électricité/chaleur ou «exchange rate» oscille entre 0 et 0.25 pour les mesures de protection thermique de l'enveloppe du bâtiment (avec les verres solaires, peut-être davantage selon les agents énergétiques), entre 0.25 et 0.75 pour les mesures d'efficacité électrique concernant les locaux et entre 2 et 4 pour les mesures d'efficacité thermique des installations du bâtiment. Le facteur 4 s'applique également à l'utilisation de ventilations bien conçues avec récupération de chaleur et de pompes à chaleur au lieu de chauffages à combustibles, car le taux d'utilisation annuel des pompes à chaleur est habituellement de 4 dans une nouvelle construction (en particulier avec sondes terrestres ou PAC alimentée à l'air vicié). Une PAC en lieu et place d'un chauffage est conseillée, pour autant que le coefficient de performance de la production de courant moins les pertes de transmission soit supérieur à la valeur inverse correspondante du taux d'utilisation annuel de la PAC, soit supérieur à 0.4 (avec un TUA de 2.5) ou à 0.25 (avec un TUA de 4).

Entre les mesures concernant les combustibles et celles concernant l'efficacité électrique, il existe cependant aussi des effets de synergie, en particulier dans le domaine de la ventilation et du refroidissement, et cela, tant dans les mesures d'investissements (planification, rénovation) que dans les mesures d'exploitation (optimisation énergétique).

Certaines mesures hivernales ou estivales de protection thermique ou solaire axées sur l'enveloppe du bâtiment (mesures d'efficacité énergétique visant à réduire les besoins en chaleur ou la consommation potentielle d'énergie de refroidissement) ont souvent un effet accessoire indésirable: soit le confort diminue, soit la consommation de courant augmente (ou les deux ensemble), les interactions n'étant pas toujours aussi manifestes. C'est notamment le cas dans les bâtiments avec charges internes élevées et avec refroidissement nocturne (par les fenêtres ou par la ventilation). Font partie de ces mesures, les isolations de façades de bâtiments qui n'étaient pas isolés auparavant, le remplacement des fenêtres (pour autant que la valeur g ne soit pas réduite aussi), l'utilisation plus fréquente de la protection solaire ou une protection solaire avec une faible transmission de lumière.

Les mesures compensatoires appropriées en matière de technique et d'exploitation permettent de compenser largement ce conflit d'objectifs et il est possible, dans le même temps, de réaliser une grande efficacité énergétique des combustibles et de l'électricité, ainsi qu'un confort accru (voir Graphique 19, p. 110 et Graphique 28 p. 122). Les coûts annuels sont plus fortement influencés par le niveau de confort désiré que par le niveau d'efficacité énergétique (Graphique 97, p. 243). Les principales mesures recommandées, à prendre – si possible - simultanément, afin qu'elles puissent déployer leurs effets, sont les suivantes:

- Réduction des charges thermiques internes provenant des appareils (par ex. par un enclenchement rapide des états de repos).
- Utilisation d'éclairages de haute performance (puissance installée moindre, commande liée à la présence de personnes et à la lumière naturelle).
- Sélection des fenêtres et des protections solaires (bonne transmission de lumière, valeur g moindre).
- Possibilité d'ouvrir les fenêtres; ouverture automatique des fenêtres ou dispositifs de parapet avec ouvertures d'aération.
- Refroidissement nocturne. Le cas échéant, le refroidissement par les fenêtres ouvertes peut être suffisant (avec réglage, pour protéger contre les intempéries et les cambriolages), à condition qu'il soit utilisé parallèlement aux autres mesures indiquées.
- Concepts de réglage intelligents, flexibles et coordonnés, qui ne réagissent pas aux valeurs seuils statiques, mais qui prennent en compte la dynamique de la physique du bâtiment et de la météorologie. Une harmonisation parfaite entre la protection solaire, l'éclairage et le refroidissement est incontournable.

Compte tenu du conflit d'objectifs mentionné entre l'efficacité énergétique et le confort et des effets de synergie, il existe, pour les divers types de bâtiments ainsi que pour les nouvelles constructions ou les rénovations, des paquets de mesures efficaces au niveau des coûts et de l'énergie qui sont nettement préférables à d'autres combinaisons de mesures à cause du respect des critères de confort (cf. **Tableau 92**)

Si l'on adopte une méthode adéquate, les solutions d'efficacité énergétique dans les bâtiments neufs ou les rénovations énergétiques des installations et de l'enveloppe des bâtiments existants sont rentables ou entraînent des surcoûts modérés (0 à quelques CHF/m²a). Les besoins de confort, les installations offrant des bénéfices additionnels (refroidissement actif, ventilation) ou les décisions architecturales fondamentales (type de façades, emplacement de la protection solaire, design de l'architecture intérieure) ont un impact beaucoup plus grand sur les coûts annuels (bruts). Ceux-ci se situent entre 10 et quelques dizaines de CHF/m²a. A titre de comparaison: dans les bâtiments commerciaux, les coûts annuels totaux des éléments de construction et des équipements déterminants pour l'énergie oscillent entre 50 et 100 CHF/m², les frais accessoires des bâtiments entre 300 et 400 CHF/m² et les frais de personnel entre 5000 et 10000 CHF/m². Si la productivité des employés diminue de quelques pour-mille en raison de locaux surchauffés ou insuffisamment chauffés, toute mesure de protection thermique ou toute mesure énergétique devra être axée sur le maintien de la productivité.

