

Binz | Bichsel | Geissler | Hall | Huber | Steinke | Weickgenannt

# Constructions efficaces

Concepts, critères, systèmes



suisse énergie



Conférence des directeurs  
cantonaux de l'énergie



# Contenu

<b>La construction efficiente, ou la clé du tournant énergétique</b>	<b>3</b>	<b>5. Ventilation, climatisation et refroidissement</b>	<b>61</b>
<b>1. Energie et bâtiment</b>	<b>5</b>	Qualité de l'air	61
La consommation d'énergie dans le parc immobilier suisse	5	Méthodes de ventilation et systèmes	64
La construction efficiente, partie intégrante du secteur de la construction	5	Ecoulement de l'air ambiant	68
Flux d'énergie au niveau du bâtiment	7	Ventilation dans la rénovation	71
Confort	11	Centralisé ou décentralisé?	72
Sources	13	Alimentation en air efficiente	74
<b>2. Coordination, planification et optimisation du besoin énergétique</b>	<b>15</b>	Sources	74
<b>3. Bâtiment – Forme et enveloppe</b>	<b>19</b>	<b>6. Electricité</b>	<b>75</b>
Corps du bâtiment	19	Appareils ménagers	75
Enveloppe du bâtiment	20	Eclairage	83
Protection thermique	21	Sources	91
Éléments de construction opaques de l'enveloppe thermique du bâtiment	24	Photovoltaïque	92
Élimination des points faibles de l'enveloppe du bâtiment	33	<b>7. Energie grise</b>	<b>97</b>
Sources	34	Données	97
Vitres	35	Répartition sur le bâtiment	98
Protection thermique estivale	39	Choix des matériaux	99
Exigences et justificatif	41	Bilan global	99
Approvisionnement en lumière naturelle	42	Life Cycle Energy	100
Lumière naturelle et intrants thermiques	44	Amortissement énergétique des installations photovoltaïques	100
Fenêtres et façades	46	Rénovations de bâtiments	100
Sources	48	Optimisation	101
<b>4. Chauffage et eau chaude</b>	<b>49</b>	Sources	102
Terminologie et notions	49	<b>8. Concepts, stratégies, standards</b>	<b>103</b>
Standards énergétiques	49	Construction efficiente – Objectifs et moyens	103
Energies renouvelables	49	Concepts d'optimisation et technologies clés	104
Pointes de puissance électriques	49	Rénovation énergétique des bâtiments	108
Concepts	50	Bâtiments à autres usages	110
Exemple	55	Optimisation énergétique et automatisation du bâtiment	111
Thèmes choisis	58	Bilan énergétique global	114
Chauffages à bois dans les logements	58	Standards énergétiques et labels de durabilité	116
Sources	59	Sources	120
		<b>9. Annexe</b>	<b>121</b>
		Auteurs	121
		Répertoire des mots-clés	122

## Impressum

**Constructions efficaces – Concepts, critères, systèmes**

**Edition:** Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau

**Auteurs:** Armin Binz, Jürg Bichsel, Achim Geissler, Monika Hall, Heinrich Huber, Gregor Steinke, Beate Weickgenannt

**Direction de projet:** Achim Geissler, Fachhochschule Nordwestschweiz; Institut Energie am Bau, Muttenz

**Lectorat spécialisé:** Caroline Hoffmann, Christof Bucher

**Lectorat et mise en page:** Faktor Journalisten AG, Zürich; Othmar Humm, Christine Sidler, Noemi Bösch, Jacqueline Felder

**Traduction:** Ilsegret Messerknecht

**Lectorat spécialisé en français:** Charles Weinmann, Weinmann-Energies SA

Cet ouvrage fait partie de la série de publications spécialisées «Construction durable et rénovation». Il se base sur les cours du cursus Master visant à l'obtention d'un certificat «Energie et construction durable» ([www.en-bau.ch](http://www.en-bau.ch)), une offre de formation continue de 5 hautes-écoles spécialisées suisses. Cette publication a été financée par l'Office fédéral de l'énergie OFEN/SuisseEnergie et la Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK).

**Commande:** A télécharger gratuitement sous [www.suisseenergie.ch](http://www.suisseenergie.ch) → Formation → Publications → Ouvrages spécialisés ou sous forme de livre auprès de Faktor Verlag, [info@faktor.ch](mailto:info@faktor.ch) ou [www.faktor.ch](http://www.faktor.ch)

Juin 2015

ISBN: 978-3-905711-38-7

# La construction efficiente, ou la clé du tournant énergétique

**Armin Binz**

Cela fait près de 40 ans que la construction efficiente est un sujet d'actualité. Même si au fil des ans, son importance a fluctué avec les prix de l'énergie, beaucoup de choses ont été accomplies. Constructions nouvelles, systèmes de chauffage, pompes et ventilateurs, appareils et éclairage, sont considérablement plus efficaces que jadis. En outre, le savoir en matière de construction efficiente est devenu inestimable. Alors pourquoi cet ouvrage? D'une part, justement en raison de la surabondance de matériel disponible. Cet ouvrage doit permettre de discerner les arbres dans une forêt trop dense. En d'autres termes, de dégager l'essentiel et de classer par ordre d'importance le savoir-faire, les technologies et les outils. Le spécialiste expérimenté doit pouvoir, sans effort, actualiser ses connaissances globales dans les domaines techniques en marge de sa spécialité. Les étudiants et néophytes doivent trouver en cet ouvrage un guide qui leur permettra de résumer leur propre domaine de compétence et d'acquérir des connaissances de base sur la construction efficiente.

D'autre part, cet ouvrage est nécessaire car dans ce domaine, le savoir devient très vite obsolète. L'évolution et la sélection de technologies efficaces au fil des décennies ont provoqué un certain écrémage, ainsi qu'un recentrage sur des technologies clés. De nombreuses technologies ont fait leurs preuves et se sont imposées (p.ex. PAC ou enduits extérieurs), tandis que d'autres ont été rattrapées par l'évolution et ont disparu (p.ex. volets isolants) et bientôt également les lampes à économie d'énergie. La construction efficiente est ainsi devenue une affaire de bon sens. Mais le tournant énergétique a induit des modifications de fond. Ainsi, les énormes progrès technologiques réalisés dans le domaine des pompes à chaleur ont relativisé la nécessité de disposer d'une protection thermique de très haute qualité. Il n'est plus nécessaire de coller du polystyrène sur toutes les façades, ni de faire la chasse aux

ponts thermiques à n'importe quel prix.

La situation a évolué sur le terrain ardu de la construction efficiente et de la rénovation des bâtiments construits avant 1980. La frontière entre construction nouvelle et rénovation est de plus en plus floue. Les rénovations réussies ont justement pour principale caractéristique le fait que de grandes parties de l'enveloppe du bâtiment sont conçues comme une construction nouvelle. Les surélévations et construction d'annexes, l'intégration de balcons existants et la construction de nouvelles façades dotées de grandes surfaces vitrées offrent les mêmes possibilités techniques en termes de construction que la construction nouvelle. Elles correspondent en outre à la volonté politique de densification, telle qu'elle est décrite dans la loi révisée sur l'aménagement du territoire, adoptée par le peuple suisse au printemps 2011 et bientôt appliquée par les cantons. Cette tendance s'accompagne également de celle qui consiste, dans la rénovation, à construire de plus en plus de systèmes intégraux au détriment des matériaux artisanaux, avec des conséquences positives en termes de coût, de qualité et d'efficacité énergétique.

Le fait que l'environnement politique ait également connu de profonds changements ressort très nettement dans la décision du Conseil fédéral relative au tournant énergétique: l'approvisionnement en énergie, un secteur économique qui, depuis des décennies, s'est largement mondialisé et achète à l'étranger trois quarts de l'énergie produite à partir d'agents énergétiques fossiles ou nucléaires, doit être restructuré. L'approvisionnement futur en énergie doit avant tout être local et renouvelable. Etant donné que la moitié de la consommation énergétique est consacrée à l'exploitation des bâtiments et que l'efficacité énergétique (correctement mise en œuvre) s'accompagne d'un gain de confort, d'une amélioration de l'utilisation et d'une valorisation du gros œuvre, la construction efficiente sera la clé de voûte du tournant énergétique.

# Energie et bâtiment

## Armin Binz La consommation d'énergie dans le parc immobilier suisse

Plus de la moitié de la consommation d'énergie (et env. la moitié de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre) en Suisse est affectée à la réalisation, à l'entretien et à l'exploitation du parc immobilier (illustr. 1). L'exploitation des bâtiments requiert de la chaleur utile, de l'eau chaude et la majeure partie de la consommation d'électricité (éclairage, appareils et technologies d'information et de communication), ainsi que de l'énergie destinée aux installations techniques du bâtiment (pompes, ventilateurs, vannes etc.).

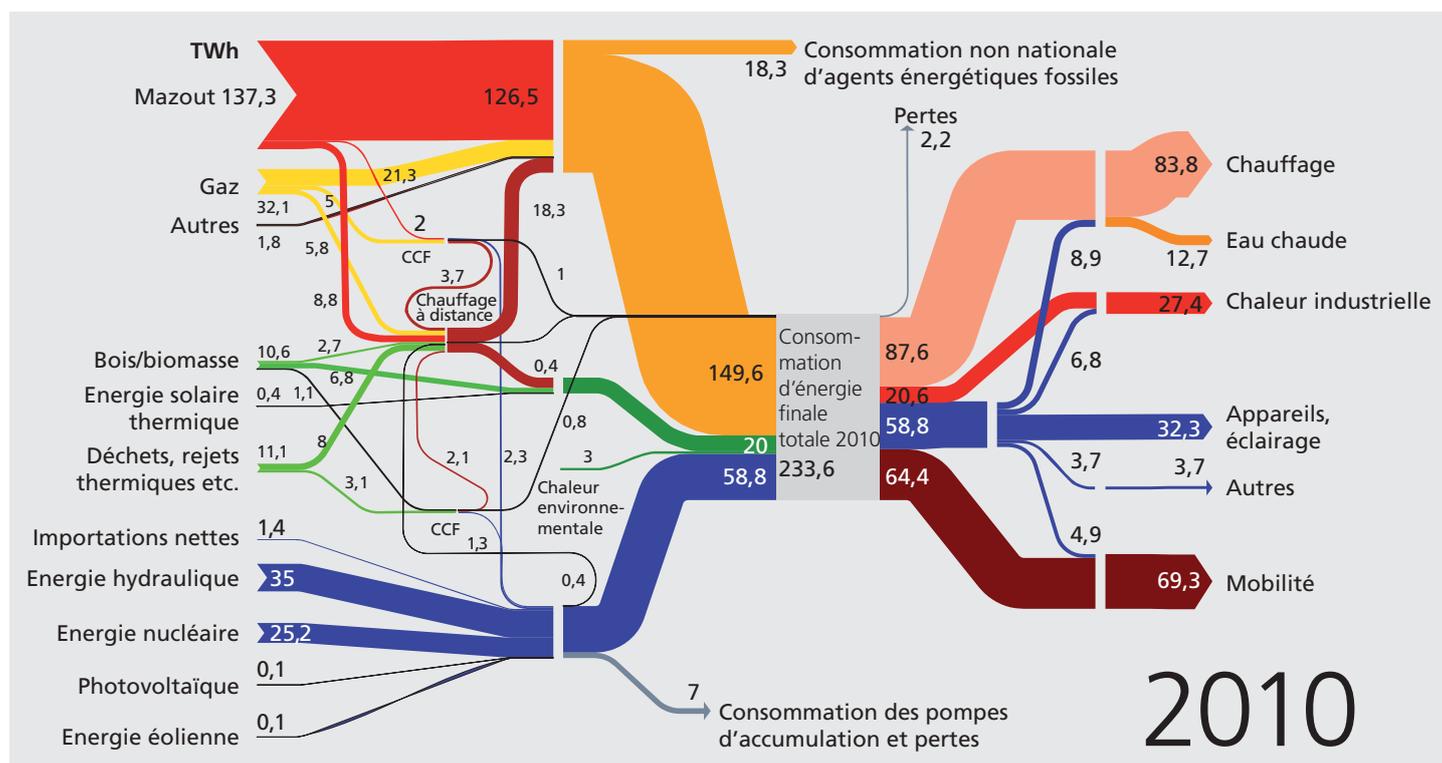
La consommation d'énergie destinée à la construction ou à la rénovation (énergie grise ou dépense globale du secteur de la construction) n'est pas décomptée séparément dans l'illustration 3 et est affectée à la consommation d'énergie résiduelle. Il s'agit d'env. 30 TWh, en grande partie importés (ce qui n'est pas représenté dans l'illustration 3 mais est néanmoins important). L'il-

lustration 2 montre que les bâtiments d'habitation constituent une priorité en termes de construction et de rénovation efficiente pour le parc immobilier suisse.

## La construction efficiente, partie intégrante du secteur de la construction

En 2011, les investissements dans l'immobilier s'élevaient en Suisse à 45 milliards de francs au total, deux tiers étant destinés à la construction, un tiers à la rénovation. Sur plus de 14 milliards de francs injectés dans la rénovation, env. 3 à 4 milliards de francs concernaient des mesures pertinentes sur le plan énergétique. La moitié de cette somme était relative à des mesures constructives (enveloppe du bâtiment) et l'autre moitié aux mesures techniques (remplacement du chauffage, intégration d'une aération douce etc.), ces mesures ne visant pas uniquement des objectifs énergétiques. De nouvelles fenêtres doivent en premier lieu être ca-

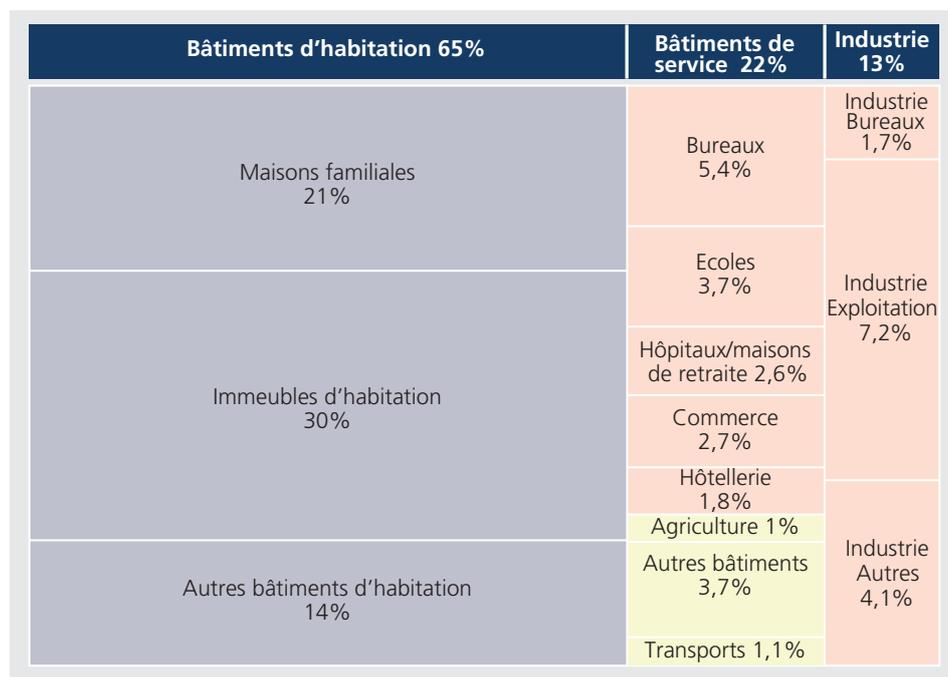
Illustration 1: Consommation d'énergie nationale en 2010 en Suisse selon les finalités d'utilisation en TWh/an. Source: [1], base de données; [2]



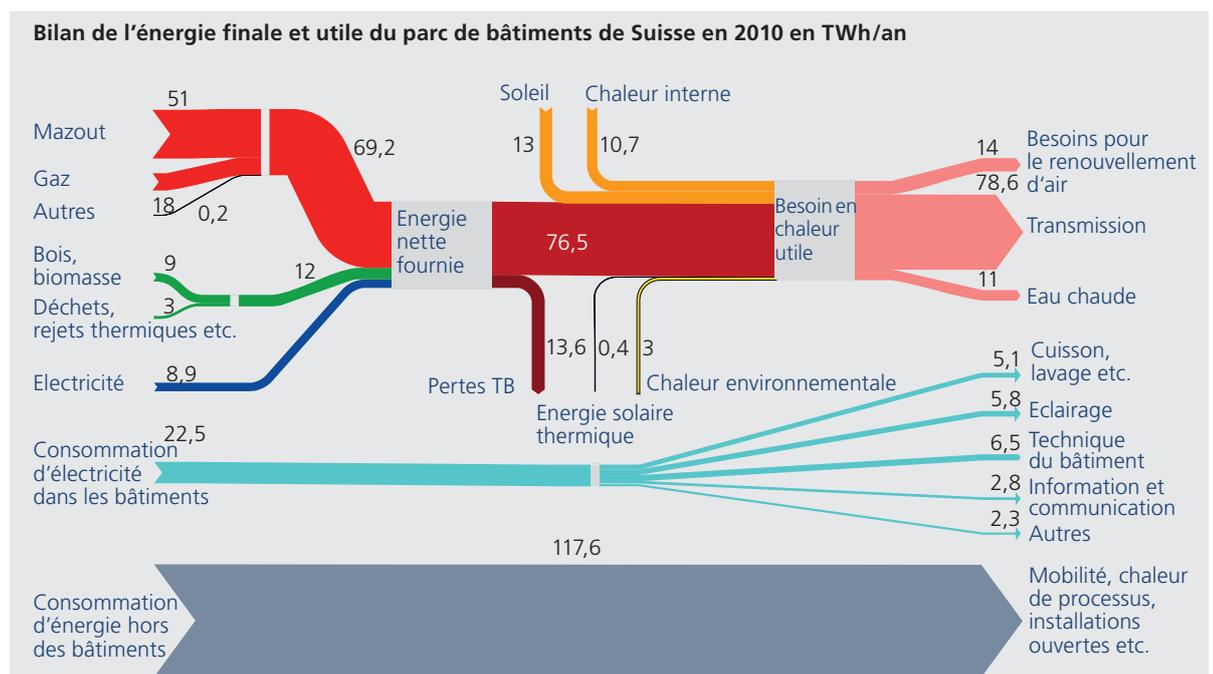
pables de mieux remplir leurs fonctions que les anciennes. Toutefois, un vitrage de protection thermique moderne apporte l'amélioration énergétique souhaitée (et peut ainsi dans certains cas être subventionné). Dans le cas des constructions nouvelles, il est plus difficile d'attribuer une part d'investissement à l'efficacité énergétique. En proportion, cette part sera nettement plus faible que pour les rénovations. En valeur absolue, elle devrait normale-

ment être du même ordre de grandeur que dans la rénovation (illustr. 4). Malgré tout, on peut affirmer que les prescriptions énergétiques d'une part et les volontés en matière d'efficacité énergétique qui en résultent d'autre part, qui se traduisent dans les différents standards Minergie ou dans la voie SIA vers l'efficacité énergétique, couvrent leur propre «part de marché d'efficacité énergétique», même dans les constructions nouvelles.

**Illustration 2:**  
Surface de référence énergétique du parc immobilier suisse selon les utilisations (2004). 100 % correspondent à 665 millions de m<sup>2</sup>.  
Source: [3]



**Illustration 3:**  
Consommation d'énergie finale nationale en 2010 en Suisse en TWh/an, répartie selon les parts nécessaires à l'exploitation et l'utilisation du parc immobilier et selon la consommation pour toutes les autres finalités (mobilité, énergie de processus de l'industrie, etc.). Représentation selon les définitions énergétiques de la norme SIA (énergie nette fournie à la place de l'énergie finale).  
Source: [1], [5], [9], [10], et calculs de A. Binz



## Flux d'énergie au niveau du bâtiment

Au cours des quatre dernières décennies, la construction efficace est passée du statut de simple «économie d'énergie de chauffage» à une optimisation énergétique globale, et intégrée au projet, des constructions et projets de construction. Sept domaines sont désormais concernés:

**1. Chauffage:** Ce domaine ayant été traité en priorité par le passé, l'optimisation continue des constructions nouvelles est aujourd'hui intégrée à la législation. Ce domaine conserve toutefois une importance cruciale car le chauffage représente encore un tiers de la consommation d'énergie totale. La rénovation énergétique des bâtiments existants reste ainsi la tâche la plus urgente.

**2. Le refroidissement ambiant** semble malheureusement être un sujet d'avenir. La demande de grandes surfaces vitrées, les besoins de confort accrus et le non-respect des règles de protection thermique estivale conduisent de plus en plus fréquemment, dans les bâtiments à autres usages comme dans les bâtiments d'habitation, à la nécessité d'installer un système de refroidissement actif. Les étés de plus en plus chauds contribuent également à cette tendance.