| Domaines | Règles principales de planification et d'investissements (sélection) |
|--|---|
| Bâtiments neufs et bâtiments existants | <ul style="list-style-type: none"> - Les isolations thermiques sont un élément essentiel pour les bâtiments économes en énergie. Les mesures correspondantes sont généralement rentables (en particulier par rapport aux rénovations non énergétiques) ou entraînent seulement des surcoûts modérés, moyennant les prix actuels de l'énergie (moins de 1 à 2 CHF/m²a jusqu'à une valeur U de 0.2 W/m²K ou jusqu'à une épaisseur d'isolation de 20 cm). - Les fenêtres à vitrages isolants avec une valeur g plus élevée (par rapport au standard pour chaque valeur U de verre) visant à augmenter les gains solaires pendant la période de chauffage, ne sont pas conseillées pour les bureaux, car elles diminuent le confort thermique en été. - Les fenêtres à verres antisolaires (avec une valeur g plus faible) améliorent certes le confort estival, mais augmentent les besoins nets en chaleur (avec le même régime d'utilisation de la protection solaire) <i>et</i> la consommation de courant, également dans les bâtiments refroidis (davantage d'éclairage avec réglage de l'éclairage). Une protection solaire variable et optimisée par rapport à l'utilisation de la lumière du jour est donc préférable. - Les éclairages de haute performance et les réglages d'éclairages sont des éléments essentiels pour les bâtiments économes en énergie et confortables au niveau thermique. Les mesures correspondantes sont le plus souvent rentables ou n'entraînent que des surcoûts moindres, en général de 0 à 2 CHF/m²a (notamment si l'on prend en compte les coûts d'entretien). - Plus les charges thermiques internes (non réduisibles) sont élevées, plus l'installation d'un refroidissement actif devient nécessaire, afin de maintenir le niveau de confort souhaité, notamment en dehors de la période de chauffage. Par rapport au refroidissement non actif, le refroidissement actif génère normalement un surcoût de 10 CHF/m²a. Le refroidissement actif devrait être le plus efficace possible (par ex. petite différence de température entre l'eau de refroidissement et le postrefroidissement), réalisation rentable ou liée à un surcoût moindre (0 à 2 CHF/m²a). - La pose d'une ventilation, <u>uniquement</u> pour des raisons d'efficacité énergétique, n'est pas judicieuse au plan économique (les coûts marginaux sont nettement supérieurs aux coûts de production de chaleur), mais seulement pour des questions de confort lors d'une bonne protection thermique. Un récupérateur de chaleur (aussi avec une pompe à chaleur alimentée à l'air vicié) peut certes réduire la demande de chauffage spécifique, mais même avec le minimum de l'hygiène de l'air, le renouvellement de l'air est généralement plus élevé qu'avec une aération par les fenêtres. Coûts habituels: 10 CHF/m²a. - Avec une ventilation existante ou nécessaire du point de vue de l'hygiène de l'air, il s'agit d'exiger des pertes de charges aussi faibles que possible (mesure pour la consommation de courant consacré à l'air pulsé) et des ventilateurs et moteurs électriques de haute performance. Les équipements de récupération de chaleur avec un coefficient de performance élevé (plus de 85%) sont rentables. - Une ouverture automatique des fenêtres ou des dispositifs de parapet avec ouvertures d'aération permettent d'augmenter considérablement le confort (sans installations de ventilation ou de climatisation). En effet, à part quelques jours de pointe dans l'année, l'air extérieur est plus frais que la température ambiante (coûts annuels de la mesure jusqu'à environ 8 CHF/m²a). - Les pompes à chaleur sont des solutions judicieuses aux plans énergétique et technique, pour substituer les combustibles consacrés au chauffage; les coûts d'investissement légèrement supérieurs peuvent généralement être compensés par une réduction des coûts énergétiques et des coûts d'exploitation. |

| | |
|---------------------|---|
| Bâtiments existants | - Lors de charges internes élevées dans les bâtiments sans refroidissement actif, la protection thermique aggrave la surchauffe estivale, notamment si la situation de surchauffe estivale était déjà critique avant la mesure. |
| Bâtiments neufs | - Une forte densité d'occupation et partant une forte dotation en appareils génèrent des charges thermiques internes élevées. Sans refroidissement actif (plafonds réfrigérants, refroidissement de l'air pulsé, éléments de construction thermoactifs ou refroidissement de l'air frais), il n'est guère possible de satisfaire aux exigences de confort estival, même dans les bâtiments avec une part de vitrages moindre, un éclairage de haute performance et une très bonne protection solaire. |

Tableau 92 Règles de planification et d'investissements visant à minimiser le conflit entre confort et efficacité énergétique dans les bâtiments commerciaux (Source CEPE et al.)

Structure des coûts et considérations coûts/bénéfices pour les mesures d'efficacité énergétique

Les frais de chauffage des bâtiments commerciaux sont très bas par rapport aux coûts d'électricité, mais surtout par rapport aux coûts de capital des bâtiments commerciaux. Le potentiel d'économie sur les frais de chauffage (à l'aune des autres frais) est donc relativement faible aussi; c'est pourquoi on ne leur prête pas grande attention. Lors d'une nouvelle construction ou d'une rénovation, ce sont les décisions fondamentales qui déterminent ou modifient les coûts annuels totaux de manière significative: part de vitrages, type de façades, refroidissement oui ou non, ventilation oui ou non. Ces décisions influent fortement sur les besoins en électricité et en chaleur, et donc sur leurs coûts, soit quelques dizaines de CHF/m²a (ou entre 50 et au moins 80 CHF/m²a, si l'on prend également en compte les coûts de capital et d'exploitation relatifs à l'énergie), qui ne sont toutefois pas très importants par rapport au total des coûts annuels d'exploitation du bâtiment (entre 250 et 400 CHF/m²a). La qualité de la technique énergétique avec laquelle ces décisions sont mises en œuvre a peu d'influence sur les coûts totaux, mais beaucoup sur la structure des coûts: en général, le supplément de coûts de capital pour les solutions d'efficacité énergétique peut être largement compensé par la réduction des coûts énergétiques.

Le cas de la nouvelle maison-tour, de taille moyenne et abritant des bureaux, avec une part de fenêtres de 80%, une construction légère et des charges internes élevées, met en lumière la forte influence des décisions architectoniques sur les coûts totaux et sur la consommation d'énergie, tant positivement que négativement. Certaines de ces mesures sont de véritables mesures «win-win»: par exemple, une protection solaire extérieure réduit les coûts de l'enveloppe du bâtiment (comparativement à une protection solaire placée entre les verres) et dans le même temps, on améliore la protection thermique estivale.

La rentabilité des mesures affectant le bâtiment et les installations ne dépend pas seulement du coût de ces mesures, mais surtout aussi de la *situation initiale et de la base de comparaison*. A noter que les trois derniers points cités s'appliquent aux *bâtiments existants*:

- *Moment de la comparaison des coûts*: les analyses des coûts et profits ont démontré que les calculs de rentabilité réagissent avec une assez grande sensibilité à la précision des données concernant les coûts, car celles-ci sont influencées par les différences de coûts (pour des raisons arithmétiques, de légères modifications sont répercutées avec un fort effet de levier). Dans une première phase de planification, on ne dispose souvent que d'estimations approximatives, souvent plus proches de la réalité pour les variantes d'efficacité énergétique que pour les variantes standards. En optant pour certaines variantes dans cette première phase de planification et en se fondant sur des calculs de rentabilité basés sur ces estimations de coûts très approximatives, on

néglige fréquemment les variantes d'efficacité énergétique qui pèsent davantage sur les investissements, bien qu'elles s'avèrent tout à fait rentables en y regardant de plus près (voir Chap. 5, en particulier 5.1 et 5.2, p. 195ss, et Jakob, Jochem, 2002). La problématique est encore aggravée par le renforcement récent de la responsabilité des ingénieurs et des architectes en matière d'estimations des coûts et de devis (cf. Hess-Odoni, 2006) qui débouchera certainement sur des estimations plus conservatrices.

- *Base de comparaison «dépenses courantes» (comparaison inappropriée)*: Par rapport aux dépenses courantes pour l'énergie et aux coûts (moindres) d'entretien dans le domaine de «courant normal», les mesures d'efficacité énergétique entraînent apparemment souvent un surcoût net. Ceci tient entre autres au fait que la création de valeurs à neuf liée à ce type de mesures (certaines installations ou parties du bâtiment sont renouvelées, le confort s'accroît) est exigeante au niveau de la méthode de financement et n'est pas évaluée de manière adéquate dans la pratique. Cette estimation économique lacunaire des investissements en faveur de l'efficacité énergétique explique en partie pourquoi les gens tardent tellement à rénover les bâtiments et les installations. S'agissant par exemple des éclairages, la rentabilité des modernisations (lampes, ballast électronique et remplacement des lampes) et des mesures de gestion de la lumière (réglage lié à la présence de personnes et en fonction de la lumière du jour) dépend fortement des coûts d'entretien présumés. Si l'on néglige les coûts de travail pour le remplacement des lampes et le nettoyage et si l'on prend uniquement les coûts énergétiques et de matériaux comme base de comparaison, la rentabilité du renouvellement de l'éclairage n'est généralement pas garantie. Par contre, si l'on tient compte de ces aspects et qu'on inclut les coûts de travail correspondants, la modernisation de l'éclairage devient rentable.
- *Base de comparaison «remise en état»*: Par rapport aux mesures de remise en état, les mesures de rénovation ou d'efficacité énergétique renforcées sont rentables dans bien des cas ou du moins proches du seuil de rentabilité (moyennant les prix actuels de l'énergie: combustibles 7 ct./kWh, électricité 17 ct./kWh). Il faut toutefois émettre l'hypothèse que la durée de vie économique de l'investissement soit identique à la durée de vie technique. La durée exigée de pay-back, fréquemment utilisée et souvent relativement brève, est une mesure de risque pour le reflux du capital investi; mais elle ne dit rien de la rentabilité. Les isolations thermiques du toit ou des façades, les mesures d'optimisation énergétique, la production combinée de froid et de chaleur, etc. sont des exemples d'investissements rentables.
- *Base de comparaison «rénovation» (énergétique standard)*: Au moment où l'on doit de toute façon réaliser des mesures de rénovation (qui génèrent souvent un gain d'efficacité), il est en principe possible de procéder à des investissements plus efficaces en matière d'énergie: par exemple, une isolation renforcée, un coefficient de performance plus élevé pour les installations de technique énergétique, un éclairage avec réglage. S'agissant des mesures très poussées, les coûts marginiaux sont toutefois en partie supérieurs au prix de l'énergie. En revanche, les coûts moyens (par rapport à une rénovation standard ou à une remise en état), même avec des coûts marginaux élevés de la phase marginale (c'est-à-dire la dernière), sont néanmoins souvent inférieurs aux coûts énergétiques, ce qui signifie que les mesures prises en tant que «paquets» sont rentables.