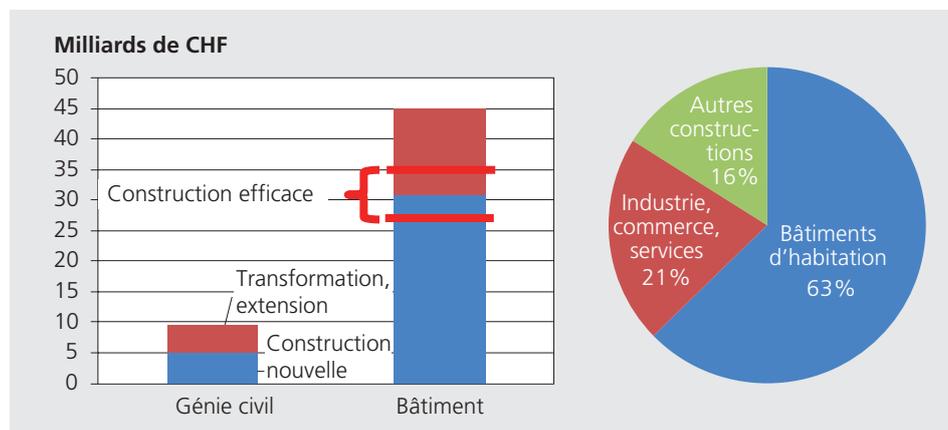
**3. Eau chaude:** La marge de manœuvre, en ce qui concerne le besoin énergétique destiné à la production d'eau chaude, se situe entre l'optimisation de la technique du bâtiment et un comportement responsable des utilisateurs. Ces deux approches présentent un grand potentiel.

**4. Consommation électrique pour l'éclairage et les appareils:** Il s'agit en réalité de deux domaines d'optimisation fondamentalement différents – «l'éclairage» et «les équipements» (du réfrigérateur à l'ordinateur). Ce domaine regroupe toutes ces applications car l'agent énergétique, le fournisseur d'énergie ainsi que le planificateur et l'installateur sont souvent identiques.

**5. Energie grise:** Au cours des dernières années, un travail important a été réalisé sur les bases nécessaires à la quantification de l'énergie grise des matériaux et systèmes de construction, ainsi que sur les méthodes d'estimation de l'énergie grise de bâtiments et projets de construction. Aujourd'hui, le cahier technique SIA 2032 «Energie grise» ainsi que des méthodes et outils appropriés tels que Minergie-Eco, le catalogue électronique des éléments de construction et autres logiciels destinés aux planificateurs, offrent la possibilité de prendre en compte correctement l'énergie grise dans le projet.

**6. Autoproduction de chaleur et d'électricité:** Outre la production d'eau chaude, largement répandue, à l'aide de capteurs solaires thermiques, l'autoproduction de chaleur et d'électricité, notamment avec les installations photovoltaïques de plus en plus abordables, est devenue un thème important du tournant énergétique. Elle implique de nouveaux défis à relever, p. ex. en termes de surcharge du réseau électrique, de stockage décentralisé et de maximisation de l'utilisation propre de la production d'électricité.

*Illustration 4: Investissements dans le bâtiment en Suisse en 2011, en milliards de francs, répartis selon les catégories construction nouvelle et rénovation, ou selon le type d'utilisation du bâtiment. L'efficacité énergétique comme composante du marché pour la construction nouvelle et la rénovation.*



**7. Mobilité induite:** Le type et l'ampleur d'une partie de la mobilité dépend des bâtiments. En premier lieu de leur localisation, mais également des mesures de promotion ou d'entrave de différents types de déplacements. L'éventail des mesures s'étend des dessertes optimales pour les piétons et des possibilités de garage de vélo jusqu'à la réduction des places de stationnement pour les voitures. Le cahier technique SIA 2039 «Mobilité – Consommation énergétique des bâtiments en fonction de leur localisation» permet aux planificateurs d'un bâtiment d'inclure également cet aspect.

Les chapitres techniques de cette publication traitent de ces domaines en dégageant des axes principaux. Une optimisation énergétique globale n'implique pas seulement de couvrir tous les domaines de l'énergie mais également de prendre en compte toute la chaîne de transformation de l'énergie. Etant donné que le but ultime est d'économiser les ressources énergétiques et de réduire les émissions de gaz à effet de serre (et autres), il convient de s'interroger sur les effets des économies d'énergie utile et finale à ce niveau de base (illustr. 6).

Le diagramme des flux d'énergie de l'illustration 6 se base sur la construction d'un immeuble d'habitation typique sur le Plateau suisse. Toutes les valeurs spécifiques du diagramme, multipliées par la surface de référence énergétique de 600 m<sup>2</sup>, donnent les valeurs absolues pour le bâtiment. Le diagramme illustre le flux d'énergie de gauche à droite. Toutefois, l'effet des besoins va de droite à gauche: à droite sont indiquées les valeurs du besoin énergétique résultant de la construction et de l'exploitation du bâtiment. Pour produire l'énergie utile nécessaire à la couverture des besoins, il faut acheter de l'énergie finale et la transformer. Cette énergie finale résulte quant à elle des ressources d'éner-



Illustration 5: Les sept domaines de la construction efficace.

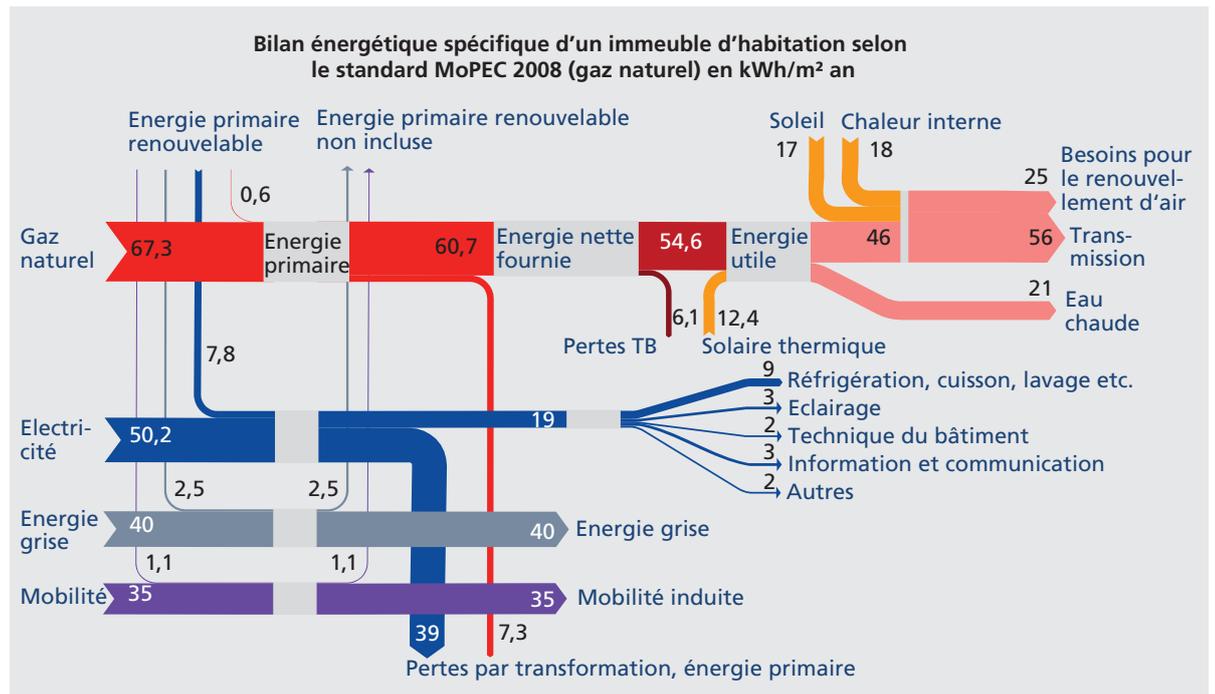


Illustration 6: Flux d'énergie spécifiques en kWh par m<sup>2</sup> SRE par an dans une construction d'immeuble d'habitation moyenne, avec un générateur de chaleur à gaz naturel pour le chauffage et la production d'eau chaude.

gie primaire. Les pertes de transformation associées ainsi que les sources d'apport d'énergies sont représentées latéralement. L'illustration 6 montre la situation actuelle de la construction efficiente.

### **Chaleur pour le chauffage et l'eau chaude**

L'immeuble d'habitation représenté n'est pas une construction modèle, mais illustre la situation actuelle typique moyenne. Il s'agit d'un objet destiné à la location. Des coûts de construction bas ainsi qu'un bon rapport prix/prestation sont donc primordiaux et l'optimisation énergétique n'est pas une priorité. Un chauffage à gaz moderne et une protection thermique conforme à la loi répondent à ces critères. Les exigences légales en termes de chauffage et de production d'eau chaude sont malgré tout élevées [4]. Le besoin en chaleur utile de 46 kWh/(m<sup>2</sup> an) est tout juste inférieur à la limite légale. Les valeurs des déperditions de chaleur par la ventilation et des apports de chaleur rejetée par les personnes et l'électricité sont des valeurs standard prédéterminées dans le calcul des besoins. La marge d'optimisation se situe uniquement dans la protection thermique de l'enveloppe du bâtiment et dans les apports d'énergie solaire passifs. Sans une protection thermique performante, les prescriptions en vigueur ne peuvent pas être respectées. Néanmoins, une seconde exigence doit également être respectée: la part maximale admissible en énergies non renouvelables. Au maximum 80 % du besoin en chaleur pour le chauffage et la production d'eau chaude peuvent être couverts par des énergies non renouvelables. Etant donné que le besoin en chaleur maximal admissible est ici à peine inférieur à la limite légale et que la chaleur est produite à l'aide d'un agent énergétique non renouvelable (gaz), une solution doit être trouvée. Une meilleure protection thermique serait possible, mais au prix d'un coûteux doublement des couches d'isolation. Le choix d'un chauffage à bois serait envisageable, mais engendrerait également des coûts nettement supérieurs. C'est une solution fréquem-

ment utilisée qui a été choisie: une installation de capteurs solaires thermiques relativement modeste permet de produire env. 60 % de l'eau chaude et ainsi de rester en dessous de la limite des 80 % pour l'apport de gaz naturel (non renouvelable).

De son extraction en tant que ressource primaire jusqu'à sa livraison sous forme d'énergie finale, le gaz naturel présente relativement peu de pertes et nécessite peu d'énergie pour son traitement et son transport. La part renouvelable, dans le traitement de l'énergie, est quasiment négligeable, de sorte que la totalité de l'énergie primaire est insérée à gauche dans le diagramme en tant qu'énergie primaire non renouvelable.

### **Electricité pour les appareils et l'éclairage**

Le flux d'énergie du «courant domestique» n'est illustré que jusqu'à l'énergie utile. Il est inhabituel d'indiquer, pour la consommation d'électricité, les rendements de la transformation de l'énergie finale en énergie utile (combien de cycles de chauffage d'un four par kWh d'électricité et données similaires). On indiquera plutôt l'efficacité des différents appareils, lampes etc. sous forme de grandeurs clés (p.ex. étiquette énergie, efficacité lumineuse en lumen/watt etc.). Le diagramme montre les différentes catégories de consommation concernées. La catégorie réfrigération-lavage-cuisson représente la catégorie de consommation dominante dans un logement moyen. L'importance de la consommation d'électricité se traduit nettement au niveau de la consommation d'énergie primaire. Chaque kWh d'énergie finale électricité (issu du réseau) a été produit (en moyenne) à partir de 2,64 kWh d'énergie primaire non renouvelable. Cette pondération de l'énergie primaire ne correspond pas à la production nationale d'électricité, mais à ce que l'on appelle le mix de consommation, qui contient des parts importantes d'électricité importée.

### **Energie grise**

De grandes quantités d'énergie, appelée énergie grise, se cachent dans la fabrica-

tion, le montage et l'élimination des matériaux de construction. Afin de pouvoir totaliser les teneurs énergétiques des différents agents énergétiques (mazout, essence, électricité gaz etc.), celles-ci doivent être comptabilisées au niveau de l'énergie primaire. C'est pourquoi, le flux de l'énergie grise ne parvient pas au niveau de l'énergie finale, et aucune perte de transformation correspondante ne peut lui être associée (illustr. 6). Dans le cas de l'énergie grise également, la part d'énergie primaire non renouvelable est importante et constitue ainsi un objectif des efforts d'optimisation. La part de l'énergie primaire renouvelable est en général très faible, comme dans l'immeuble d'habitation mentionné. Dans les constructions en bois uniquement, des parts importantes de l'énergie grise basculent de la catégorie non renouvelable dans la catégorie renouvelable (ce qui représente également une possibilité d'optimisation).

### Mobilité

Tout comme l'énergie grise, la mobilité induite par le bâtiment est également directement calculée au niveau de l'énergie primaire et seule la part non renouvelable est prise en compte. Pour donner une vue globale (simplifiée) des flux d'énergie au niveau du bâtiment, l'illustration 6 montre l'importance des domaines de consommation d'énergie, notamment de ceux de l'énergie grise et de la mobilité, qui n'ont que récemment été inclus dans les considérations en matière de construction efficiente.

### Niveaux de transformation de l'énergie

L'énergie est utilisée à la suite de la transformation d'agents énergétiques. Cette transformation s'effectue étape par étape, chaque étape étant associée à des déperditions d'énergie. Voici les principaux éléments de cette procédure.

**Agents énergétiques primaires:** Ils ne sont (dans un premier temps) soumis à aucune transformation. Exemple: Mazout (pétrole brut), gaz naturel, uranium, bois forestier, rayonnement solaire, chaleur terrestre et environnementale.

**Energie finale:** Energie à disposition du consommateur pour être transformée en énergie utile. Elle comprend l'énergie fournie par la dernière étape du processus commercial, et l'énergie produite et utilisée sur place. L'énergie finale fournie au consommateur par la dernière étape du processus commercial (y c. les réseaux voisins) est appelée énergie fournie. Le périmètre de bilan est un élément déterminant. Si le consommateur fournit en retour de l'énergie qu'il a lui-même produite (p. ex. à partir d'énergies renouvelables ou du couplage chaleur-force), l'énergie retournée est soustraite de l'énergie fournie et on parle alors d'énergie nette fournie.

**Energie utile:** Energie résultant de la transformation de l'énergie finale et étant directement utile au consommateur, par exemple sous forme de chaleur dans la pièce, de chaleur extraite de la pièce (refroidissement), d'eau chaude au niveau du point de soutirage, de lumière dans les pièces, de chaleur dans le four, etc.

Base: Normes SIA, Statistique globale suisse de l'énergie

## Achim Geissler **Confort**

Nous passons une grande partie de notre vie dans des espaces clos. Il est donc logique que ces espaces soient soumis à des exigences élevées. Nous devons pouvoir nous y sentir bien. Dans les espaces dotés de postes de travail ou de bureaux, ou dans les salles de classe, notre productivité et notre capacité de concentration sont liées à notre confort. Il faut donc veiller au confort thermique, visuel, acoustique et olfactif ainsi qu'à la qualité générale de l'air.

Les interactions entre confort et besoins en énergie sont multiples. La plus importante concerne la localisation du bâtiment et sa conception. Ainsi, le besoin en énergie d'un bâtiment sans refroidissement actif en été est quasiment indépendant du confort, puisque l'utilisation d'énergie ne permet pas de faire baisser la température de l'air ambiant. Le confort dépend toutefois très fortement de l'exploitation correcte du bâtiment.

Le tableau 1 donne une classification à titre d'exemple, pour un immeuble de bureaux sans installation de ventilation mécanique et sans climatisation, situé en centre-ville sur une rue animée. Sans climatisation, il n'est pas possible, en été, de réagir à un défaut d'actionnement par exemple de la protection solaire. Ce déficit de confort ne conduit certes pas à une augmentation de l'énergie d'exploitation, mais à une forte réduction probable de la valeur d'utilisation des locaux.

### **Confort thermique**

Les bâtiments d'habitation ainsi qu'une grande partie des bâtiments administratifs ayant des exigences élevées en matière d'efficacité énergétique peuvent, dans toutes les régions de Suisse, présenter en été un bon confort thermique sans refroidissement actif. La construction efficace doit permettre d'atteindre cet objectif. Seuls les bâtiments de services présentant des apports thermiques internes élevés ou les bâtiments qui, pour des raisons d'utilisation ou d'architecture, présentent des locaux fortement exposés au soleil (p. ex. un grand vitrage d'angle orienté au sud-

ouest), peuvent ici constituer une exception. Le freecooling offre dans ce cas une aide technique bienvenue, par exemple grâce aux sondes géothermiques d'une installation de pompe à chaleur. La sensation de confort thermique dépend principalement des paramètres suivants: température et vitesse de l'air, température de rayonnement et température de contact (illustr. 7). Comme tous les aspects du confort, elle doit être considérée comme une grandeur individuelle. En d'autres termes, différentes personnes en donneront toujours une évaluation différente dans une seule et même pièce. C'est pourquoi la normalisation utilise différentes grandeurs statistiques. Les principales sont les suivantes: «Pourcentage prévisible d'insatisfaits» (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) en fonction de la température ambiante, et «Risque de courant d'air» (Draught Rate, DR). Dans la planification, on part du principe qu'au moins 5 % des utilisateurs sont insatisfaits.

Ces grandeurs, ainsi que les classes de confort (tabl. 2), permettent de classer ou de vérifier le niveau de confort (à l'échelle de la planification).

### **Confort visuel**

Selon notre activité, nous avons besoin de plus ou moins de lumière. La couleur de celle-ci joue également un rôle important: en fonction de l'heure du jour, la couleur de la lumière a des effets différents sur notre organisme (rythmes circadiens de l'homme – «rythme jour/nuit»), et peut fortement influencer notre capacité de concentration ou notre état général de veille. Sur les postes de travail dotés d'écrans notamment, mais également pour d'autres activités, de grandes différences de clarté dans le champ visuel sont perturbatrices, et les zones nettement plus claires peuvent être éblouissantes. Nous réagissons différemment à ces nuisances visuelles. C'est pourquoi dans ce domaine également, on utilise des valeurs statistiques pour décrire l'intensité d'éblouissement (encadré).

### Confort acoustique

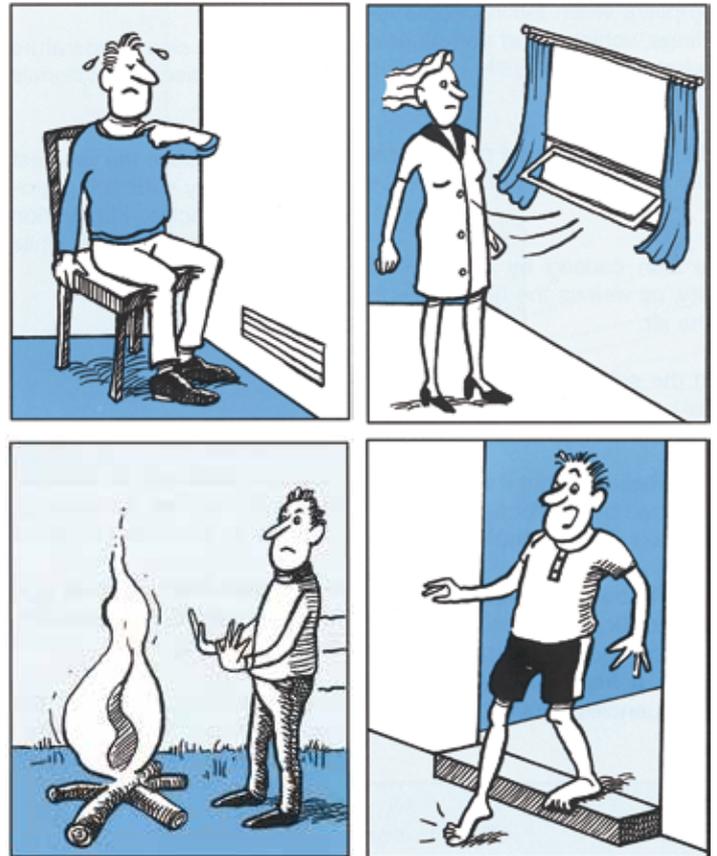
La sensibilité au bruit est également très différente selon les individus. Dans de nombreuses régions, la charge de bruit ne cesse d'augmenter. Il convient de différencier la protection contre le bruit provenant de l'extérieur et des unités d'utilisation voisines (protection phonique) et la protection contre le bruit à l'intérieur d'une pièce (acoustique de la pièce).