Conclusions sur les analyses d'économie énergétique: Si, compte tenu de leur durée de vie, certaines installations ou parties du bâtiment doivent de toute façon faire l'objet d'une remise en état ou d'une rénovation, on obtient souvent un gain important en efficacité énergétique, ceci grâce aux progrès techniques réalisés depuis la construction ou la dernière rénovation, s'agissant des fenêtres, des installations de récupération de chaleur, de ventilation et de production de froid ainsi que des éclairages. Ces progrès techniques «autonomes» sont pris en compte dans les modèles d'économie énergétique – en général, sans en évaluer les coûts supplémentaires. C'est précisément la différence entre la remise en état et le réinvestissement normal dans l'état actuel de la technique qui caractérise les potentiels d'efficacité inexploités et rentables («low hanging fruits»), que toute politique d'efficacité énergétique doit absolument prendre en compte.

Vu la multitude des différentes caractéristiques et exigences des bâtiments commerciaux, le calcul des coûts marginaux à des fins d'analyses d'économie énergétique est complexe et exige des simplifications. La classification en douze types de bâtiments, à laquelle nous avons procédé ici, est un premier grand pas vers une prise en compte plus adéquate des différentes données. *Structures du marché et état actuel de la planification énergétique et de la planification des coûts*

La saisie des coûts a montré que le domaine du chauffage, de la ventilation et de la climatisation est caractérisé par des interfaces relativement nombreuses (par ex. certains appareils tels que machine frigorifique, postrefroidissement et distribution de froid, sont généralement offerts et dimensionnés par différentes entreprises spécialisées). Il est apparu que la planification technique et la planification des coûts doivent souvent s'effectuer plusieurs fois à cause des interfaces et que la plupart des concepteurs n'optimisent que leurs propres composants du système (pour autant qu'ils le fassent). Ceci rend difficile, voire impossible, une optimisation ou standardisation effective, efficiente, courante et harmonisée dans la pratique de tous les jours pour les bâtiments commerciaux, en particulier lors de rénovations. Par ailleurs, les bureaux d'ingénieurs et de concepteurs se voient souvent accorder des budgets serrés, qui s'avèrent insuffisants pour une optimisation adéquate des coûts du cycle de vie.

Les sondages et les enquêtes ont également démontré que les professionnels orientés vers la technique ont souvent des connaissances lacunaires concernant les indices de coût et les rapports coûts/bénéfices. Inversement, les professionnels orientés vers les coûts ont des connaissances lacunaires concernant les indices techniques et leurs potentiels techniques d'efficacité énergétique.

7.2 Remarques méthodologiques

Les conclusions du présent projet peuvent être utilisées pour les modèles de systèmes énergétiques (par ex. en Suisse) sous forme de paquets de mesures appropriées sur un plan sectoriel. Mais elles pourraient également trouver leur place dans d'autres outils de planification électronique des ingénieurs spécialisés et des architectes en tant que résultats spécifiques aux différents types de bâtiments. Cependant, les analyses ont aussi mis en lumière certaines limites des méthodes utilisées auxquelles il faut veiller.

Limites de l'évaluation des coûts marginaux

Par principe, l'estimation des coûts marginaux présuppose un rapport coûts/bénéfices binaire, c'est-à-dire que d'autres coûts et bénéfices sont supposés constants. L'exemple des bâtiments commerciaux montre que, compte tenu de l'influence évidente des mesures de protection thermique sur le confort du bâtiment, l'évaluation des coûts marginaux touche à ses limites, puisque dans la règle, le confort augmente ou diminue. Dans les analyses d'économie énergétique, les seules constatations possibles sur les coûts marginaux doivent donc être faites par rapport à un niveau de confort constant ou par rapport à d'autres valeurs d'objectifs influant sur les coûts d'un type de bâtiment, qui soient constantes elles aussi (par ex. représentativité d'un bâtiment, hauteur des charges internes).

Sans *évaluation financière des aspects de confort dans les bâtiments commerciaux*, il ne reste pour l'essentiel que deux approches de solutions pour réaliser des calculs quantitatifs adéquats de rentabilité: 1. La comparaison entre des solutions d'efficacité différenciée pour un niveau de confort constant, une méthode fortement axée sur le type et orientée vers le processus. 2. L'exploitation statistique des résultats d'investissements et de différentes locations par régression multiple et déduction des coûts marginaux sur la base des équations d'estimation, une méthode qui a échoué jusqu'à maintenant en raison du manque de données.

Comme *l'évaluation des coûts marginaux est basée sur des considérations de différences* (tant pour les coûts que pour les effets énergétiques), il faut une haute précision dans la détermination des coûts et des bénéfices énergétiques. Cette précision fait souvent défaut à cause de la simplification de la classification entre les différents types et cas d'investissements. Les coûts marginaux réagissent avec beaucoup de sensibilité aux inexactitudes concernant les coûts et les besoins énergétiques résiduels des variantes à comparer. Ces inexactitudes peuvent générer des coûts marginaux élevés, bien que les coûts annuels des variantes envisagées diffèrent très peu. Par ailleurs, l'évaluation des coûts marginaux présente l'inconvénient qu'elle ne tient pas compte du niveau des coûts; c'est pourquoi, s'agissant des analyses d'économie énergétique, on est tenté de faire intervenir la comparaison des coûts annuels pour des cas typiques de rénovations ou de nouvelles constructions à des fins d'évaluation économique, comme cela est courant pour les investissements dans le secteur de la transformation.

Un autre désavantage de l'estimation des coûts marginaux est la répartition habituelle des coûts sur les domaines des combustibles et de l'électricité pour des mesures qui modifient les deux types d'agents énergétiques (le plus souvent dans le sens opposé). Tant que pour l'un des agents énergétiques, il s'agit seulement d'une «énergie auxiliaire» (par ex. entraînement de pompe), ces besoins peuvent être paramétrisés comme une partie des coûts d'exploitation. Sinon, il faut renoncer à cette séparation, ce qui n'a pas été fait dans les modèles actuels d'économie énergétique basés sur le bottom-up et le top-down.

La présentation des résultats au niveau des coûts annuels facilite également l'intégration des bénéfices additionnels.

Limites de la modélisation des besoins énergétiques et du confort – Outils à l'intention des planificateurs

Lors de l'interprétation des résultats des simulations pour les calculs des différents types de bâtiments, il convient aussi de prendre en compte les conditions-cadres supposées et les limites des simulations. Les limites des simulations concernent en particulier le comportement des utilisateurs par rapport à l'éclairage, à l'utilisation de la protection solaire et à l'ouverture des fenêtres. Il est possible que le modèle surestime les interactions des mesures relatives aux vitrages et des mesures de protection solaire sur les besoins d'éclairage dans le cas d'une commande manuelle de l'éclairage et/ou de la protection solaire, parce qu'on a supposé que la lumière était éteinte dès que la lumière du jour était à nouveau suffisante sur la surface de travail. Les bénéfices des mesures correspondantes concernant la réduction de la consommation d'énergie de refroidissement seraient alors sous-estimés (autrement dit, les coûts marginaux correspondants seraient surestimés).

Les modèles de simulation dynamique du bâtiment, qui donnent également des indications sur le confort, sont d'un emploi relativement complexe et prennent beaucoup de temps entre autres pour l'analyse des données. Ceci complique l'utilisation de tels modèles dans le processus précoce de conception et de planification. C'est pourquoi on exige en complément des modèles plus simples et paramétrisés, qui n'ont pas ces inconvénients et qui fournissent des bases de planification approximatives, mais néanmoins fiables (cf. Gasser, 2006 et Ménard, Seidinger et al., 2006).

7.3 Recommandations pour les milieux économiques, les intermédiaires, les politiciens et l'administration

Une analyse approfondie des obstacles et de la politique n'était pas l'objet principal de la présente étude. Cependant, comme les travaux portaient indirectement sur les innovations dans le domaine des bâtiments commerciaux, les nombreux contacts avec les entreprises et les représentants de la branche ainsi que les résultats des calculs ont permis de déduire empiriquement quelques indications sur les obstacles et les outils permettant de les surmonter. Ces indications sont résumées ci-après en fonction des différents acteurs. On relève *encore d'autres obstacles* à éliminer. Beaucoup d'entre eux ne sont pas spécifiques aux bâtiments commerciaux, mais concernent également les bâtiments d'habitation (cf. analyses et recommandations du projet FEE de l'OFEN «Activation des potentiels de rénovation dans les anciens bâtiments d'habitation»).

Milieux économiques, notamment milieux immobiliers et concepteurs

Information et marketing

Compte tenu des cycles de maintenance et de rénovation relativement longs, les maîtres d'ouvrage ne disposent souvent pas d'informations suffisantes pour décider d'une rénovation. Cela génère donc fréquemment des coûts élevés pour la recherche et l'information, ce qui démotive parfois les responsables de l'énergie, surtout lors de rénovations impliquant un volume modeste d'investissements. Par ailleurs, les décisions de rénovation passent souvent par des processus à plusieurs niveaux entre les différents types d'acteurs et domaines de compétence (techniciens, gestionnaires, propriétaires et administrateurs d'immeubles, etc.), tant du côté des mandants que de celui des mandataires, ce qui empêche des solutions efficaces en termes d'énergie, compte tenu des connaissances lacunaires des preneurs de décisions. Il convient donc de réduire l'assymétrie de l'information et de développer la transparence du marché de la construction et de la rénovation des bâtiments et des installations.

- Les *services de conseil au démarrage et à la mise en œuvre pour propriétaires immobiliers* doivent être encouragés au plan financier et comme image de «best management practice». Le programme Energie 2000 a fourni de vastes expériences sur les services de conseil en matière de procédure et d'énergie destinés aux exploitants immobiliers qui pourraient être activés et actualisés en temps utile.
- Les *producteurs d'équipements techniques, concepteurs et utilisateurs de technologies* doivent *organiser des campagnes d'information et des expositions ciblées* sur les techniques spécifiques (comme c'est par ex. le cas pour la campagne «Druckluft»), notamment pour l'éclairage et les moteurs électriques de haute performance, ventilateurs, machines frigorifiques et pompes, ainsi que les mesures d'optimisation énergétique et la gestion des immeubles.
- Comme complément/alternative aux *offres classiques de formation et de perfectionnement professionnels*, il s'agit de développer des réseaux locaux d'acquisition de connaissances (Modèle Suisse) pour les sociétés immobilières et propriétaires d'immeubles (service de conseil au démarrage, échange d'expériences entre entreprises intéressées, création d'outils informatiques ultramodernes, objectif d'efficacité de groupe); une aide financière d'encouragement est fortement conseillée pour ce genre de réseaux, car cet instrument permet d'atteindre un très haut degré d'efficacité du programme grâce à la confiance réciproque des responsables de l'énergie et à l'effet multiplicateur de facteur 10 (par rapport au service de conseil au démarrage).