La protection phonique présente peu de points de conflit avec les considérations énergétiques. Plus les vitres sont grandes, plus la protection phonique des vitrages diminue mais plus les apports de chaleur solaire augmentent. Plus les vitres sont épaisses, plus la perméabilité à la lumière et la valeur g des vitrages diminuent mais plus la protection phonique augmente. Une fenêtre ouverte ne possède quasiment aucun effet d'isolation phonique, mais pour la protection thermique estivale, il peut être souhaitable d'ouvrir les fenêtres. Dans le domaine de l'acoustique des pièces, les interdépendances sont encore plus faibles. Entre les masses d'accumulation thermiquement activables et les mesures d'acoustique de la pièce, notamment pour les grands bureaux, il existe toutefois souvent un conflit d'objectifs. Les surfaces qui absorbent les bruits sont souvent très poreuses et souples, ce qui s'accompagne en général d'une conductivité thermique plutôt faible, donc d'un découplage entre l'air ambiant et la masse thermique.

*Illustration 7: La température de l'air, la vitesse de l'air, la température de rayonnement et la température de contact influent sur le confort thermique. Source: Innova*

*Tableau 1 (en bas): Exemple de classification de la pertinence énergétique (voir texte)*

*Tableau 2 (à droite): Classes de confort et leurs exigences.*



Classe	Description
A	Haut niveau d'exigence en termes de climat ambiant; recommandé pour les pièces dans lesquelles séjournent des personnes très sensibles ayant des besoins particuliers.
B	Niveau d'exigence normal
C	Niveau d'exigence acceptable, modéré

	Hiver	Été
Confort thermique	Pertinent sur le plan énergétique: Chaleur de chauffage.	Non pertinent sur le plan énergétique.
Confort visuel	Pertinent sur le plan énergétique: Les gains d'énergie solaire peuvent être fortement réduits par une protection contre l'éblouissement.	Assez pertinent sur le plan énergétique: Une protection contre le soleil ou l'éblouissement accroît le besoin en électricité.
Confort acoustique	Peu pertinent sur le plan énergétique.	Non pertinent sur le plan énergétique, mais fortement limité p. ex. pour l'évacuation de la chaleur par la ventilation, p. ex. le matin.
Confort olfactif ou qualité de l'air	Pertinent sur le plan énergétique: Sans installation de ventilation, une ventilation par les fenêtres est nécessaire, pas de récupération de chaleur possible.	Non pertinent sur le plan énergétique: Ventilation l'après-midi, toutefois charge thermique supplémentaire en présence de températures extérieures élevées.

### Confort olfactif et qualité de l'air

Nous ne possédons qu'un sens peu développé pour les insidieux changements de la qualité de l'air, qu'il s'agisse des odeurs ou de la charge de l'air en CO<sub>2</sub>. Une mauvaise qualité de l'air possède toutefois des conséquences directes sur notre capacité de concentration. Un air de mauvaise qualité peut également causer des symptômes tels que des maux de tête. Dans des pièces dans lesquelles séjournent régulièrement des personnes, l'alimentation en air frais en quantité suffisante a une influence sur le plan énergétique. L'air frais est en effet de l'air extérieur, qui doit être chauffé en période de chauffe et éventuellement refroidi en été.

### Sources

- [1] Binz A., Eicher H.-P., Iten R., Keller M., Bacher R.: «Energierespekt», Faktor Verlag, Zurich 2014
- [2] Statistique globale suisse de l'énergie 2010, Office fédéral de l'énergie, Berne 2011
- [3] Zukünftige Entwicklung der Energiebezugsflächen, Wüest & Partner, sur mandat de l'OFEN, Zurich 2004
- [4] MoPEC 2008. Modèle de prescriptions énergétiques des cantons, Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK), [www.endk.ch](http://www.endk.ch)
- [5] Analyse de la consommation énergétique suisse 2000 – 2009 par finalité d'utilisation, Prognos, Office fédéral de l'énergie, Berne, décembre 2010
- [6] Schweizer Bauwirtschaft 2012, Zahlen und Fakten, Société suisse des entrepreneurs, Zurich 2013
- [7] Jakob M. et al: «Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienz-Massnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten», CEPE, Zurich, Office fédéral de l'énergie, Berne 2006
- [8] Schalcher et al., Was kostet das Bauwerk Schweiz in Zukunft und wer bezahlt dafür? vdf Hochschulverlag 2011
- [9] Effizienz und Elektrifizierung Haushalte, Ernst Basler + Partner, VSE, Zollikon 2012
- [10] Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Prognos et al, sur mandat de l'OFEN, Bâle 2012
- [11] CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bei der Erneuerung von Wohnbauten, Econcept, sur mandat de l'OFEN, Zurich 2011
- [12] Mobilisierung der energetischen Erneuerungspotenziale im Wohnbaubestand, Econcept, sur mandat de l'OFEN, Zurich 2005
- [13] Gebäudeparkmodell SIA Effizienzpfad Energie, Dienstleistungs- und Wohngebäude, Institut für Bauplanung und Baubetrieb (ETHZ) et TEP GmbH, sur mandat de l'OFEN, Zurich 2009
- [14] Grundlagen zu einem Suffizienzpfad Energie, Arge Preisig/Nipkow/Jud, sur mandat du Service des bâtiments de la ville de Zurich, 2012.



# Coordination, planification et optimisation du besoin énergétique

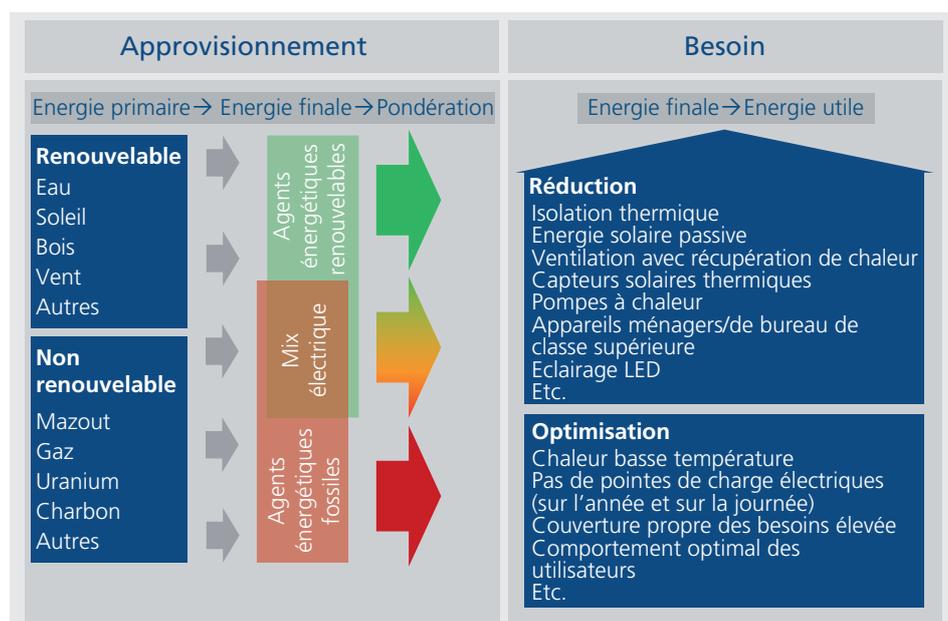
**Armin Binz** La construction efficiente est centrée sur l'optimisation des projets de construction, qu'il s'agisse de constructions nouvelles ou de rénovations. Cet aspect est important et constitue le thème central de cette publication. Mais ce n'est pas le seul. Ensemble, les bâtiments forment des lotissements, des quartiers, des communes, des villes. Ces structures d'habitation sont également importantes en termes de consommation d'énergie. Certaines peuvent afficher une consommation d'énergie excessive. Néanmoins, elles offrent aussi des opportunités supplémentaires pour une utilisation durable de l'énergie.

L'illustration 9 montre de façon schématique les champs d'action de l'optimisation énergétique des bâtiments, entre approvisionnement et besoins. Le côté droit du diagramme représente les mesures de la construction efficiente, divisées en deux parties. D'une part les mesures classiques de réduction des besoins énergétiques, tels que la protection thermique, les systèmes de chauffage et de production d'eau chaude efficients et les technologies optimisées pour les appareils électriques et l'éclairage. Traditionnellement, l'utilisation locale de l'énergie solaire, ainsi que les

technologies de récupération de la chaleur (notamment par la ventilation), sont également affectées à la réduction des besoins. D'autre part, outre cette réduction quantitative des besoins, l'optimisation qualitative joue également un rôle de plus en plus important:

- Des températures (de départ) les plus basses possibles pour le chauffage et la production d'eau chaude.
- La minimisation des charges de pointe électriques du profil des besoins, aussi bien sur l'année (pointe au cœur de l'hiver) que sur la journée.
- Une couverture élevée des besoins propres par une autoproduction d'électricité à l'aide du photovoltaïque.
- Un comportement optimal des utilisateurs ou une facilité d'utilisation de tous les éléments du bâtiment qui peuvent être commandés et consomment de l'énergie, mais aussi mesures et information des utilisateurs ou de l'exploitant du bâtiment.

Ce qui reste du besoin énergétique après l'optimisation du bâtiment est amené depuis l'extérieur. L'achat d'énergie au monde extérieur dépend du choix de l'agent énergétique utilisé pour la couverture des be-



*Illustration 9: Côté besoins et approvisionnement de l'énergie des bâtiments. Représentation schématique des domaines d'optimisation directs du bâtiment et de l'apport d'énergie nécessaire depuis l'extérieur du bâtiment.*

soins: le fait d'utiliser ou non des combustibles renouvelables, dans quelle mesure l'électricité couvre les besoins énergétiques du bâtiment, d'où vient cette électricité... Tout ceci délimite le champ d'action des maîtres d'ouvrage et planificateurs du bâtiment, côté approvisionnement. L'illustration 10 montre (de façon schématique) la façon dont le bâtiment est lié à son environnement. L'intégration directe d'un bâtiment individuel dans un lotissement offre les possibilités d'optimisation suivantes:

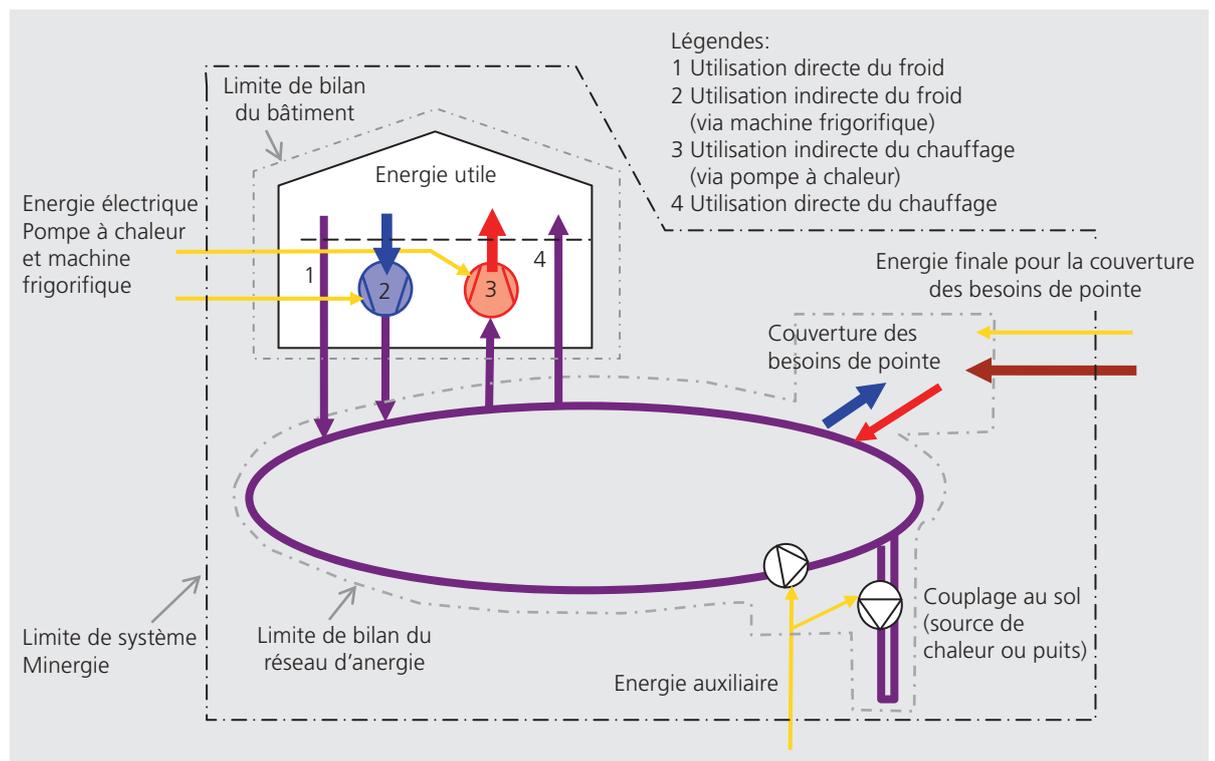
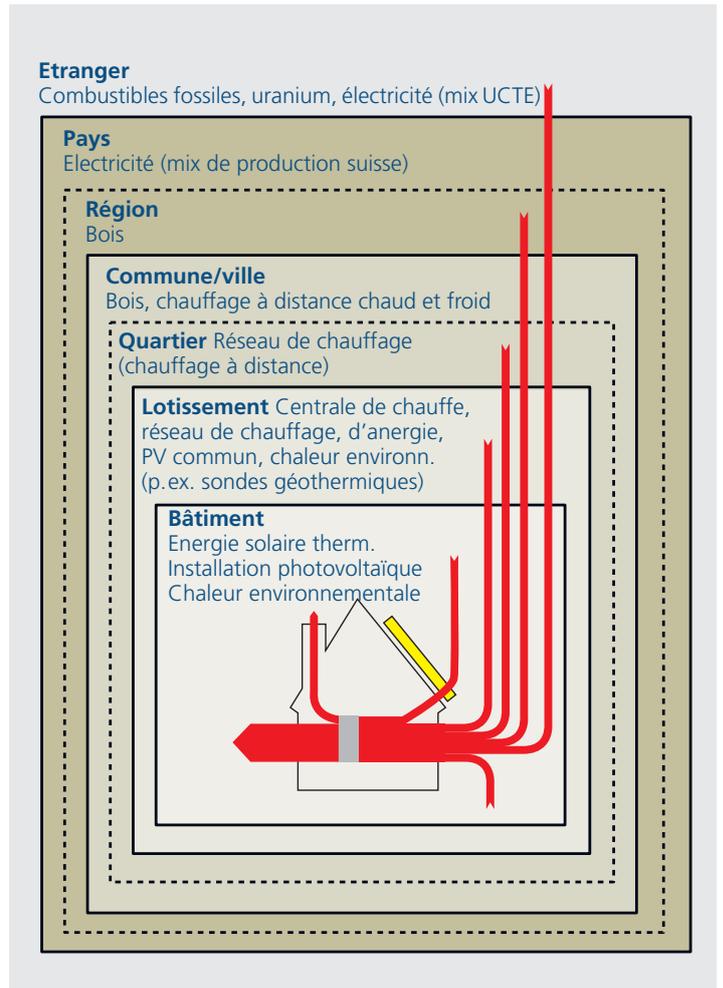
- Centrales de chauffage avec ou sans utilisation commune de ressources locales, telles que les potentiels de chaleur environnementale (géothermie, eaux souterraines, eaux de surface) ou les rejets thermiques d'exploitations voisines.

- Installations communes d'utilisation de l'énergie solaire, thermique ou photovoltaïque.

- Systèmes de réseau de chauffage atteignant une taille suffisante pour permettre l'utilisation de types supplémentaires de production de chaleur, par exemple chauffages à plaquettes ou des couplages chaleur-force.

- Selon l'utilisation et la taille du lotissement, des réseaux d'énergie, par exemple

*Illustration 10:*  
Approvisionnement en énergie à partir de l'environnement proche et lointain.  
Représentation schématique des achats d'énergie du bâtiment.



*Illustration 11:*  
Réseau d'énergie.  
Source: Aide à l'utilisation Minergie, [www.minergie.ch](http://www.minergie.ch)

des réseaux à basse température, peuvent également être envisagés. L'illustration 11 montre une représentation tirée de l'Aide à l'utilisation de Minergie, qui comprend la définition suivante: «Un réseau d'anergie est un réseau de chauffage à distance fonctionnant à un faible niveau de température (du point de vue des systèmes de chauffage). Un tel réseau cède d'une part de la chaleur à différents consommateurs (mode de chauffage) et absorbe d'autre part de la chaleur provenant d'autres consommateurs (mode de refroidissement). En outre, un stockage saisonnier est possible (sondes géothermiques). Eventuellement, une couverture des besoins de pointe pour le chauffage ou le refroidissement peut être prévue.»

#### Du lotissement à la ville

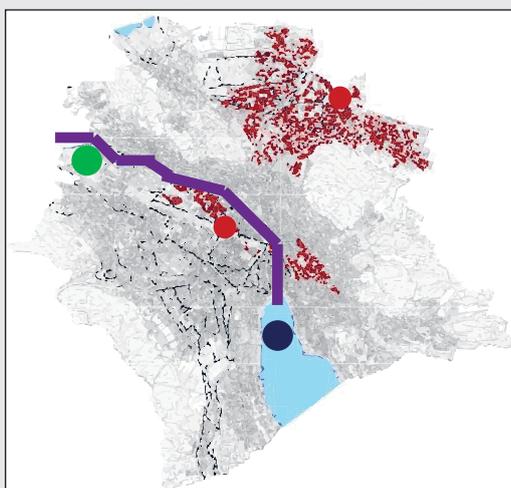
Lorsque l'on dépasse la limite entre le lotissement et le quartier, la commune ou même la ville, la situation change fondamentalement. D'un côté, les maîtres d'ouvrage et planificateurs utilisent les offres d'approvisionnement, tandis que d'un autre côté, les fournisseurs d'énergie professionnels et planificateurs communaux et élus agissent en tant que fournisseurs d'énergie ou concepteurs d'infrastructures. Outre les possibilités du bâtiment et du lotissement, d'autres options peuvent également être envisagées, notamment

des réseaux d'approvisionnement de toutes sortes: réseaux de chauffage à distance chauds et froids par exemple.

A l'avenir, les communes joueront un rôle plus actif dans la planification énergétique. Cela implique un relevé et une cartographie détaillés de toutes les ressources communales, des conditions relatives à l'acquisition d'énergies extracomunales, ainsi que l'analyse et la prédiction des valeurs de besoin énergétique pour les différentes utilisations. L'illustration 12 montre le relevé des ressources dans l'exemple de la ville de Zurich. Avec la transition de l'approvisionnement énergétique vers l'ère post-fossile, une coordination et une commande centralisées sont inévitables. Les maîtres d'ouvrage et planificateurs de bâtiments individuels seront à l'avenir eux aussi concernés par ces nouvelles conditions. Les ressources naturelles telles que les eaux des lacs, des rivières et les eaux souterraines devront être raccordées et utilisées conformément aux plans et prescriptions légales. Les installations de pompe à chaleur à sondes géothermiques, en tant que technologies clés de l'approvisionnement futur en chaleur, seront tellement nombreuses qu'une régénération systématique de la chaleur deviendra probablement obligatoire.

### Offre d'énergie

Résultat: L'offre disponible au niveau local peut couvrir 90% de la demande en 2050



#### Interne aux parcelles

Solaire thermique, air extérieur

☐ Géothermie (limité)

☐ Eaux souterraines (limité)

#### Externe aux parcelles (lié au site)

● Chauffage à distance à partir de l'UIOM

● Station d'épuration de Werdhölzli (eaux usées)

● Lac de Zurich (eau lacustre)

● Limmat (eau de rivière)

#### Externe à la ville (combustibles)

Bois-énergie (MP air)

Biogaz (dans la zone d'approvisionnement en gaz)

Biomasse solide

*Illustration 12: Aperçu des ressources d'énergie renouvelables dans l'exemple de la ville de Zurich. Source: B. Bébié, Préposé à l'énergie de la ville de Zurich.*

### Des débats controversés

Les environnements régional et national sont surtout importants pour le mix énergétique et la gamme d'offre d'autres agents énergétiques tels que le bois. Cela est également valable au niveau international pour l'offre d'agents énergétiques traditionnels (fossiles et uranium), mais également pour l'électricité issue de sources renouvelables (éolien et photovoltaïque). Les planificateurs de bâtiments et maîtres d'ouvrage doivent aujourd'hui encore décider eux-mêmes s'ils souhaitent favoriser les ressources de proximité, donc s'intéresser à la provenance de l'énergie. Dans les débats officiels, les avis à ce sujet sont controversés. Minergie exige que l'autoproduction prise en compte dans la certification des bâtiments soit réalisée sur le bâtiment lui-même. A l'inverse, pour atteindre les objectifs de la voie SIA vers l'efficacité énergétique, l'achat d'électricité photovoltaïque issue de l'étranger est autorisé.

Les zones bâties, lotissements ou même les villes sont beaucoup plus complexes que les bâtiments et déclenchent des processus décisionnels compliqués dans lesquels les questions énergétiques sont étroitement liées à d'autres domaines de la politique. Ainsi, on comprendra aisément que les plans de densification dans les communes sont extrêmement importants sur le plan énergétique et que l'instrument politique du bonus d'utilisation du sol (p.ex. dans le cadre de prescriptions de construction spéciales pour les lotissements) est extraordinairement efficace. Pour les planificateurs de bâtiments, le contexte connaîtra d'importants changements dus à l'intensification des activités de planification énergétique des communes. De nouvelles dispositions liées au site devront être prises en compte et de nouvelles offres d'approvisionnement énergétique seront disponibles. Le planificateur sera de moins en moins dans l'action, davantage dans la réaction. C'est également de cette manière que pourront être mises en œuvre des mesures réellement efficaces, par exemple grâce un meilleur raccordement au réseau de transport

public. En effet, le trafic induit par un bâtiment doit être pris en compte, conformément au cahier technique SIA 2039 «Mobilité».

### Instruments d'évaluation et de planification des zones bâties

#### Certification des zones à 2000

**watts:** «Arealentwicklung für die 2000-Watt-Gesellschaft, Leitfaden und Fallbeispiele», Intep, Office fédéral de l'énergie, Berne 2012; Documents et outils de calcul sur [www.2000watt.ch](http://www.2000watt.ch)

**Sméo:** Outil en ligne gratuit pour l'évaluation et l'optimisation de quartiers en termes de durabilité.

Les grands labels internationaux pour la construction durable possèdent également des outils et des offres de certification pour les zones bâties et les quartiers, par exemple DGNB, LEED et BREEAM.

## Bâtiment – Forme et enveloppe

### Gregor Steinke Corps du bâtiment

La forme du corps du bâtiment, la protection thermique de l'enveloppe et l'orientation, l'ombrage, la taille et le type des surfaces vitrées, sont d'une importance capitale pour l'efficacité du bâtiment. Dès la phase de projet, la détermination de la forme du bâtiment et le plan des façades donnent le ton du besoin en énergie grise et en énergie d'exploitation, ainsi que des coûts de la construction.

La compacité, au sens de la construction efficace, est exprimée à l'aide du facteur d'enveloppe (rapport entre la surface d'enveloppe thermique du bâtiment et la surface de référence énergétique) (illustr. 13). Les facteurs dominants de la compacité sont des grandeurs absolues du corps du bâtiment et du nombre d'étages. Le niveau de compacité est toutefois très variable et ne peut pas toujours être directement déterminé visuellement. Un corps de bâtiment très compact peut sembler très découpé en raison de petits éléments saillants tels que des balcons, des coursives et autres annexes ouvertes. À l'inverse, un gros bloc d'apparence très compacte peut en réalité être peu

compact en raison de balcons intégrés (illustr. 14). Les corps de bâtiment et façades découpés, dotés de renforcements ou de saillies, présentent un rapport peu favorable entre la surface d'enveloppe du bâtiment et la surface de référence énergétique. Pendant la période de chauffe, de la chaleur est perdue par transmission et par la ventilation, à travers l'enveloppe du bâtiment. Plus le rapport de la surface d'enveloppe du bâtiment à la surface de référence énergétique est important, plus, pour la même protection thermique de l'enveloppe du bâtiment, le besoin en chaleur de chauffage est élevé. C'est pourquoi un bâtiment moins compact doit être mieux isolé qu'un bâtiment compact pour un même besoin en chaleur de chauffage. À l'inverse des constructions nouvelles, dans la rénovation, la forme du corps du bâtiment est définie. La construction d'annexes, d'étages supplémentaires ou l'intégration de loggias peut augmenter la compacité. Une structure compacte possède, par rapport aux corps de bâtiment découpés, les avantages suivants: besoin de surface/de terrain de construction plus faible, densité d'habitants plus élevée, coûts

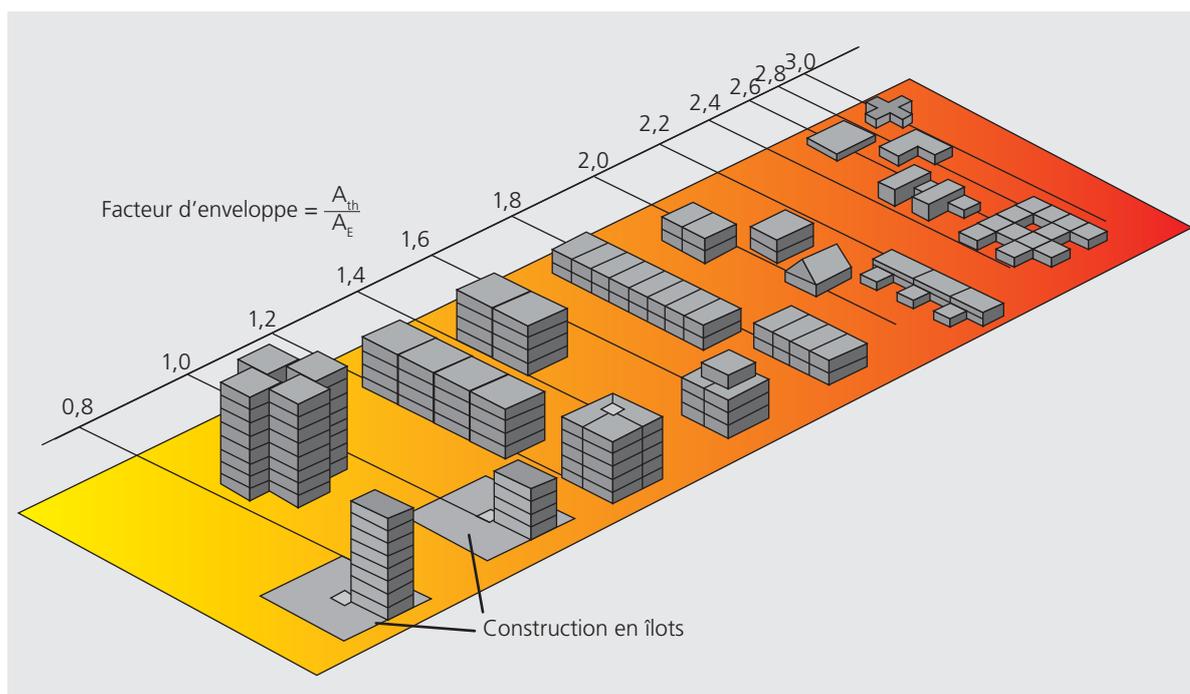


Illustration 13:  
Compacité et facteur d'enveloppe.  
Source: [1]

réduits, construction plus simple, quantité d'énergie grise moins importante, besoins plus faibles en matériaux de construction, ombrage propre moins important, besoin en chaleur de chauffage plus faible, coûts d'exploitation réduits. Toutefois, la compacité trouve ses limites dans la nécessité d'un éclairage naturel suffisant. Si les besoins en chaleur de chauffage sont plus faibles lorsque la structure est compacte, la plus grande profondeur du bâtiment engendre également un besoin en électricité accru pour l'éclairage artificiel. En outre, dans le cas des bâtiments relativement compacts, la surface d'enveloppe du bâtiment disponible pour la production d'électricité par le photovoltaïque est moins importante, ce qui ne facilite pas la mise en œuvre des concepts à énergie positive ou nulle.

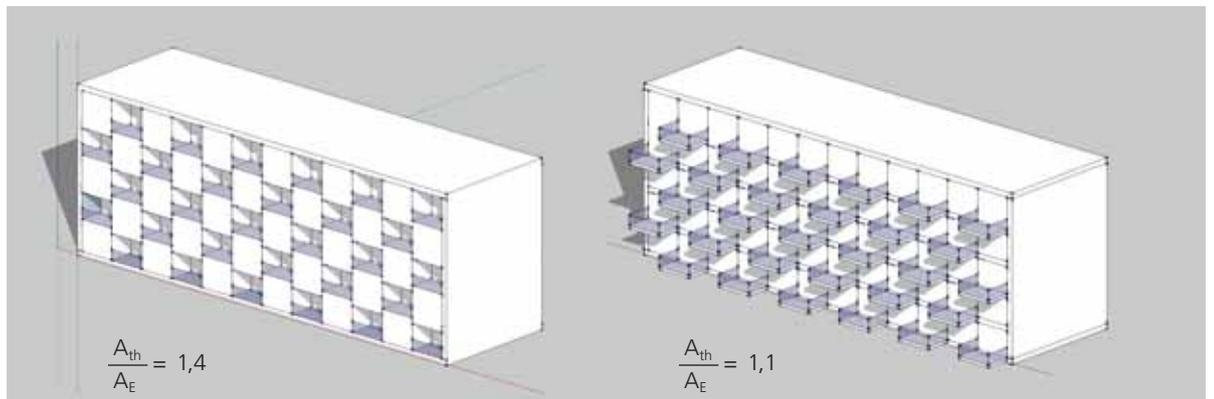
La structure du bâtiment, également, entraîne des conséquences importantes sur l'énergie grise, l'énergie d'exploitation et les coûts. Les ossatures dotées de portées opti-

misées et de faibles épaisseurs de plafond permettent de réduire au minimum la complexité de la réalisation. Un concept efficace de colonnes montantes et de gaines, avec de courtes longueurs de conduites, contribue à une exploitation efficiente.

### Enveloppe du bâtiment

L'enveloppe thermique du bâtiment doit englober les zones chauffées du bâtiment, sans interruption. Dans les constructions existantes, ce n'est pas toujours le cas et souvent, l'une des premières tâches dans la planification de la rénovation du bâtiment consiste à définir une future enveloppe thermique fermée. Les zones non chauffées, par exemple les cages d'escalier ou les caves, peuvent également être intégrées dans l'enveloppe thermique du bâtiment. Cela permet d'éviter des travaux inutilement lourds, des raccords d'éléments compliqués et l'apparition de ponts thermiques (illustr. 15).

*Illustration 14: Le volume du bâtiment avec les loggias semble plutôt compact, mais possède sur la façade sud 111 % de surface d'enveloppe en plus. Pour la même surface de référence énergétique, le bâtiment avec les loggias possède un facteur d'enveloppe de 1,37, le bâtiment avec des balcons suspendus ou saillants un facteur d'enveloppe de 1,06.*



*Illustration 15: Tracé de l'enveloppe thermique du bâtiment, à gauche la cave et le toit se trouvent en dehors de l'enveloppe thermique, à droite ils sont à l'intérieur.*



Le fractionnement de la protection thermique, par exemple dans le cas des espaces tampons non chauffés et des loggias vitrées, est possible mais problématique. L'utilisation effective de telles pièces en tant que pièces d'habitation quotidiennes est envisageable mais peut engendrer des pertes de chaleur de chauffage très importantes. Par principe, il convient donc de faire en sorte que l'enveloppe thermique du bâtiment soit réalisée dans la couche la plus extérieure possible du corps de bâtiment fermé. Par conséquent, les caves non chauffées doivent également se situer à l'intérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment, l'isolation devant alors être placée au sol de la cave, dans la mesure du possible. Les caves sont ainsi plus sèches et cette solution réduit le risque que des espaces de cave très froids et non chauffés

soient chauffés ou tempérés à l'aide de systèmes de fortune. En combinaison avec un chauffage au sol ou avec la protection contre les bruits d'impact du plafond du rez-de-chaussée, le plafond de la cave peut être équipé d'une protection thermique visant à limiter les risques de refroidissement. Dans la rénovation, il est souvent plus simple et bien plus facile en termes de physique du bâtiment d'isoler le plafond de la cave plutôt que d'isoler les parois de celle-ci depuis l'intérieur.

### Protection thermique

La protection thermique de l'enveloppe du bâtiment possède différentes fonctions:

■ Garantir des températures de surface intérieures suffisamment élevées des éléments de construction extérieurs, pour la protection des utilisateurs contre les moisissures

Valeurs limites en $W/(m^2 K)$	SIA 180	SIA 380/1 Justificatif par performances ponctuelles	
		Construction nouvelle	Transformation
Eléments opaques en contact avec l'extérieur ou à moins de 2 m dans le sol ■ Toit, plafond, sol ■ Mur extérieur	0,40	0,17	0,22 0,25
■ Fenêtres ■ avec corps de chauffe directement devant	2,4	1,2 0,90	1,2 0,90
Eléments opaques en contact avec des zones non chauffées ou à plus de 2 m dans le sol ■ Toit, sol, mur extérieur ■ Plafond le plus haut en contact avec zone non chauffée	0,60 0,50	0,21	0,28

Tableau 3: Exigences en matière de valeurs U selon SIA 380/1. Justificatif par performances ponctuelles (consultation 2013) et protection thermique minimale selon SIA 180. Source: [2]

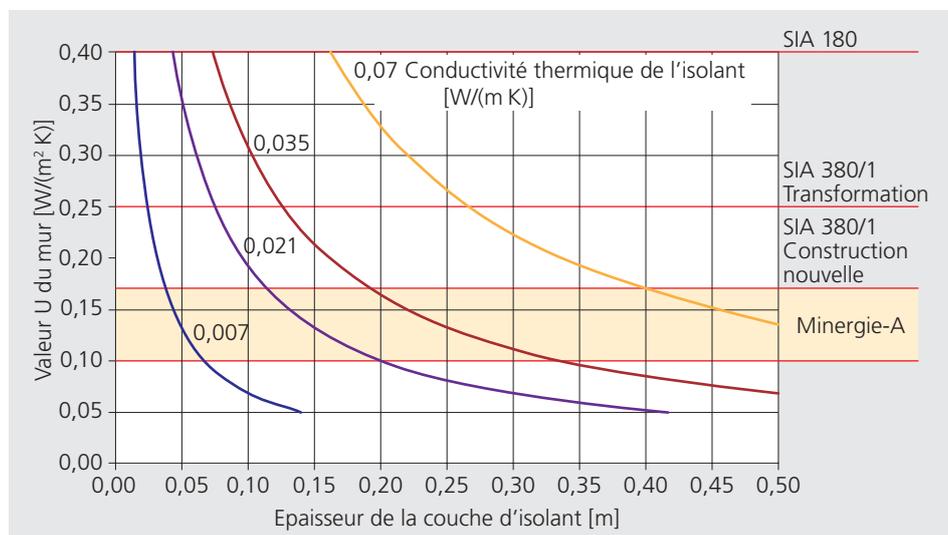


Illustration 16: Epaisseurs d'isolant requises en fonction de la conductivité thermique de l'isolant.

toxiques dues à l'humidité qui apparaissent sur les surfaces intérieures du mur extérieur.

■ Protéger le corps du bâtiment contre les dommages dus à l'humidité en évitant les températures de surface critiques.

■ Garantir le confort thermique des utilisateurs. Plus la protection thermique de l'enveloppe du bâtiment est performante, plus les températures de surface au niveau de la paroi intérieure du mur extérieur sont élevées et plus le confort est élevé. De faibles différences de température entre les différentes surfaces d'une pièce (murs inté-

rieurs, mur extérieur, sol, plafond) ont une influence positive sur le confort.

■ Diminuer la charge environnementale en réduisant le besoin en chaleur de chauffage. L'importance du besoin de chaleur pour le chauffage dépend de l'importance des pertes par transmission. Plus la valeur U est faible, plus les pertes par transmission sont faibles.

Les exigences en matière de protection thermique de l'enveloppe du bâtiment sont représentées dans le tableau 3. Les épais-

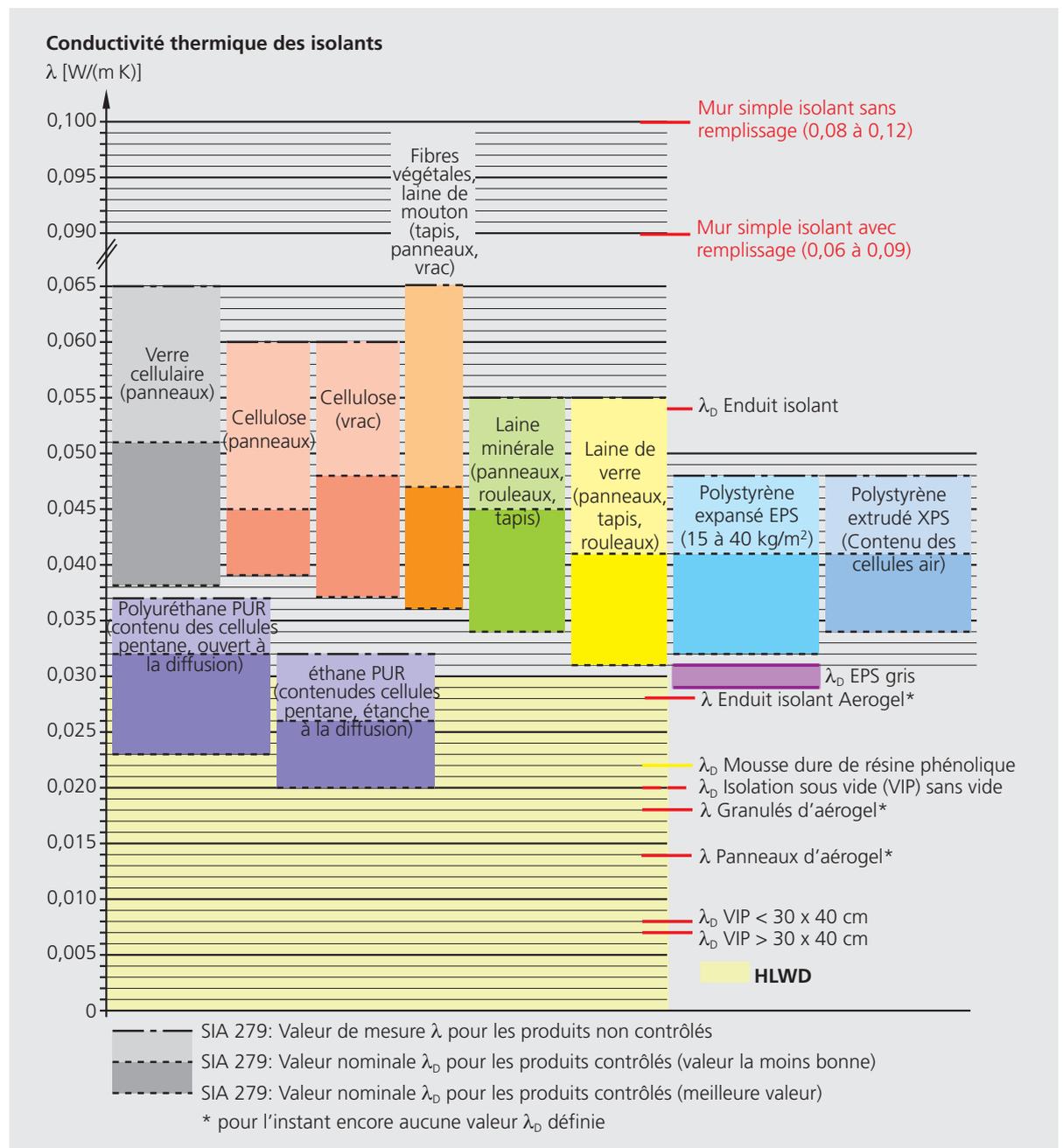


Illustration 17:  
 Conductivité thermique des isolants,  
 version 1/2013.  
 Source: [3]

seurs d'isolation thermique nécessaires pour les différents niveaux d'exigence sont représentées dans l'illustration 16. En raison de mauvaises valeurs U par rapport aux éléments de construction opaques, les surfaces vitrées engendrent des pertes thermiques par transmission plus élevées, mais assurent également des apports solaires passifs importants pour le bilan énergétique du bâtiment. L'importance des apports solaires passifs est déterminée par le rayonnement, l'orientation, l'ombrage, la taille et le taux de transmission énergétique (valeur g) des surfaces vitrées dans l'enveloppe du bâtiment. En fonction de la taille des fenêtres et des caractéristiques des châssis et des vitrages, des surfaces vitrées non ombragées orientées au sud, à l'est et à l'ouest, dotées d'un triple vitrage, peuvent présenter, si l'on ajoute les pertes thermiques par transmission et les apports solaires, un bilan énergétique positif. Cet élément de construction est ainsi un élément d'apport d'énergie. Cependant, plus la part vitrée de la façade est importante, plus le risque de surchauffe par des charges thermiques solaires élevées est important, et plus des mesures de protection thermique estivale sont importantes. En présence de faibles températures extérieures, on peut

observer dans la pièce un rideau d'air froid sur les surfaces des fenêtres. Moins la valeur U est bonne et plus la fenêtre est haute, plus le rideau d'air froid est important.