Transparence du marché: Le *passport bâtiment*, actuellement mis en œuvre dans les Etats membres sur la base de la directive de l'UE, devrait s'appliquer sous peu aux bâtiments commerciaux en Suisse. Il vise à créer une plus grande transparence pour la location et la vente. Il faut toutefois aussi augmenter la transparence du marché de la construction et de la rénovation lors de la planification et de l'appel d'offres: il convient en particulier d'abandonner l'idée très répandue de la minimisation des coûts d'investissement et de promouvoir le *concept des coûts du cycle de vie comme méthode d'évaluation pour la rentabilité*. Ces mesures d'optimisation visant à augmenter la transparence du marché devraient être élaborées par l'économie immobilière et ensuite mises en œuvre par la Confédération ou surtout les cantons et grâce à l'adoption des normes de la SIA.

Marketing: Il importe que les professionnels de l'efficacité énergétique associent leurs solutions techniques à du vécu, à des formes de vie plus saines, au confort et au prestige social. Il faut également prendre en compte les notions de profit économique des bénéfices additionnels (par ex. confort accru, ergonomie améliorée de l'éclairage, meilleure productivité du travail et du capital, protection améliorée contre le bruit et l'infraction, moins longues périodes d'attente d'une location ou d'une location-vente, qualité améliorée). Les connaissances principales basées sur la présente étude pourraient être reprises à des fins d'information et de marketing dans le cadre de publications synoptiques et facilement compréhensibles, comme pour les bâtiments d'habitation, voir OFEN (2003).

Intermédiaires, en particulier adoption de normes, formation et perfectionnement professionnels

On sous-estime parfois le rôle des intermédiaires, en particulier si l'adoption des normes ou la standardisation réduisent les coûts de transaction ou si la formation et le perfectionnement professionnels suppriment l'obstacle de connaissances trop lacunaires.

Normalisations, standardisations et benchmarks

La construction et la rénovation des bâtiments commerciaux se caractérisent par une haute complexité et par une grande liberté dans la conception (et des erreurs possibles dans la planification). Quant aux coûts et aux indices techniques, ils varient considérablement. Pour pouvoir réaliser des solutions efficaces en termes d'énergie, les acteurs ont besoin d'aides en matière d'orientation et de décision lors de décisions relatives aux investissements et lors de la planification, d'autant plus qu'ils s'occupent souvent uniquement d'un aspect partiel. Les normes de technique énergétique telles que SIA 380/4, SIA 380/1 ou SIA 382/1 offrent ces outils de décision pour le domaine technique, notamment parce qu'elles font une distinction entre les solutions standards et les solutions axées sur l'efficacité énergétique. Les normes et les benchmarks devraient s'appliquer aussi bien au niveau du système (total des besoins énergétiques annuels) qu'au niveau des composants isolés (niveau important permettant de prendre en compte les différentes structures du marché caractérisées par une forte division du travail et une forte spécialisation ou alors par des entreprises de petite taille). Par ailleurs, les normes et les recommandations servent de bases à la diffusion des informations, aux prescriptions et au droit privé.

- Diffusion des informations: Les normes (par ex. sur la protection thermique, le calcul de la consommation d'énergie de refroidissement ou le dimensionnement des installations) et les recommandations (par ex. sous forme de valeurs-limites et valeurs-cibles) servent d'éléments d'information et d'outils de conception pour les professionnels dans la pratique; elles ne doivent pas être ancrées dans la loi. Tel est notamment le cas quand les normes et les benchmarks sont mis en œuvre sous forme d'outils de conception relativement faciles d'utilisation. En effet, les normes de conception et les benchmarks constituent souvent de meilleurs canaux d'information que les résumés d'articles professionnels ou les rapports de recherche. Il convient d'examiner dans quelle mesure ces outils doivent être complétés par des modules de rentabilité avec indices de coût intégrés.

- Prescriptions: Les normes harmonisées au niveau national et peu à peu au niveau européen sont des bases auxquelles les concepteurs, législateurs et autorités d'exécution peuvent se référer.
- Droit privé: S'agissant des contrats de prestations de droit privé pour le bâtiment, on peut se référer aux normes de calcul et aux valeurs-limites et valeurs-cibles intégrées. Cela supprime les asymétries de l'information et facilite la compréhension entre les acteurs impliqués, tout en augmentant l'efficacité en matière de rentabilité. Si les contrats de droit privé se fondent sur des normes, les maîtres d'ouvrage ont davantage de facilités pour exprimer leurs besoins et leurs exigences à l'adresse des fournisseurs de prestations.