### Isolants thermiques

Pour la protection thermique des éléments de construction opaques de l'enveloppe du bâtiment, les isolants thermiques jouent un rôle central. Ce sont des matériaux dont la conductivité thermique  $\lambda$  s'élève à 0,1 W/(m K) au maximum. La conductivité thermique se compose de la transmission thermique par convection dans les pores, de la conduction thermique dans la part solide entre les pores et du rayonnement thermique entre les parois des pores. Les grandeurs d'influence déterminantes pour la conductivité thermique sont la taille des pores, les propriétés du gaz ou du vide dans les pores et la texture de la structure autour des pores. Les isolants thermiques doivent, selon leur domaine d'utilisation, remplir non seulement leur rôle de protection thermique, mais également des exigences en termes de protection contre l'incendie, de résistance à la pression, de perméabilité à la vapeur d'eau, de résistance à l'eau, de durabilité etc. Les isolants thermiques sont

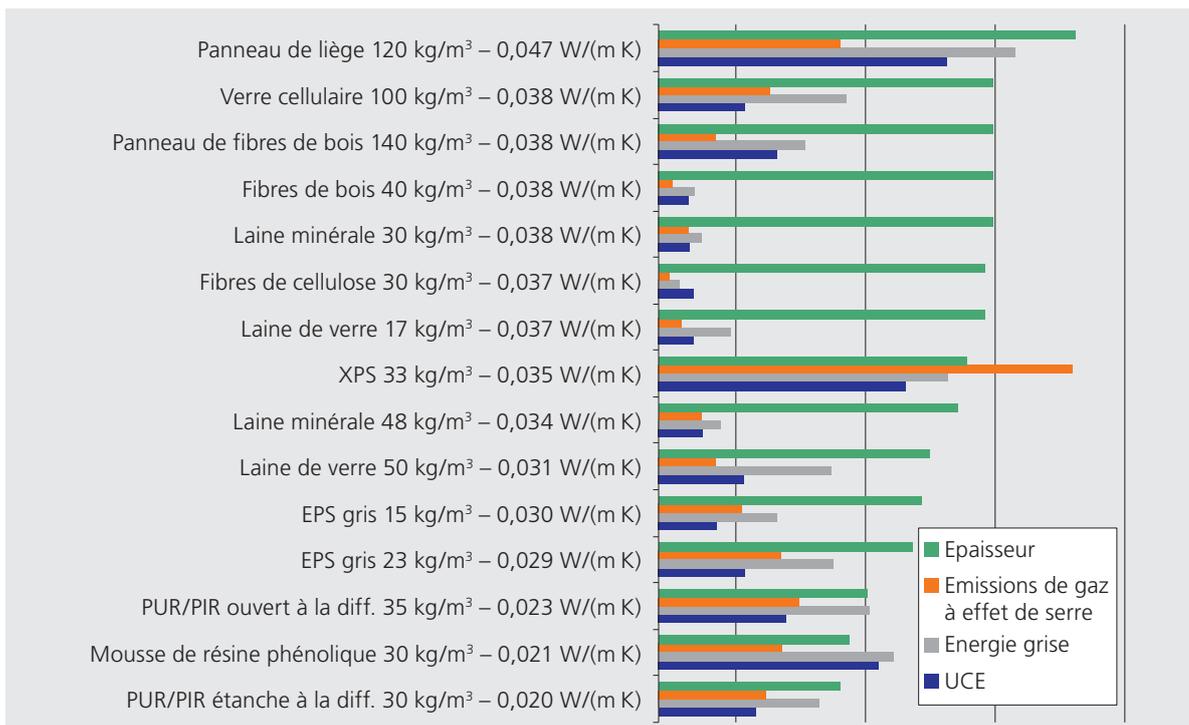


Illustration 18:  
Charge environnementale de différents isolants référencés sur une valeur U de 0,10 W/(m² K).  
Source: [4], [5]

fabriqués à partir de matériaux naturels ou artificiels, organiques ou anorganiques. La conductivité thermique de différents isolants thermiques est représentée dans l'illustration 17.

Les matériaux synthétiques anorganiques, tels que la laine de verre et la laine minérale, ainsi que les isolants synthétiques organiques tels que l'EPS, le XPS et le PUR, représentent plus de 90 % des isolants du marché. Lors du choix d'un isolant thermique, il faut s'intéresser non seulement à ses propriétés liées à l'utilisation, mais également à la charge environnementale due à sa fabrication (illustr. 18).

Avec les aérogels, les nanomousses et les panneaux d'isolation sous vide, on dispose d'isolants thermiques dotés d'une conductivité thermique 2 à 5 fois plus faible que les isolants traditionnels. En raison des prix spécifiques relativement élevés de ces matériaux, ces isolants thermiques haute performance sont généralement utilisés pour résoudre des problèmes ponctuels sur l'enveloppe du bâtiment, lorsqu'on dispose de peu de place pour l'isolation thermique, que l'encombrement de l'isolation thermique ferait perdre une surface utile précieuse ou que des couches d'isolant relativement épaisses engendreraient des problèmes constructifs.

#### **Exemples d'application pour les isolants thermiques à haute performance**

- Protection thermique améliorée pour les points faibles, p. ex. les caissons de volets à rouleau, le sol/le plafond avec une faible hauteur de pièce, l'isolation du mur extérieur avec passage étroit.
- Simplification constructive, p. ex. isolation du mur extérieur en présence d'un faible débord de toit
- Gain de surface utile en cas d'isolation intérieure ou de dimension extérieure définie du bâtiment
- Sections apparentes étroites et meilleure exploitation de l'espace en présence de lucarnes
- Gain de confort grâce à une transition sans seuil pour les terrasses de toit/les loggias ou les chambres froides

## **Éléments de construction opaques de l'enveloppe thermique du bâtiment**

### **Toit et plafond du dernier étage**

Au niveau de la toiture, il est souvent possible de réaliser sans grande complexité une très bonne isolation thermique (valeur  $U$  0,10 – 0,15  $W/(m^2 K)$ ) à l'aide d'épaisses couches d'isolant. Cela permet, dans le cadre du justificatif de conformité selon SIA 380/1, de compenser des zones moins bien isolées de l'enveloppe du bâtiment.

Dans le cas des toitures inclinées, les chevrons sont en général isolés sur toute leur hauteur (illustr. 19). Une combinaison entre une isolation entre chevrons et une isolation sous ou sur chevrons permet de réduire les déperditions thermiques au niveau des chevrons et d'opter pour des éléments de construction moins hauts par rapport à des constructions isolées uniquement entre les chevrons. Celles-ci sont recommandées notamment dans la rénovation, lorsque la hauteur sous chevrons est faible. Lorsque l'habillage intérieur de la structure de toiture inclinée présente une résistance à la diffusion de vapeur suffisamment élevée (p. ex. panneaux d'OSB ou à 3 couches) et que les raccords entre les panneaux sont collés, le pare-vapeur n'est pas obligatoire. Dans la construction massive, les toitures plates sont en général conçues sous forme de toitures chaudes non ventilées (illustr. 20). Le système d'étanchéité de la toiture est disposé au-dessus de l'isolation thermique. Sous celle-ci, il convient d'installer un pare-vapeur afin d'éviter que l'isolation ne prenne l'humidité par diffusion de vapeur depuis l'intérieur.

Au niveau de tous les passages à travers la surface de la toiture et de tous les raccords avec les murs, les étais et les poutres, une couche continue étanche à l'air doit être réalisée. Dans le cas contraire, le passage incontrôlé d'air ambiant chaud et humide à travers l'isolation thermique peut engendrer des dommages considérables dus à l'humidité. L'isolation thermique après-coup de la dalle de plafond de l'étage supérieur est une mesure très efficace et bon marché pour améliorer la protection ther-

mique dans les bâtiments existants, lorsque le grenier n'est ni aménagé ni chauffé.

### Mur extérieur

Dans les constructions nouvelles, des éléments de construction en bois préfabriqués permettent de réaliser des constructions relativement fines et très bien isolées. Les éléments de façade peuvent être conçus pour supporter la charge (construction en bois) ou non (mode hybride avec structure intérieure porteuse massive). Les éléments non porteurs possèdent des ossatures en bois plus fines et une part de bois plus faible. Les déperditions thermiques des ossatures en bois peuvent être réduites grâce

à une structure à double paroi avec une couche d'isolation thermique extérieure traversante, permettant des profondeurs d'éléments de construction plus faibles par rapport à des constructions isolées uniquement entre les ossatures. L'illustration 21 montre différentes variantes. L'extérieur est constitué d'un habillage ventilé par l'arrière ou d'une couche d'isolation thermique enduite. En fonction de la hauteur du bâtiment, des mesures supplémentaires de protection contre l'incendie peuvent être nécessaires. Pour les rénovations de constructions massives, des conduites de ventilation peuvent également être disposées dans les modules muraux préfabriqués.

**Illustration 19:**  
**Toiture inclinée.**  
Source: [6]

Toiture inclinée					
	<b>Variante 1</b>	$\lambda$ [W/(m K)]	<b>Variante 2</b>	$\lambda$ [W/(m K)]	
	6 Contre-lattis, lattis, couverture	–	6 Contre-lattis, lattis, couverture	–	
	5 Lé de sous-toiture en option	–	5 Lé de sous-toiture en option	–	
	4 Panneau bois en option	0,09	4 Panneau bois en option	0,09	
	2 Chevrons de hauteur variable (part de bois 8% / 16%)	0,13	3 Isolation sur chevrons	variable	
	1 Panneau 3 couches ou OSB en variante Placoplâtre	0,13	2 Chevrons hauteur 18 cm (part de bois 8% / 16%)	0,13	
	0,24	Couche d'isolant 18 cm	0,036		
	–	1 Panneau 3 couches ou OSB en variante Placoplâtre	0,13		
	–	Cavité d'installation	0,24		
	–	Pare-vapeur	–		
			–		
			–		

### Variante 1 (simple paroi)

**Épaisseur de couche d'isolant requise [m] en fonction de la part de bois, de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant**

Part de bois de la construction	8%					16%					Exemples	
	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10		
<b>Valeur U [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>												
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,042$ W/(m K)	0,21	0,26	0,29	0,38	0,46	0,24	0,29	0,34	0,43	0,52	Fibres de gazon vrac	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,038$ W/(m K)	0,20	0,24	0,27	0,35	0,42	0,23	0,27	0,32	0,40	0,49	Fibres de cellulose, tapis de fibres de bois	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,036$ W/(m K)	0,19	0,23	0,26	0,33	0,41	0,22	0,27	0,31	0,39	0,48	Tapis de laine de mouton, de fibres végétales	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,034$ W/(m K)	0,18	0,22	0,25	0,32	0,39	0,21	0,26	0,30	0,38	0,46	Tapis de laine minérale	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,032$ W/(m K)	0,17	0,21	0,24	0,31	0,37	0,21	0,25	0,29	0,37	0,44	Tapis de laine minérale	

### Variante 2 (double paroi)

**Épaisseur de couche d'isolant requise de l'isolation sur chevrons [m] en fonction de la part de bois, de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant**

Part de bois de la construction	8%					16%					Exemples	
	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10		
<b>Valeur U [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>												
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,043$ W/(m K)	0,02	0,06	0,09	0,17	0,24	0,05	0,09	0,12	0,19	0,26	Panneau de fibres de bois	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,036$ W/(m K)	0,02	0,05	0,08	0,14	0,20	0,04	0,07	0,10	0,16	0,22	Panneau de laine minérale	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,032$ W/(m K)	0,02	0,05	0,07	0,12	0,18	0,04	0,06	0,09	0,14	0,20	Panneau de laine minérale	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,028$ W/(m K)	0,01	0,04	0,06	0,11	0,15	0,03	0,06	0,08	0,13	0,17	Élément sur toiture en PUR	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,022$ W/(m K)	0,01	0,03	0,05	0,08	0,12	0,02	0,04	0,06	0,10	0,13	Élément sur toiture en PUR doublé d'aluminium	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(m K)	0,01	0,03	0,04	0,07	0,10	0,02	0,04	0,05	0,08	0,11	Tapis d'aérogel	

L'isolation thermique extérieure enduite (façade compacte) sur le mur extérieur massif est l'une des solutions les plus fréquentes dans la construction nouvelle comme dans la rénovation (illustr. 22). Cette structure d'éléments de construction présente les coûts d'investissement les plus faibles, mais également des intervalles d'entretien plus courts.

■ Seuls des composants adaptés les uns aux autres doivent être utilisés, c.-à-d. que les adhésifs, l'isolation thermique, le treillis d'armature intégré et l'enduit de recouvrement doivent être adaptés les uns aux autres.

■ La couche d'isolation thermique se compose généralement d'un isolant sous forme de panneaux, mais peut également être constituée d'un enduit d'isolation thermique avec p. ex. des adjonctions d'EPS, de perlite ou d'aérogel.

■ La fenêtre doit si possible être prévue dans le plan de l'isolation thermique, afin de réduire les déperditions par ponts thermiques du raccord de fenêtre et d'augmenter les apports solaires.

■ Dans la conception du système, on peut également coller sur la couche d'isolation thermique des matériaux cé-

ramiques ou des briques recuites fendues à la place de l'enduit extérieur.

■ Pour des raisons de protection contre l'incendie, en présence d'isolants thermiques inflammables, des pare-feux horizontaux ou une isolation de l'appui de fenêtre avec un isolant non inflammable peuvent être nécessaires. Dans certains cas, seuls des matériaux non inflammables doivent être utilisés (p. ex. immeubles).

■ Sur les façades ombragées très bien isolées, des algues peuvent se former. Des enduits/peintures contenant des biocides peuvent retarder leur apparition. Toutefois, ces substances sont lavées par la pluie et parviennent dans l'environnement. Les systèmes d'enduit épais ou les isolants thermiques à haute capacité d'accumulation thermique peuvent contrer la formation d'algues.

■ Une déconstruction avec un recyclage séparé des différentes couches d'éléments de construction n'est pas réellement possible.

Dans le cas d'une isolation thermique extérieure avec habillage ventilé par l'arrière, les différentes couches d'éléments de construction séparées les unes des autres assument différentes fonctions du mur ex-

Illustration 20: Toiture plate massive, toiture chaude.

Source: [6]

#### Toiture plate massive, toiture chaude

6		6 Couches de protection et utile	$\lambda$ [W/(m K)]
5		5 Système d'étanchéité	–
4		4 Couche d'isolant	variable
3		3 Pare-vapeur	–
2		2 Bois massif ou béton armé	0,13 / 2,30
1		1 Enduit intérieur	0,70

**Variante:** Plafond du dernier étage donnant sur une zone non chauffée, massif. Comme pour la structure de toiture plate, mais sans pare-vapeur ni système d'étanchéité. En fonction de l'utilisation du grenier, un revêtement de sol ou un panneau de bois forme la couche supérieure.

#### Épaisseur de couche d'isolant requise [m] en fonction du matériau du plafond brut, de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant

Matériau du plafond brut	Bois massif					Béton armé					Exemples
	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10	
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)]											
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,041$ W/(m K)	0,09	0,13	0,17	0,20	0,34	0,15	0,19	0,23	0,26	0,40	Panneau de verre cellulaire
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,035$ W/(m K)	0,08	0,11	0,15	0,17	0,29	0,13	0,17	0,20	0,22	0,34	Panneau de laine minérale XPS
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,030$ W/(m K)	0,07	0,10	0,12	0,15	0,25	0,11	0,14	0,17	0,19	0,29	Panneau d'EPS
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,027$ W/(m K)	0,06	0,09	0,11	0,13	0,22	0,10	0,13	0,15	0,17	0,26	Panneau de PUR
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,022$ W/(m K)	0,05	0,07	0,09	0,11	0,18	0,08	0,10	0,12	0,14	0,21	Panneau de PUR doublé aluminium
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(m K)	0,04	0,06	0,07	0,09	0,15	0,07	0,09	0,10	0,12	0,18	Panneaux d'aérogel
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,008$ W/(m K)	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07	0,03	0,04	0,04	0,05	0,08	Panneaux d'isolation sous vide

térieur, ce qui garantit de très bonnes propriétés physiques du bâtiment. Pour l'habillage extérieur, de nombreux matériaux et sous-structures différents sont disponibles. Par exemple, on peut utiliser un habillage en modules photovoltaïques pour la production d'électricité sur le bâtiment.

■ Choisir des sous-structures optimisées sur le plan thermique avec de faibles majorations pour ponts thermiques, p.ex. les consoles d'isolation thermique GFK (illustr. 23).

■ Eviter tout passage du vent à travers l'isolation thermique (isolants en fibre), grâce à une couche de protection sur l'isolation thermique.

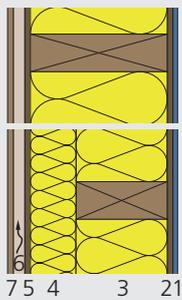
■ Veiller à poser l'isolation thermique sans aucune interruption autour des consoles et des ancrages.

■ Dans le cas de sous-structures dotées d'entretoises, monter tout d'abord l'isolation thermique sur toute la surface, puis ancrer la sous-structure sur le support porteur.

Les maçonneries isolantes (illustr. 25) permettent de réaliser des constructions de mur extérieur monolithiques enduites sans couches d'isolation thermique supplémentaires et, dans une épaisseur adéquate, peuvent également répondre à des exigences élevées en termes de protection

*Illustration 21:*  
*Structure ossature bois du mur extérieur.* Source: [6]

#### Structure ossature bois du mur extérieur



##### Variante 1 (simple paroi)

	$\lambda$ [W/(m K)]
1 Placoplâtre	0,24
Espace creux d'installation en option	–
2 Panneau bois	0,13
3 Ossature bois, profondeur variable (part de bois 10% / 13%)	0,13
Couche d'isolant	variable
5 Panneau bois	0,13
6 Lattis/Ventilation arrière	–
7 Habillage	–

##### Variante 2 (double paroi)

	$\lambda$ [W/(m K)]
1 Placoplâtre	0,24
Espace creux d'installation en option	–
2 Panneau bois	0,13
3 Ossature bois 16 cm (part de bois 10% / 13%)	0,13
Couche d'isolant 16 cm	0,036
4 Couche d'isolant supérieure	variable
6 Lattis/Ventilation arrière	–
- env. 2,5 vis par m <sup>2</sup>	
- Déperditions par ponts thermiques par vis env. 0,001 W/K	
7 Habillage	–
en variante à l'isolation extérieure enduite 6+7	

#### Variante 1 (simple paroi)

**Épaisseur de couche d'isolant requise [m] en fonction de la part de bois, de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant**

Part de bois de la construction	10%					13%					Exemples	
	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10		
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)]												
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,042$ W/(m K)	0,23	0,27	0,31	0,40	0,48	0,24	0,29	0,33	0,42	0,51	Fibres de gazon vrac	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,038$ W/(m K)	0,21	0,25	0,29	0,37	0,45	0,23	0,27	0,31	0,39	0,47	Fibres de cellulose. Tapis de fibres de bois	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,036$ W/(m K)	0,20	0,24	0,28	0,35	0,43	0,22	0,26	0,30	0,38	0,46	Tapis de laine de mouton, de fibres végétales	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,034$ W/(m K)	0,20	0,23	0,27	0,34	0,41	0,21	0,25	0,29	0,36	0,44	Tapis de laine minérale	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,032$ W/(m K)	0,19	0,22	0,26	0,33	0,39	0,20	0,24	0,28	0,35	0,42	Tapis de laine minérale	

#### Variante 2 (double paroi)

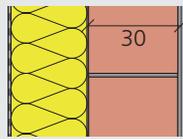
**Épaisseur requise de l'isolation supérieure [m] en fonction de la part de bois, de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant**

Part de bois de la construction	10%					13%					Exemples	
	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10	0,20	0,17	0,15	0,12	0,10		
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)]												
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,043$ W/(m K)	0,05	0,09	0,12	0,20	0,27	0,06	0,10	0,13	0,21	0,28	Panneau de fibres de bois	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,036$ W/(m K)	0,04	0,07	0,10	0,17	0,23	0,05	0,08	0,11	0,17	0,24	Tapis de laine minérale	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,032$ W/(m K)	0,04	0,07	0,09	0,15	0,20	0,04	0,07	0,10	0,15	0,21	Tapis de laine minérale	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(m K)	0,02	0,04	0,05	0,08	0,11	0,02	0,04	0,06	0,09	0,12	Tapis d'aérogel	

Illustration 22:

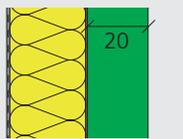
Façade compacte. Source: [6]

## Mur extérieur avec façade compacte



## Structure

1	Enduit intérieur	$\lambda$ [W/(m K)]
2	Brique ou béton armé	0,70
	Enduit extérieur (pour un mur existant)	0,35 / 2,3
3	Mortier-colle	0,87
4	Couche d'isolant	0,90
5	Enduit extérieur et armature	variable
		0,90



5 4 3 2 1

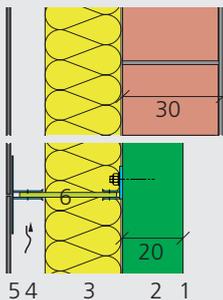
## Épaisseur d'isolant requise [m] en fonction du matériau du mur extérieur, de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant

Matériau du mur extérieur	Brique					Béton armé					Exemples	
	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10		
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)]												
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,045$ W/(mK)	0,14	0,18	0,22	0,26	0,41	0,17	0,21	0,25	0,29	0,44	Panneau de mousse de silicate de calcium	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,040$ W/(mK)	0,12	0,16	0,20	0,23	0,36	0,15	0,19	0,22	0,26	0,39	Panneau de fibres de bois	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,035$ W/(mK)	0,11	0,14	0,17	0,20	0,32	0,13	0,17	0,20	0,22	0,34	Panneau de laine minérale	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,030$ W/(mK)	0,09	0,12	0,15	0,17	0,27	0,11	0,14	0,17	0,19	0,29	Panneau d'EPS	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,028$ W/(mK)	0,09	0,11	0,14	0,16	0,25	0,10	0,13	0,16	0,18	0,27	Enduit isolant en aérogel	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,023$ W/(mK)	0,07	0,09	0,11	0,13	0,21	0,09	0,11	0,13	0,15	0,22	Panneaux composites EPS-PIR	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(mK)	0,06	0,07	0,09	0,10	0,16	0,07	0,09	0,10	0,12	0,18	Panneaux d'aérogel	

Illustration 23:

Façade avec ventilation arrière sur un mur extérieur massif avec console d'isolation thermique. Source: [6]

## Façade avec ventilation arrière sur mur extérieur massif avec console d'isolation thermique



1	Enduit intérieur	$\lambda$ [W/(m K)]
2	Brique ou béton armé	0,70
3	Couche d'isolant	0,35 / 2,3
4	Ventilation arrière	variable
5	Habillage	–
6	Console d'isolation thermique	–
	– env. 2 pièces par m <sup>2</sup> de mur extérieur	
	– Déperditions par ponts thermiques X par console env. 0,0005 W/K	

5 4 3 2 1

## Épaisseur d'isolant requise [m] en fonction du matériau du mur extérieur, de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant

Matériau du mur extérieur	Brique					Béton armé						
	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10		
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)]												
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,040$ W/(mK)	0,12	0,16	0,20	0,23	0,37	0,15	0,19	0,23	0,26	0,39	Panneau de laine minér.	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,038$ W/(mK)	0,12	0,16	0,19	0,22	0,35	0,14	0,18	0,21	0,24	0,37	Panneau de laine minér.	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,036$ W/(mK)	0,11	0,15	0,18	0,21	0,33	0,13	0,17	0,20	0,23	0,35	Panneau de laine minér.	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,034$ W/(mK)	0,11	0,14	0,17	0,20	0,31	0,13	0,16	0,19	0,22	0,33	Panneau de laine minér.	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,032$ W/(mK)	0,10	0,13	0,16	0,19	0,29	0,12	0,15	0,18	0,21	0,31	Panneau de laine minér.	
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(mK)	0,06	0,07	0,09	0,10	0,17	0,07	0,09	0,10	0,12	0,18	Panneaux d'aérogel	

thermique. On trouve sur le marché des éléments en béton cellulaire et des briques dotées de géométries perforées. Les cavités des briques sont parfois remplies de matériaux isolants. Les murs extérieurs porteurs peuvent être réalisés au maximum sur 3 à 4 étages, car la résistance à la compression de ces éléments est relativement faible. L'assemblage s'effectue à

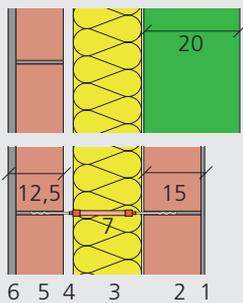
l'aide d'un mortier en couche mince spécial. Pour les raccords entre les éléments (p. ex. appui de fenêtre), des éléments spéciaux sont proposés.

Le mur enduit à double paroi, avec une couche d'air entre les deux parois, est également une solution courante. Lorsque, dans le cadre d'une rénovation, une isola-

*Illustration 24: Maçonnerie à double paroi. Source: [6]*

*Illustration 25: Maçonnerie isolante simple paroi. Source: [6]*

### Maçonnerie à double paroi

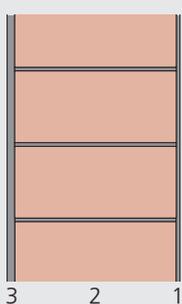


	$\lambda$ [W/(m K)]
1 Enduit intérieur	0,70
2 Brique ou béton apparent	0,35 / 2,30
3 Couche d'isolant	variable
4 Couche d'air	-
5 Brique	0,35
6 Enduit extérieur	0,87
7 Ancrage pour double paroi	
- env. 0,7 pièce par m <sup>2</sup> de mur extérieur	
- Déperditions thermiques $\chi$ par ancrage env. 0,003 W/K	

### Épaisseur d'isolant requise [m] en fonction du matériau du mur extérieur, de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant

Matériau du mur extérieur	Brique					Béton armé					Exemples	
	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10		
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)]												
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,038$ W/(m K)	0,12	0,15	0,19	0,22		0,13	0,17	0,20	0,23			Panneau de verre cellulaire
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,036$ W/(m K)	0,11	0,15	0,18	0,21		0,12	0,16	0,19	0,22			Panneau d'XPS
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,035$ W/(m K)	0,11	0,14	0,17	0,20		0,12	0,15	0,19	0,21			Panneau de laine minérale
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,033$ W/(m K)	0,10	0,13	0,16	0,19		0,11	0,15	0,18	0,20			Panneau d'EPS
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,032$ W/(m K)	0,10	0,13	0,16	0,18		0,11	0,14	0,17	0,20			Panneau de laine minérale
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(m K)	0,05	0,07	0,09	0,10	0,17	0,06	0,08	0,10	0,11	0,17		Panneaux d'aérogel

### Maçonnerie isolante simple paroi



Structure	$\lambda$ [W/(m K)]
1 Enduit intérieur 10 mm	0,70
2 Blocs ou plaques de construction isolants, variable	variable
3 Enduit de fond léger 20 mm	0,30

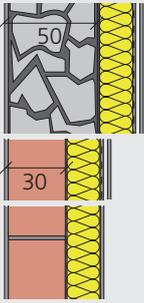
### Valeur U pouvant être atteinte [W/(m<sup>2</sup> K)] en fonction de l'épaisseur du mur extérieur et de la conductivité thermique du bloc isolant

Épaisseur du bloc isolant [m]	0,300	0,365	0,400	0,425	0,480	0,490	0,500	
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)] pour $\lambda = 0,090$ W/(m K)	0,28	0,23		0,20				Brique légère
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)] pour $\lambda = 0,085$ W/(m K)	0,27	0,22		0,19				Brique légère
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)] pour $\lambda = 0,080$ W/(m K)	0,25	0,21		0,18		0,16		Brique légère
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)] pour $\lambda = 0,075$ W/(m K)	0,24	0,20		0,17		0,15		Brique légère
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)] pour $\lambda = 0,070$ W/(m K)		0,18		0,16		0,14		Brique légère
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)] pour $\lambda = 0,065$ W/(m K)						0,13		Brique légère
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)] pour $\lambda = 0,081$ W/(m K)	0,26	0,21	0,19		0,16		0,16	Béton cellulaire
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)] pour $\lambda = 0,073$ W/(m K)	0,23	0,19	0,18		0,15		0,14	Béton cellulaire

Illustration 26:

Isolation thermique intérieure sur mur extérieur existant.

**Isolation thermique intérieure sur mur extérieur existant**



	$\lambda$ [W/(m K)]
1 Enduit intérieur/Habillage intérieur Eventuellement cavité d'installation Eventuellement pare-vapeur	0,70 – –
2 Couche d'isolant	variable
3 Eventuellement mortier-colle	0,70
4 Enduit intérieur (existant)	0,70
5 Brique ou moellons (existant)	0,44 / 1,8
6 Enduit extérieur (existant)	0,87

6 5 43 2 1

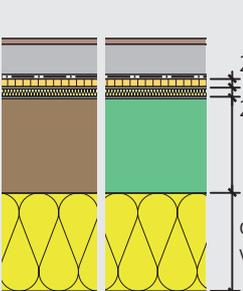
**Epaisseur d'isolant requise [m] en fonction du matériau du mur extérieur, de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant**

Matériau du mur extérieur	Brique			Moellon			Exemples
	0,40	0,25	0,20	0,40	0,25	0,20	
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)]							
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,047$ W/(m K)	0,08	0,15	0,19	0,09	0,16	0,21	Panneau de fibres de bois
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,045$ W/(m K)	0,07	0,14	0,18	0,09	0,15	0,20	Panneau de perlite
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,042$ W/(m K)	0,07	0,13	0,17	0,08	0,14	0,19	Panneau de mousse de silicate de calcium
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,035$ W/(m K)	0,06	0,11	0,14	0,07	0,12	0,15	Laine minérale
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,033$ W/(m K)	0,05	0,10	0,14	0,06	0,11	0,15	Panneau d'EPS
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,028$ W/(m K)	0,04	0,09	0,11	0,05	0,10	0,12	Enduit isolant en aérogel
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,022$ W/(m K)	0,04	0,07	0,09	0,04	0,08	0,10	Panneau de PUR doublé aluminium
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(m K)	0,03	0,06	0,07	0,03	0,06	0,08	Panneaux d'aérogel

Illustration 27:

Sol en contact avec une zone non chauffée, massif. Source: [3]

**Sol en contact avec une zone non chauffée, massif**



	$\lambda$ [W/(m K)]
1 Revêtement de sol	–
2 Chape	–
3 Couche de séparation	–
4 Isolation contre les bruits d'impact	0,035
5 Isolation thermique	0,035
6 Bois massif ou béton armé	0,13 / 2,3
7 Couche d'isolant	variable

20  
 $d_{WD}$  variable

**Epaisseur d'isolant requise [m] en fonction du matériau du mur extérieur, de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant**

Matériau du plafond brut	Bois massif					Béton armé					Exemples	
	0,28	0,25	0,21	0,15	0,10	0,28	0,25	0,21	0,15	0,10		
Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)]												
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,038$ W/(m K)	0,03	0,05	0,08	0,15	0,28	0,09	0,10	0,13	0,20	0,33	Panneau de verre cellulaire	
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,035$ W/(m K)	0,03	0,04	0,07	0,14	0,25	0,08	0,09	0,12	0,19	0,30	Panneau de laine minérale	
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,032$ W/(m K)	0,03	0,04	0,06	0,12	0,23	0,07	0,09	0,11	0,17	0,28	Panneau de laine minérale	
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,030$ W/(m K)	0,02	0,04	0,06	0,12	0,22	0,07	0,08	0,10	0,16	0,26	Panneau d'EPS	
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,028$ W/(m K)	0,02	0,03	0,06	0,11	0,20	0,06	0,08	0,10	0,15	0,24	Panneau de PUR	
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,022$ W/(m K)	0,02	0,03	0,04	0,09	0,16	0,05	0,06	0,08	0,12	0,19	Panneau de PUR doublé aluminium	
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(m K)	0,01	0,02	0,04	0,07	0,13	0,04	0,05	0,06	0,10	0,16	Panneaux d'aérogel	
Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,008$ W/(m K)	0,01	0,01	0,02	0,03	0,06	0,02	0,02	0,03	0,04	0,07	Panneaux d'isolation sous vide	

tion thermique intérieure ou extérieure n'est pas possible, l'espace creux peut être rempli d'isolant soufflé (p.ex. EPS, granulés de verre soufflés, granulés d'aérogel). Dans les constructions nouvelles, une couche d'isolation thermique est disposée dans l'espace intermédiaire (illustr. 24). La distance entre les parois du mur est en général limitée à 30 cm pour des raisons constructives.

Dans le cas des rénovations de bâtiments dotés de façades décoratives, seule une isolation thermique intérieure est possible (illustr. 26).

■ Une protection contre la pluie intacte est obligatoire pour éviter les dommages sur la construction.

■ La couche intérieure et tous les raccords avec des éléments de construction intégrés doivent être parfaitement étanches à l'air. L'air ambiant chaud et humide ne doit pas pouvoir passer derrière la couche d'isolation, sous peine d'engendrer un dépôt massif d'eau de condensation, qui doit impérativement être évité.

■ Les ponts thermiques au niveau des éléments de construction intégrés ne peuvent pas être évités. L'humidité de surface critique notamment au niveau des points de raccord doit être prise en compte. Plus la valeur R de l'isolation intérieure est élevée, plus le raccord est délicat.

■ Les couches d'isolation thermique intérieures épaisses entraînent une perte de surface utile.

■ La masse d'accumulation du mur extérieur est découplée de l'espace intérieur. La pièce peut être chauffée plus vite. La protection thermique estivale peut être moins bonne.

■ Aujourd'hui, on utilise de plus en plus souvent des constructions ouvertes à la diffusion avec une action capillaire active ou un effet d'atténuation de l'humidité. Dans ce cas, l'humidité est absorbée dans l'élément de construction par diffusion de vapeur puis est à nouveau restituée à l'intérieur. A cet effet, une liaison sans interruption et sur toute la surface entre l'isolation intérieure et le mur est requise. On utilise alors p.ex. les isolants suivants: panneaux de silicate de calcium, panneaux de perlite, panneaux de fibres de bois, panneaux d'aérogel.

■ Dans le cas des constructions dotées de films freinant la diffusion, les pare-vapeur dotés d'une valeur sd variable sont avantageux. L'humidité captée dans l'élément de construction peut également être restituée à l'intérieur.

### Sol

Dans le cas d'un sol en contact avec une zone non chauffée, en tant qu'élément de

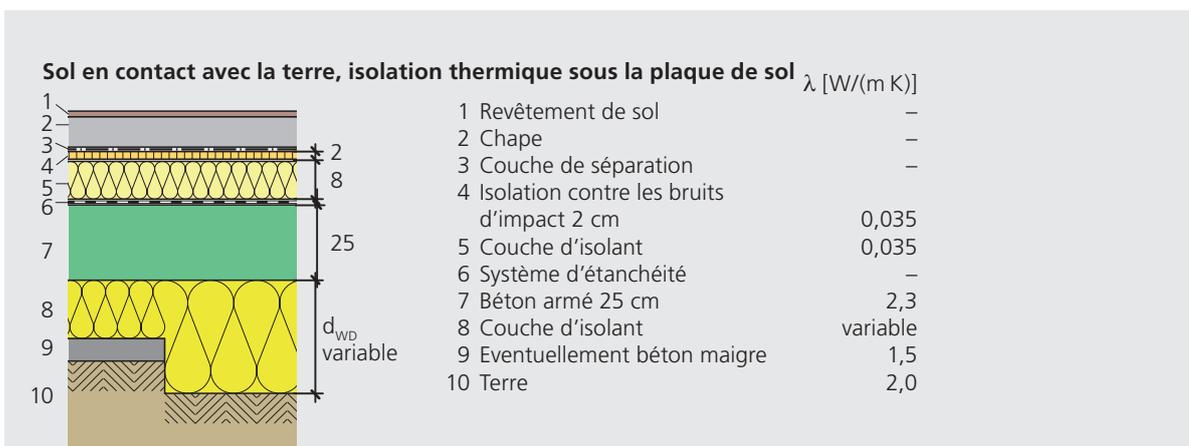


Illustration 28:  
Sol en contact avec la terre, isolation thermique sous la plaque de sol.  
Source: [3]

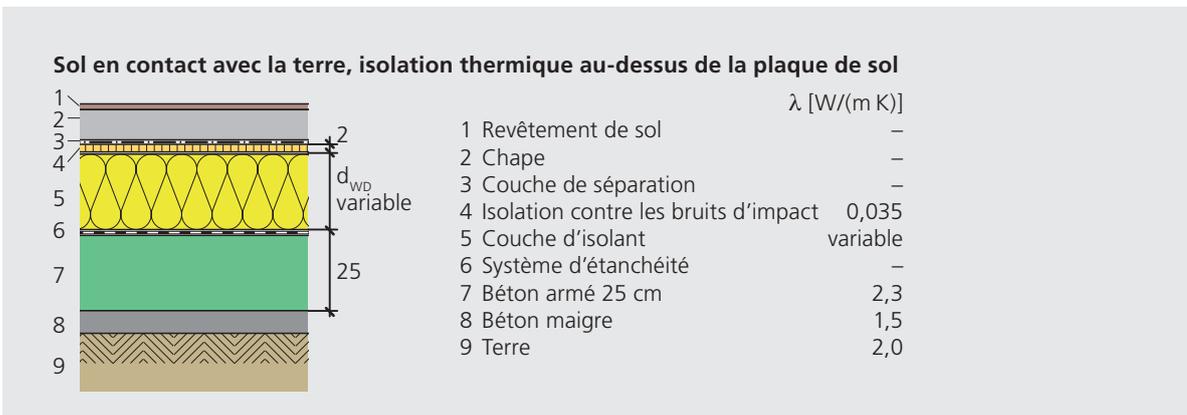
### Épaisseur d'isolant requise [m] en fonction de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant

Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,25	0,21	0,15	Exemples
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,081$ W/(m K)	0,08	0,14	0,30	Agrégat de verre cellulaire
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,041$ W/(m K)	0,04	0,07	0,15	Panneau de verre cellulaire
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,036$ W/(m K)	0,04	0,06	0,13	Panneau d'XPS

construction de l'enveloppe thermique du bâtiment, on dispose généralement, dans la construction massive, en plus de l'isolation contre les bruits d'impact, la couche d'isolation thermique en dessous ou, de façon combinée, au-dessus et en dessous du plafond de l'étage (illustr. 28). Les ponts thermiques des murs intérieurs non porteurs peuvent être réduits, dans les constructions nouvelles ou les transformations, par des cloisons légères ou une première rangée d'éléments isolants. Dans le cas des rénovations, l'emplacement possible de la couche d'isolation thermique dépend des hauteurs sous plafond et de l'éventuelle rénovation du plancher. De même, dans le cas d'un sol en contact avec la terre, l'isolation thermique peut être disposée en dessus, en dessous ou de façon combinée (illustr. 29). L'isolation thermique inférieure de la dalle de sol doit être résistante à la pression et à l'humidité (p.ex. panneaux ou agrégats de verre cellulaire, XPS). Dans le cas d'une isolation thermique sur la face supérieure, les déperditions par ponts thermiques des transitions entre les murs intérieurs et la dalle de sol diminuent avec la profondeur de la dalle de sol dans le sol et l'augmentation du rap-

port entre la surface de la dalle de sol et son périmètre. Par conséquent, dans le cas des bâtiments sans cave, une couche d'isolation thermique en dessous de la dalle de sol est recommandée.