Concernant l'évaluation de la rentabilité des diverses options d'investissements, il faut faire la distinction entre les normes concernant la méthode et celles concernant le contenu. La norme SIA 480 sur le calcul de rentabilité constitue une bonne base pour la méthode. S'agissant du contenu, c'est-à-dire des indices de coût et benchmarks de best practice au plan économique, il faut impérativement prendre des mesures. Pour des domaines partiels, le site internet «bestellerkompetenz.ch» destiné aux maîtres d'ouvrage et les outils de planification des coûts du CRB sont de bon conseil. Il manque cependant certains domaines partiels importants comme par ex. les éclairages, ainsi que les indices de coût de produits ou de solutions d'efficacité énergétique plus poussée (entre autres parce qu'on les applique plus rarement). Compte tenu de ces constatations, les auteurs recommandent ce qui suit:

- Les normes basées en grande partie sur le droit privé et l'élaboration d'outils de conception devraient en tout cas continuer à bénéficier de l'actuel soutien de l'Etat. La création et la mise à jour des indices de coût en particulier sont relativement onéreuses. Il faudrait si possible créer des mesures incitatives afin que les utilisateurs communiquent leurs expériences et leurs indices de coût internes.
- Il convient par ailleurs de soutenir le développement de benchmarks intégrés et d'outils d'intégration et de conception, auxquels tous les architectes, concepteurs orientés vers la technique et planificateurs des coûts puissent se référer (par ex. SIA 380/1 et SIA 380/4 contenant des indices de coût ou les outils du CRB associés à des outils concernant la demande énergétique).

Standards techniques pour commandes et réglages adaptatifs: Dans les bâtiments commerciaux, les flux d'énergie sont soumis à une forte dynamique et à de fortes interactions. L'état actuel des techniques de mesures, de capteurs et de régulation parfaitement prendre en compte cette dynamique et ces interactions; mais aujourd'hui, il n'est pas utilisé ou seulement très peu. Le réglage des installations du bâtiment est souvent basé sur des valeurs seuils momentanées et se réfère rarement aux autres domaines de la technique et/ou à l'inertie du bâtiment. Il manque des logiciels de réglage capables de prendre en compte la dynamique de la physique du bâtiment et les futurs paramètres tels que les prévisions météorologiques (prévisions sur la température, les nuages et le vent) et l'utilisation prévisible du bâtiment (par ex. pour les bâtiments ouverts au public). On pourrait remédier à ce manque grâce à des concepts de réglage en réseaux agissant de manière précoce et non contre, mais avec la physique du bâtiment.

Formation et perfectionnement professionnels

Au cours de la saisie des données sur les coûts et des indices de technique énergétique et lors des contacts avec les associations et organisations professionnelles, on a constaté que les professionnels orientés vers la technique ont souvent des connaissances lacunaires sur les indices de coût et qu'inversement, les professionnels orientés vers les coûts ont peu de connaissances sur la technique. Par ailleurs, on note un manque de supports de travail et d'outils informatiques pour déterminer les principaux rapports coûts/bénéfices en vue des mesures d'optimisation. Pour pallier ces déficits, il est conseillé de lancer une campagne intensive et coordonnée de formation et de perfectionnement professionnels. Conçue spécifiquement pour les groupes cibles, cette campagne devrait avoir pour objectif de renforcer les compétences des demandeurs et fournisseurs de prestations dans le bâtiment. Elle s'adresse donc simultanément aux différents groupes d'acteurs:

- *Offres de formation et de perfectionnement.* Ces offres devraient comprendre des formations intensives sur plusieurs années d'ingénieurs spécialisés en bâtiments (par ex. dans les hautes écoles spécialisées), mais aussi des cours de perfectionnement «à seuil bas», c'est-à-dire pouvant être suivis facilement.
- Elaboration de *publications professionnelles spécialisées.* En l'occurrence, le programme RAVEL (sur l'utilisation rationnelle de l'électricité) du début des années 1990 peut servir de base et de modèle. En plus des contenus techniques professionnels, une place importante devrait revenir aux aspects économiques (indices de coût, considérations sur les coûts du cycle de vie et sur les rapports coûts/bénéfices). Pour modèle, on peut citer également les documents internes de travail et de planification de Migros sur la «best practice».
- En complément des publications spécialisées susmentionnées, il convient de développer des *outils de travail et des outils informatiques.* Ces outils devraient être faciles d'utilisation et couvrir les thèmes des coûts, de l'énergie et du confort. Pour pouvoir prendre en compte les interactions et les données de la physique du bâtiment, ils doivent comporter les résultats paramétrisés des calculs de simulation. En plus de la manière de calculer «vers l'avant» (les inputs des indices techniques et économiques donnant des résultats sur les coûts et bénéfices), il faudrait également pouvoir calculer les valeurs à rebours (calculs de benchmark): Quel est le surcoût acceptable pour une solution plus efficace énergétiquement si l'on veut que les investissements supplémentaires soient rentables grâce à la réduction des coûts énergétiques?).
- Pour compléter les offres classiques de formation et de perfectionnement ainsi que les services de conseil, il s'agit de promouvoir des réseaux locaux d'acquisition de connaissances comme cela se pratique déjà avec succès dans le Modèle énergétique suisse.

Même si toutes les activités recommandées plus haut devraient relever principalement des organisations économiques elles-mêmes et de certaines entreprises, une initiative des pouvoirs publics et l'appui financier et conceptuel de la Confédération, des cantons ou des plus grandes communes seraient sans doute bienvenus, car lesdites activités sont d'intérêt public et elles constituent des apports à l'économie globale (emploi, amélioration des potentiels d'exportation, efficience économique).