**Illustration 29:**  
Sol en contact avec la terre, massif, isolation thermique sur la plaque de sol.  
Source: [3]



**Épaisseur d'isolant requise [m] en fonction de la valeur U et de la conductivité thermique de la couche d'isolant**

Valeur U [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,28	0,25	0,21	0,15	0,15	Exemples
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,041$ W/(m K)	0,12	0,13	0,17	0,24	0,24	Panneau de verre cellulaire
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,035$ W/(m K)	0,10	0,12	0,14	0,21	0,21	Panneau de laine minérale
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,033$ W/(m K)	0,09	0,11	0,13	0,20	0,20	Panneau d'EPS
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,027$ W/(m K)	0,08	0,09	0,11	0,16	0,16	Panneau de PUR
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,022$ W/(m K)	0,06	0,07	0,09	0,13	0,13	Panneau de PUR doublé aluminium
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(m K)	0,05	0,06	0,07	0,11	0,11	Panneaux d'aérogel
Épaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,008$ W/(m K)	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05	Panneaux d'isolation sous vide

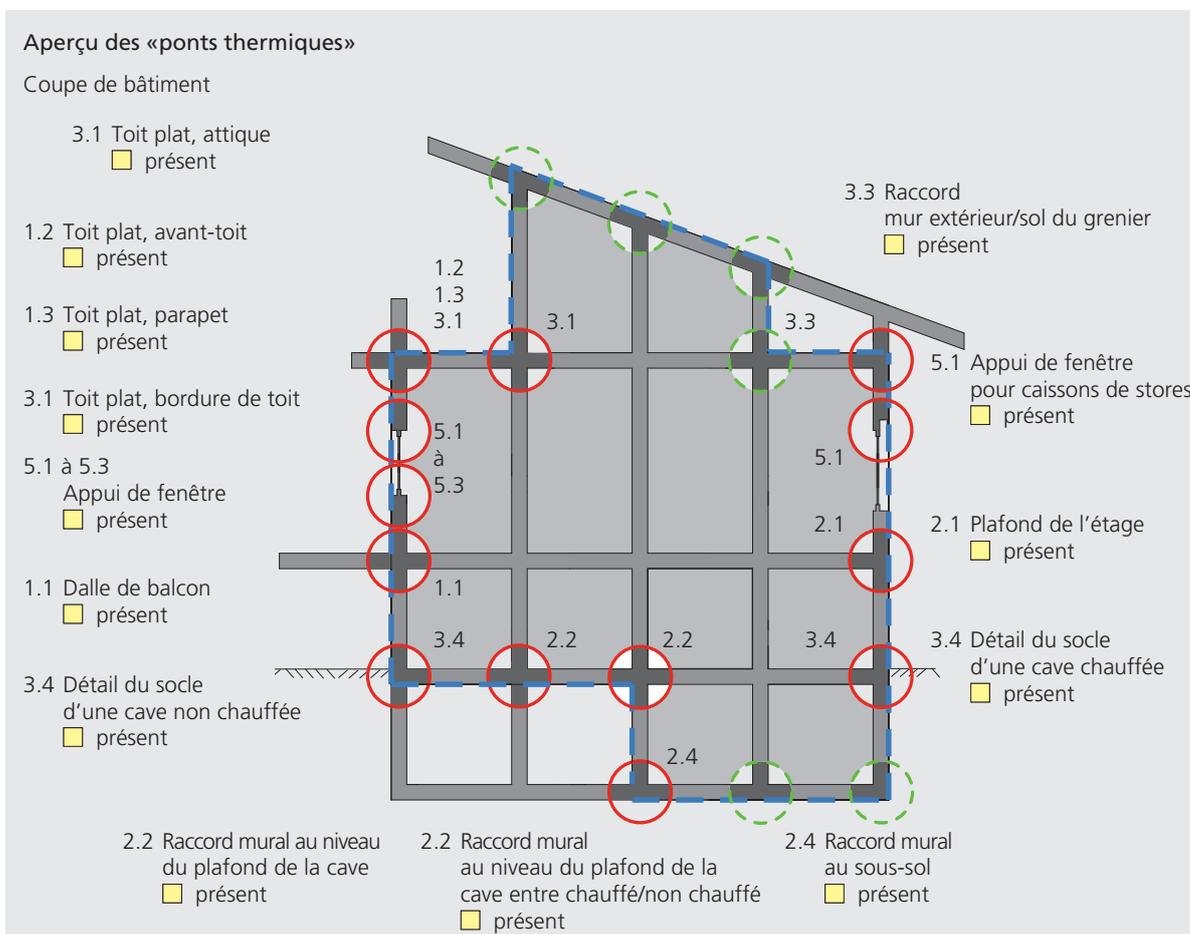
## Élimination des points faibles de l'enveloppe du bâtiment

Souvent, dans le projet et la planification relatifs aux bâtiments neufs et aux rénovations, on se concentre exclusivement sur les valeurs U. Les défauts d'homogénéité et les points de liaison dans les éléments de construction présentent toutefois un risque de déperditions thermiques importantes et de dommages constructifs, s'ils ne sont pas détectés suffisamment tôt et de façon compétente lors de la planification.

### Ponts thermiques

Les ponts thermiques sont des transitions entre des éléments de construction et des zones dans les constructions qui, par rapport à la construction adjacente, présentent un flux thermique supérieur ou une température de surface plus faible côté chaud. La conséquence est une déperdition thermique par transmission plus importante à travers l'enveloppe du bâti-

ment ainsi qu'un risque d'humidité accrue dans la zone des ponts thermiques, au niveau de la surface intérieure de l'enveloppe du bâtiment. Les ponts thermiques linéaires (p. ex. raccords de dalles en saillie, raccords de fenêtres) sont donnés par les coefficients de transmission thermique liés à la longueur  $\Psi$  (psi, W/(m K)). Les ponts thermiques ponctuels (p. ex. sous-structures de façade ventilées par l'arrière) sont donnés par les coefficients de transmission thermique ponctuels  $\chi$  (chi, W/K). Des programmes de calcul des ponts thermiques et des catalogues de ponts thermiques permettent de déterminer les valeurs chi et psi. Des constructions conçues pour minimiser les ponts thermiques permettent de réduire les déperditions thermiques par transmission et d'éviter les phénomènes critiques d'humidité de surface. La déperdition thermique totale d'un pont thermique résulte de la multiplication de psi par la longueur, ou de chi par le nombre. Souvent, on parvient à limiter les valeurs



**Illustration 30:** Les indications et exigences, sous forme résumée, sont regroupés dans la «Liste de contrôle des ponts thermiques» servant au justificatif énergétique.

de psi et de chi, sans réaliser toutefois que de grandes longueurs (p.ex. châssis de fenêtres) et des supports en grand nombre (p.ex. ancrages de façade) réduisent tous ces efforts à néant.

### Étanchéité à l'air

L'enveloppe du bâtiment doit être étanche à l'air. Les défauts d'étanchéité entraînent des déperditions d'air chaud et un renouvellement de l'air non satisfaisant. Ils réduisent l'efficacité des installations de ventilation et génèrent des risques de condensation en raison des fuites d'air, qui peuvent en peu de temps causer de graves dommages.

Selon le périmètre d'isolation thermique, le niveau d'étanchéité doit également être soigneusement planifié et mis en œuvre. Souvent, l'enduit intérieur du mur extérieur constitue le niveau d'étanchéité à l'air. Dans le cas de la toiture inclinée et de la construction en bois, l'habillage intérieur ou le pare-vapeur forme le niveau d'étanchéité à l'air.

- Pourvoir les raccords de fenêtres de bandes adhésives ou de bandes de joint appropriées.

- Dans la zone de la chape, poser l'enduit intérieur jusqu'au plafond brut.

- Réaliser les installations électriques de façon étanche (boîtier d'encastrement plutôt que prise étanche à l'air noyée dans le plâtre).

- Enduire les parois arrière des gaines d'installations.

- Réaliser la transition entre les colonnes montantes et les zones situées à l'extérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment de façon étanche à l'air.

- Planifier et réaliser la mesure de l'étanchéité à l'air («Blower-door-Test», surtout dans le cas des objets massifs non continus) au cours de la construction, tant que les points délicats sont encore accessibles.

### Sources

- [1] Goretzki P., Maass I., Solarfibel – Städtebauliche Massnahmen: Solare und energetische Wirkungszusammenhänge und Anforderungen, Editeur: Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Eigenverlag, Stuttgart 1998

- [2] Norme SIA 380/1, L'énergie thermique dans le bâtiment, Consultation, Zurich 2013

- [3] Ragonesi M., Menti U.-P., Tschui A., Zurfluh B., Minergie-P, Le standard de la maison à 2000 watts, 3<sup>e</sup> édition, Faktor Verlag, Zurich 2010

- [4] KBOB – Données des écobilans dans la construction, téléchargement: [www.sia.ch](http://www.sia.ch), Zurich 2012

- [5] Caractéristiques des matériaux de construction SIA, téléchargement: [www.sia.ch](http://www.sia.ch), Zurich 2013

- [6] Frank T., Glanzmann J., Keller B., Queisser A., Ragonesi M., Element 29 – Protection thermique dans le bâtiment, Editeur: Schweizerische Ziegelindustrie, Faktor Verlag, Zurich 2010

- [7] Bastian Z., Feist W. et al., EnerPHit Planerhandbuch, Passivhaus Institut, Darmstadt 2012

## Achim Geissler Vitres

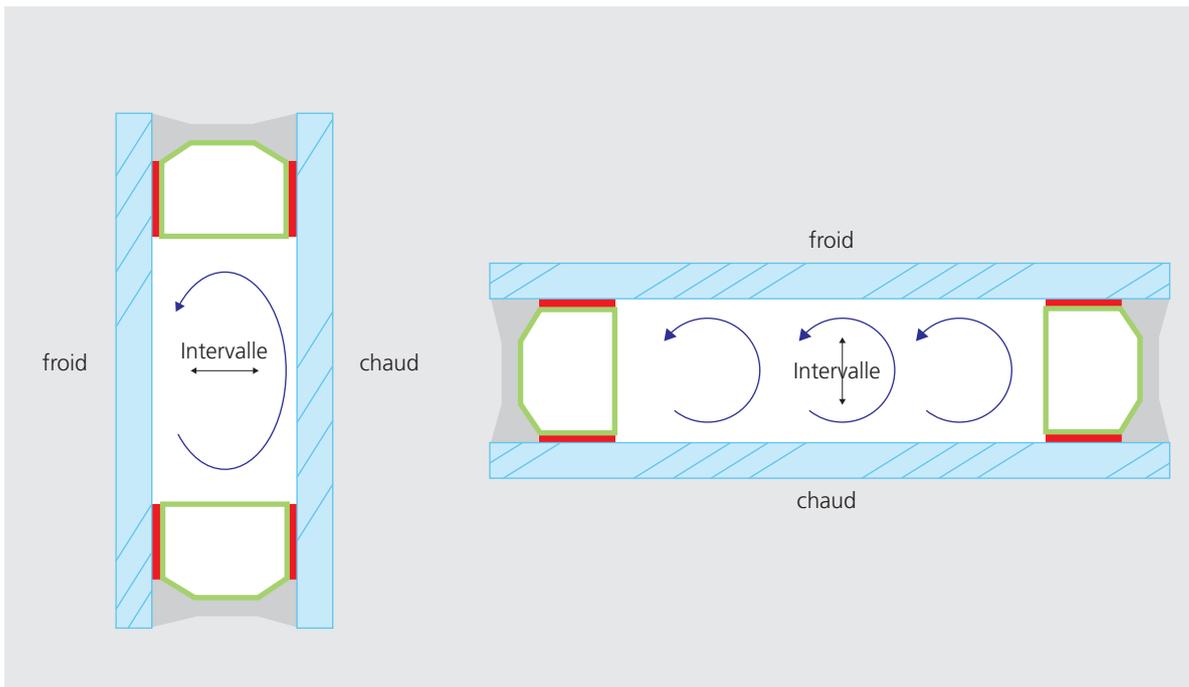
Les vitres sont un élément central des bâtiments efficaces. Elles approvisionnent l'espace intérieur en lumière naturelle et fournissent un rapport visuel à l'environnement. En hiver, elles permettent l'utilisation passive de l'énergie solaire et réduisent ainsi nettement le besoin en chaleur. En été, elles peuvent toutefois également être problématiques, si la part vitrée est trop importante. Les vitrages de protection thermique et de protection solaire modernes sont des produits à haute performance. Les composants suivants de la structure des vitres sont déterminants pour leurs propriétés thermiques:

- Nombre et épaisseur des intervalles entre vitres (vitrage isolant double ou triple, fenêtres doubles, façade double vitrée)
- Gaz de remplissage (types: air, argon, krypton, xénon)
- Revêtement (coefficient d'émission et absorption ou réflexion solaire) et
- Entretoises entre les vitres (matériaux).

Les propriétés acoustiques, quant à elles, sont déterminées par les épaisseurs des différentes vitres, les vitres laminées éventuellement présentes ainsi que l'asymétrie des épaisseurs de vitres et les intervalles entre vitres.

## La valeur U

La valeur U du vitrage  $U_g$  est en général donnée par les fabricants pour une intégration dans un agencement vertical. Cette valeur ne s'applique pas aux vitrages de toit et aux fenêtres de toit. La détermination de la valeur U du vitrage est définie dans la norme SN EN 673. Cette norme propose également une base de calcul appropriée pour les vitrages inclinés. Selon la structure d'un vitrage isolant, une utilisation en position horizontale (flux thermique vers le haut) entraîne une augmentation de la valeur U du vitrage de 20 à 50 %, en raison d'une convection fortement accrue dans l'intervalle entre les vitres (illustr. 31 et 32). Si l'on prend en compte cet état de choses dans le calcul de la valeur U ou dans le bilan énergétique (justificatif de système), la déperdition thermique par transmission correspondante de cet élément de construction est bien entendu nettement sous-estimée. L'illustration 32 montre que l'élément de construction «fenêtre», dans la configuration «fenêtre de toit», avec un vitrage isolant double, n'est pas en mesure de remplir l'exigence individuelle selon SIA 380/1:2009.



*Illustration 31: Transport de chaleur par convection accrue en présence de vitres inclinées – Phénomène appelé convection de Rayleigh-Bénard (ift Rosenheim).*

### Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire à ondes courtes qui parvient sur la terre est réparti sur des longueurs d'onde comprises entre env. 250 et 2500 nm. L'illustration 34 montre la répartition spectrale de l'intensité du rayonnement ainsi que la plage de longueurs d'onde de la lumière visible dans le spectre solaire. Le rayonnement à ondes courtes qui parvient globalement sur une surface se compose de parts directes et diffuses:

$$I_{\text{glob}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{diff}} \quad (1)$$

avec

$I_{\text{dir}}$ : Rayonnement direct (orienté) [W/m<sup>2</sup>]

$I_{\text{diff}}$ : Rayonnement diffus (non orienté) [W/m<sup>2</sup>]

$I_{\text{glob}}$ : Rayonnement global [W/m<sup>2</sup>]

C'est ainsi que nous parvenons des parts directes comme des parts diffuses, par réflexion sur le sol ou sur des constructions environnantes. La part du rayonnement

diffus dépend également très fortement de la couverture nuageuse.

Lorsqu'un rayonnement solaire à ondes courtes arrive sur un corps, il est soit transmis, soit réfléchi, soit absorbé (illustr. 33). La part absorbée se transforme en chaleur dans le corps. La manière dont le rayonnement à ondes courtes incident se répartit sur ces mécanismes possibles dépend des propriétés de physique du rayonnement de la surface de l'élément concerné. Ces propriétés dépendent généralement de la longueur d'onde:

$$\tau(\lambda) + \alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (2)$$

avec

$\tau(\lambda)$ : La transmission pour la longueur d'onde  $\lambda$ ,

$\alpha(\lambda)$ : L'absorption pour la longueur d'onde  $\lambda$  et

$\rho(\lambda)$ : La réflexion pour la longueur d'onde  $\lambda$ .

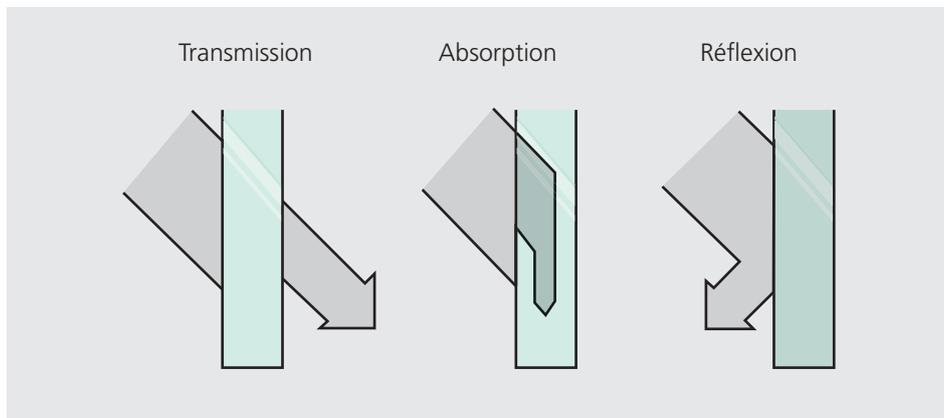
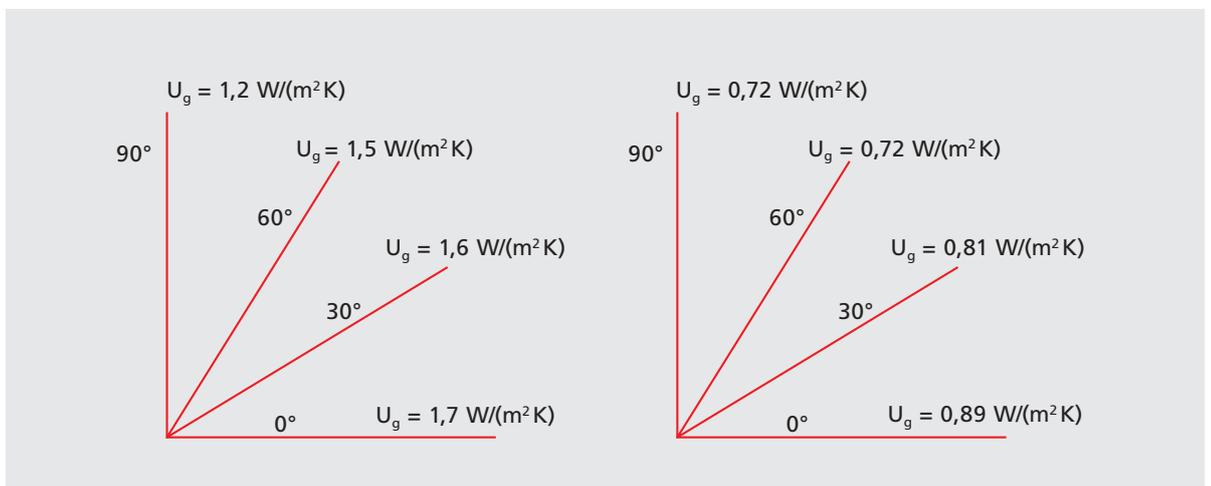


Illustration 33: Processus lorsqu'un rayonnement à ondes courtes parvient sur un élément. Source: Glas Trösch

Illustration 32: Valeur  $U_g$  en fonction de l'angle d'inclinaison, à gauche pour un vitrage isolant double, à droite pour un vitrage isolant triple (ift Rosenheim).



Pour les produits de construction, ces grandeurs dépendantes de la longueur sont généralement résumées en valeurs intégrales pour les propriétés solaires et lumineuses. Lorsque la transmission (lumineuse)  $\tau_{vis}$  est nulle, on parle d'une surface opaque, lorsqu'elle est  $> 0$ , d'une surface translucide ou transparente. Le verre, en tant que matériau, offre pour le rayonnement solaire à ondes courtes, sur toute la plage de longueurs d'onde, une bonne transmission. Les vitrages isolants possèdent, en raison des revêtements hautement spécialisés utilisés, une sélectivité importante en termes de transmission et d'absorption ou de réflexion du rayonnement solaire à ondes courtes. La sélectivité signifie que le verre revêtu laisse passer sélectivement uniquement le rayonnement à ondes courtes dans la plage de longueurs d'onde de la lumière, et réfléchit ou absorbe la majeure partie des autres longueurs d'onde. Lorsque la sélectivité est faible, on est en présence d'un verre de protection thermique simple: le revêtement est optimisé exclusivement sur une faible émissivité. Lorsque la sélectivité est importante, on parle d'un verre de protection solaire. La transition entre ces types de verre est continue et une pluralité de produits est déjà disponible sur le marché.

Le principal objectif de la sélectivité est de laisser passer beaucoup de lumière, c'est-à-dire de permettre un degré de transmission lumineuse élevé tout en laissant passer le moins possible le rayonnement solaire ou l'énergie, à savoir un degré de transmission du rayonnement solaire faible et une faible valeur  $g$ . L'illustration 35 montre un exemple de la transmission solaire spectrale d'un revêtement peu sélectif et d'un revêtement très sélectif. Aujourd'hui, pour cette sélectivité des vitres  $\tau_{vis}/g$ , la limite technique à la fois pour les vitrages isolants doubles et pour les vitrages isolants triples se situe à un facteur d'env. 2. La limite physique se situe à un facteur d'env. 3.