Politique et administration

Seules les mesures émanant de la politique ou de l'administration et découlant directement des résultats de la présente analyse sont mentionnées ci-après, et non pas d'autres mesures tout aussi importantes comme par ex. l'internalisation des coûts externes par le biais des taxes sur l'énergie ou des certificats d'émissions.

Prescriptions et mise en œuvre

Les prescriptions concernant la technique et l'architecture dans le secteur du bâtiment, en particulier pour les nouvelles constructions, se sont avérées comme un outil réel et efficace. Indirectement, les dispositions affectant les bâtiments neufs ont aussi un effet non négligeable sur les bâtiments existants, en ce sens que les progrès techniques induits influent également sur les rénovations des bâtiments et des installations.

En politique environnementale, la consommation d'énergie et le type d'agents énergétiques (pas la puissance) sont des valeurs déterminantes, car on évalue généralement les retombées sur l'environnement en fonction de la consommation d'énergie. Dans cette optique, les solutions globales (selon la terminologie SIA) sont donc préférables. Du point de vue de l'économie énergétique et s'agissant de l'électricité, la puissance requise a aussi son importance, notamment pour les profils de la demande avec un caractère marqué de charge maximale, comme c'est le cas pour le

refroidissement des bâtiments. Au plan de la technique de mise en œuvre, les indices spécifiques (par ex. la puissance spécifique à installer) sont aussi plus faciles à utiliser.

Il est donc conseillé de recourir à une *démarche duale*, telle que celle appliquée dans le canton de Zurich et celle envisagée par la nouvelle SIA 382. La souplesse dans la procédure d'autorisation peut s'accompagner de mesures incitatives pour les installations énergétiquement efficaces: une installation dont la demande est inférieure à une valeur seuil donnée peut être posée sans autres réserves. Si le seuil est dépassé, il faut obligatoirement établir la preuve du besoin et demander une autorisation; les mesures restreignant la consommation des bâtiments commerciaux (par ex. protection solaire et éclairage avec réglage) et l'utilisation d'installations efficaces (exigence minimale pour le COP ou le COPA) devraient alors être justifiées.

Pour obtenir une rénovation adéquate des bâtiments et équipements existants dans le cycle de réinvestissements, on pourrait envisager une obligation de rénover comme outil subsidiaire, dont les modalités exactes seraient à définir (critères, délais). Les expériences faites avec certaines installations (par ex. les chaudières) donnent des résultats positifs. S'agissant des bâtiments, on pourrait (en raison des frais d'exécution) enregistrer les gros consommateurs, dont la demande d'énergie spécifique se situe nettement en dessus de la moyenne. Dans un délai imparti, les entreprises ou propriétaires d'immeubles devraient prouver qu'ils réduisent leur consommation au niveau imposé jusqu'à un temps t ou comme moyenne sur une certaine période. Ce type de procédure est déjà appliqué de manière identique dans les cantons de ZH (modèle pour gros consommateurs) et de GE (DIFC obligatoire pour une demande spécifique élevée ou renonciation au DIFC lors de garantie d'assainissement). En ville de Zurich, le modèle pour gros consommateurs est encore lié à des incitations financières de la part de l'EWZ (Service d'électricité de la Ville de Zurich) (10% de rabais si l'objectif d'efficacité est atteint).

Dans la mesure du possible, les lois et ordonnances doivent être harmonisées au plan national. En l'occurrence, les prescriptions énergétiques des cantons, avec leur structure modulaire, sont un outil approprié. Elles permettent de prendre en compte les différentes conditions des cantons concernant les capacités de mise en œuvre et la composition du parc immobilier.

Recherche et développement

Il incombe dès lors à la recherche et au développement de transformer les rapports entre la protection solaire, les charges internes, la technique du bâtiment et les solutions à coûts modérés, qui ont été établis dans la présente étude à l'aide de calculs de simulations complexes, en outils de conception simples et rapides.

Les modèles actuels d'économie énergétique pour la projection des futurs besoins énergétiques ne prennent pas explicitement en compte l'aspect confort, alors qu'il faudrait prendre en considération l'augmentation des charges thermiques internes et des charges externes due à une plus forte densité d'occupation, la bureautique et les parts plus élevées de vitrages, la température extérieure qui a tendance à augmenter (changement de climat), les besoins de confort accru des utilisateurs des bâtiments et les progrès de productivité souhaités par les employeurs tant publics que privés.

Quant aux branches de la technique du bâtiment, elles doivent notamment étudier dans le détail et développer les concepts de réglages coordonnés entre les différentes fonctions (intégrant l'utilisation de la lumière du jour, le dispositif antiéblouissant, la protection thermique, la protection contre la surchauffe, et le cas échéant, agissant de manière décentralisée), ainsi que les concepts de façades. Il faut citer en particulier des surfaces variables et plus sélectives, qui permettent d'avoir des places de travail sans éblouissement et éclairées à la lumière du jour avec un contact visuel illimité vers l'extérieur (par ex. en combinant des éléments de guidage de la lumière du jour et des vitrages électrochromes, cf. par ex. Häusler et Berg, 2002), tout en remplissant les fonctions de protection susmentionnées, afin de garantir un confort thermique accru et en même temps une efficacité énergétique élevée.

Par ailleurs, il convient d'examiner plus à fond les rapports entre le confort (l'inconfort) thermique et la qualité de l'éclairage, ainsi que leurs incidences sur la santé et la productivité des utilisateurs des bâtiments, afin de pouvoir, dans un second temps, quantifier les préjudices et les améliorations au plan économique.