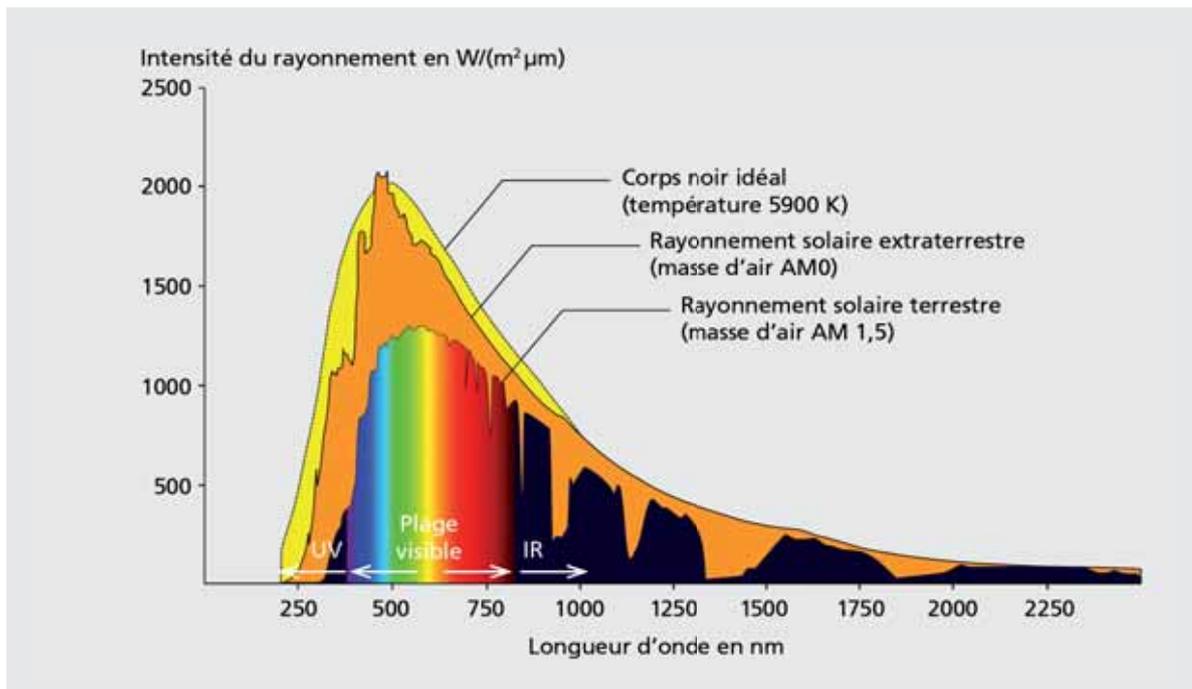


Illustration 34:  
Spectre solaire dans  
la plage de lon-  
gueurs d'onde de la  
lumière visible.  
Source: Wikimedia

### La valeur g

Les fabricants de vitrages de protection thermique et de protection solaire (sous l'appellation générale de vitrages isolants) indiquent une valeur g pour chaque produit. La valeur g indiquée se base sur la norme SN EN 410 et est une combinaison de valeurs de mesure et de calcul. Elle se rapporte au rayonnement direct à ondes courtes qui arrive perpendiculairement sur la surface vitrée. La valeur g est basée sur une égalité de température des deux côtés du vitrage. La valeur g indiquée par les fabricants est donc simplement une valeur de comparaison pour des produits. Lorsque l'on prend en compte des températures et des angles d'incidence du rayon-

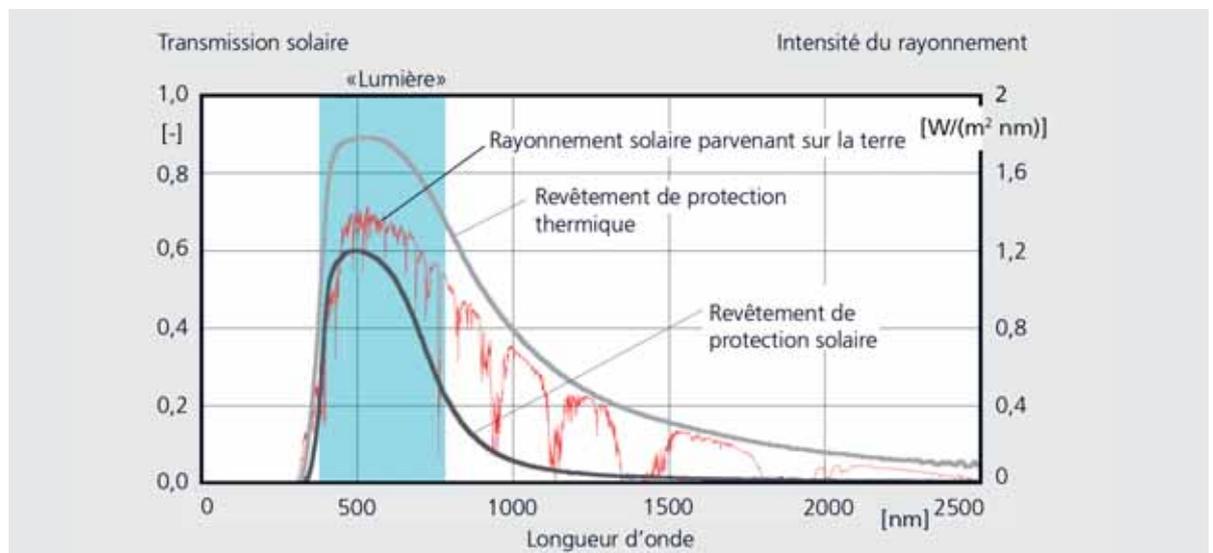
nement qui diffèrent des normales, on parle d'une «valeur g effective». A mesure que l'angle d'incidence augmente par rapport à la normale de la surface, la valeur g effective pour le rayonnement direct diminue. La valeur g diffuse est indépendante de l'angle d'incidence du rayonnement direct. Ces rapports sont représentés à titre d'exemple dans l'illustration 36, pour un système constitué d'un vitrage isolant et de stores à lamelles disposés à l'extérieur. A mesure que la différence de température augmente entre l'extérieur et l'intérieur, la valeur g effective augmente (apports de chaleur par transmission en augmentation).

### Outils de planification

Le LBNL en Californie, Etats-Unis, administre et publie la International Glazing Database. Cette base de données de vitrages contient plus de 4000 jeux de données relatives aux propriétés optiques des vitres (données spectrales). Le LBNL met en outre à disposition un logiciel d'analyse des vitrages de protection thermique (<http://windows.lbl.gov/>). On peut également utiliser le programme WIS issu d'un projet de recherche européen ([www.windat.org/wis/html/](http://www.windat.org/wis/html/)). Celui-ci permet d'analyser des systèmes complexes constitués de verre et d'une protection solaire.

Comme base des indications du fabricant, on utilise généralement une structure du vitrage isolant de 4 – 16 – 4 ou 4 – 12 – 4 – 12 – 4. La valeur g indiquée se base alors généralement sur un verre plat normal («float»). Si l'on utilise un verre pauvre en fer, la valeur g peut être nettement plus élevée, pour un revêtement identique. L'illustration 37 montre à titre d'exemple la transmission et l'absorption solaires ainsi que la transmission et l'absorption lumineuses en fonction de l'épaisseur du verre, pour du verre plat et pour du verre pauvre en fer. Il convient de noter que les revêtements de protection solaire notamment peuvent générer des effets de couleur non souhaités en cas d'utilisation de verre pauvre en fer.

Illustration 35: Sélectivité. Exemple de la transmission solaire dépendante de la longueur d'onde d'un revêtement de protection thermique (Interpane Iplus S) et d'un revêtement de protection solaire (Interpane 52/29), respectivement sur un verre plat de 6 mm.



Au cours de la planification, il convient de travailler, soit en utilisant les offres mentionnées dans l'encadré Outils de planification, soit à l'aide de données issues d'une indication du fabricant concrète, avec la structure effectivement prévue du vitrage.

### Protection thermique estivale

Il existe essentiellement deux possibilités pour éviter la surchauffe des pièces en été. Comme le montre le tableau 4, l'une consiste à éviter les intrants thermiques, l'autre à évacuer la chaleur, en option avec une accumulation intermédiaire de la chaleur par exemple dans les éléments de construction.

Pour optimiser la protection thermique estivale, il est important de trouver un compromis entre la réduction au minimum des intrants solaires et la nécessité d'un approvisionnement suffisant en lumière naturelle. Dans le cas des bâtiments d'habitation, ce n'est généralement pas un problème, mais il en va différemment des immeubles de bureaux et des immeubles commerciaux ainsi que des écoles.

### Dispositifs de protection solaire

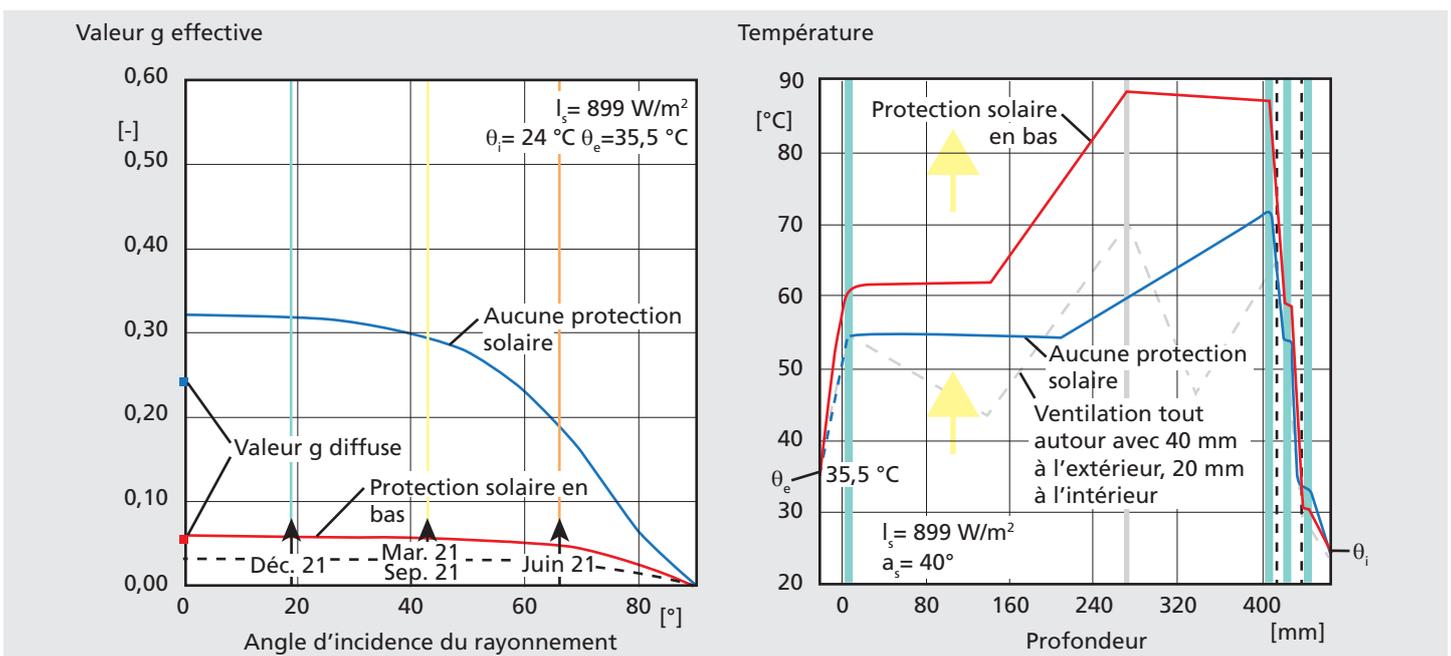
L'élément central d'une protection thermique estivale est une protection solaire suffisante pour tous les éléments de construction transparents. Une protection

idéale peut réduire la valeur  $g$  du système, constitué du vitrage et de la protection solaire, à moins d'env. 10 à 15 %, ce qui permet ainsi un rapport visuel avec l'environnement tout en laissant passer suffisamment de lumière naturelle. Le tableau 5 représente un aperçu des configurations possibles. Les dispositifs mobiles sont à privilégier. Les éléments déterminants sont la commande (la meilleure protection solaire (mobile) n'a aucun effet si elle n'est pas correctement commandée) et la résistance au vent.

### Capacité d'accumulation thermique

Une capacité d'accumulation thermique élevée d'une pièce contribue à éviter les pointes de température. Elle permet, et cela est intéressant notamment dans le domaine des constructions commerciales, un décalage temporel entre l'entrée et l'évacuation des charges. La capacité d'accumulation thermique est calculée en rapport avec la protection thermique estivale sur une période de 24 heures. Reste à déterminer si le calcul doit s'effectuer avec ou sans prise en compte des résistances à la transmission thermique au niveau des surfaces des éléments de construction: Les deux hypothèses sont utilisées dans différentes méthodes.

*Illustration 36: Valeur  $g$  effective pour le rayonnement direct et diffus avec et sans store à lamelles, en fonction de l'angle du profil (à gauche) et des températures dans les plans des éléments de construction, pour un angle de courbe du soleil de  $40^\circ$  (valeurs maximales, à droite).*



### Ventilation

La ventilation permet d'amener de la chaleur dans une pièce ou de l'évacuer hors de celle-ci. La transmission thermique à l'air ainsi que la capacité d'accumulation thermique de l'air sont toutefois relativement faibles. Le débit volumique d'air doit donc être suffisamment important lorsque de grandes quantités de chaleur doivent être évacuées. Le potentiel de refroidissement peut être estimé comme suit:

$$q_L = \rho c_p \Delta T \quad (3)$$

respectivement

$$Q_L = \dot{V} q_L \quad (4)$$

avec

$q_L$  Potentiel de refroidissement spécifique par la ventilation en Wh/m<sup>3</sup>

$\rho$  Densité de l'air en kg/m<sup>3</sup>

$c_p$  Chaleur spécifique de l'air en Wh/(kg K)

$c_{p,N} \approx 0,279$  Wh/(kg K) peut être utilisé comme valeur numérique.

$\Delta T$  Différence de température utilisable

$Q_L$  Potentiel de refroidissement par la ventilation en W

$\dot{V}$  Débit volumique d'air de la ventilation en m<sup>3</sup>/h

La ventilation nocturne intensive par les fenêtres est un concept courant, qui permet souvent d'améliorer de façon décisive la protection thermique estivale. Les conditions de base sont alors les suivantes:

■ L'air environnant doit être plus froid que l'air ambiant ou que les surfaces qui entourent la pièce.

■ Le débit volumique d'air doit être suffisamment important.

■ La pièce doit présenter une capacité d'accumulation thermique suffisante.

Tableau 4: Possibilités pour éviter et évacuer les charges thermiques dans les bâtiments.

	Grandeur	Mesure
Eviter	Part de fenêtres ou de vitres des façades	Réduire
	Valeurs g (verre, opaque)	Réduire
	Charges internes	Réduire
	Valeur U (translucide et opaque)	En fonction du climat et du niveau, pas forcément univoque
	Ombrage	Augmenter
	Protection solaire	Améliorer
Evacuer	Ventilation	Augmenter ou réduire en fonction de la température extérieure
	Accumulation et ventilation nocturne	Augmenter la possibilité d'accumulation, permettre la ventilation nocturne
	TABS et autres systèmes actifs	Prévoir dans le concept
	Valeur U (translucide et opaque)	En fonction du climat et du niveau, pas forcément univoque

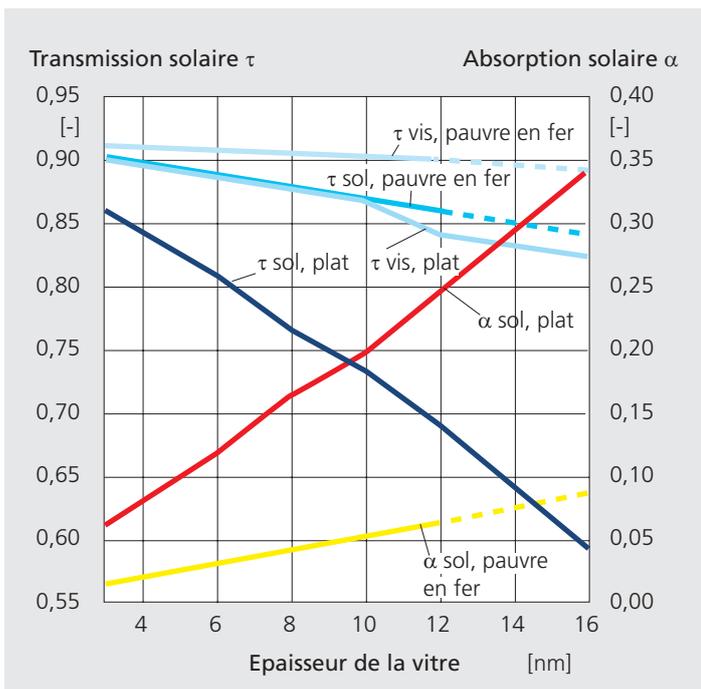
Tableau 5: Dispositifs de protection solaire et leur possibilité d'agencement.

Type	Variantes	intérieur	intra	extérieur
Rideaux mobiles	Tissu; réfléchissant, perméable à la lumière	x	x	x
	Lamelles normales, systèmes de déviation de la lumière (p. ex. rideaux en deux parties, formes de lamelles spéciales, vertical, horizontal)	x	x	x
Ombrages fixes	Surplombs, saillies	-	-	x
	Pilastres latéraux	-	-	x
	Brise soleil	-	-	x
Verre de protection solaire	Normal	-	(x)	-
	Thermochromique ou électrochromique	-	(x)	-
	Les développements actuels comprennent une déviation de la lumière intégrée, un système PCM, de nouvelles possibilités d'assombrissement, etc.	-	(x)	-

Les longues périodes très chaudes sans refroidissement notable la nuit restent problématiques. Dans la plupart des régions climatiques de Suisse, ce scénario n'est toutefois pas fréquent. Pour garantir un refroidissement nocturne efficace, il convient d'assurer un renouvellement de l'air d'au moins environ 2 à 3/h. Pour cela, on estime que la surface transversale des ouvertures doit être d'env. 5 % de la surface du sol pour une ventilation d'un côté (illustr. 38) et de chaque fois 1 à 2 % de la surface du sol pour une ventilation transversale.

Le renouvellement de l'air nécessaire à un refroidissement nocturne efficace est nettement supérieur au renouvellement de l'air nécessaire pour des raisons hygiéniques. C'est pourquoi les installations de ventilation mécaniques conçues à cet effet sont généralement inappropriées. Une installation de ce type dimensionnée pour le refroidissement nocturne serait surdimensionnée pour le fonctionnement normal, ce qui la rendrait peu pertinente sur le plan économique et énergétique.

**Illustration 37:**  
Transmission et absorption solaires ( $\tau_{sol}$ ,  $\alpha_{sol}$ ) ainsi que transmission et absorption lumineuses ( $\tau_{vis}$ ,  $\alpha_{vis}$ ) en fonction de l'épaisseur de la vitre. Les valeurs correspondent à un verre plat («float») et à un verre pauvre en fer.



## Exigences et justificatif

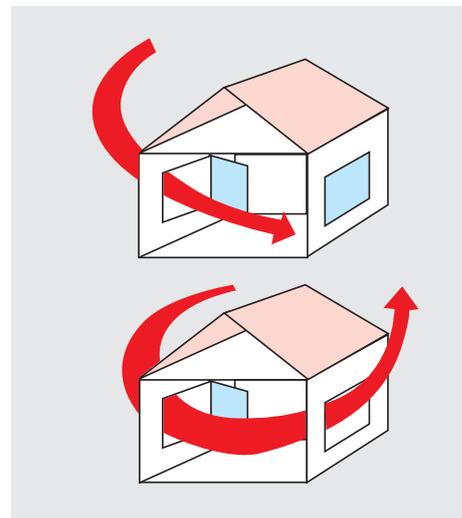
Pour le justificatif de la protection thermique estivale, on se base en Suisse tout d'abord sur les exigences cantonales (Modèle de prescriptions énergétiques des cantons, art. 1.7 et 1.8): «La protection thermique des bâtiments en été est à justifier». Des méthodes de justification figurent dans la norme SIA 180:2014.

Selon la complexité de l'objet, trois méthodes sont possibles pour le justificatif. La méthode 1 est très simple, mais n'est applicable qu'à certains cas. La méthode 3, la simulation, est universelle, mais complexe. La méthode 2 est un compromis en termes de complexité et d'applicabilité.

### Critères simples (méthode 1)

Le justificatif est considéré comme obtenu lorsque les critères généraux selon la norme SIA 180: 2014 sont remplis pour toutes les pièces:

- Les fenêtres de toit transparentes ou translucides dotées d'une protection solaire extérieure présentent une surface de moins de 5 % de la surface au sol nette de la pièce concernée.
- Le coefficient de transmission thermique du toit est au maximum égal à 0,20 W/(m<sup>2</sup>K).
- Pour toutes les fenêtres, on dispose d'une protection solaire extérieure mobile avec une classe de résistance au vent 6, conformément à SIA 342, annexe B.2. Le degré de perméabilité énergétique globale  $g_{tot}$  de la fenêtre (vitrage et protection solaire) est au maximum égal à 0,10.



**Illustration 38:**  
Ventilation d'un seul côté (en haut) et ventilation transversale (en bas).  
Source: Fenster Keller AG

■ La profondeur de la pièce est, pour chaque fenêtre, au minimum égal à 3,5 m. Les fenêtres opposées doivent présenter une distance d'au moins 7 m.

■ Une inertie thermique moyenne à élevée est garantie et les parts vitrées maximales conformément au tableau 6 ne sont pas dépassées. Pour les orientations entre le sud-sud-est et le sud-sud-ouest, la part vitrée maximum mentionnée dans le tableau 6 peut être multipliée par 1,2, si la fenêtre est ombragée par un avant-toit ou un balcon, dont la saillie correspond au moins à la moitié de la hauteur de la fenêtre.

### Justificatif simplifié (méthode 2)

Dans la méthode 2, on considère la protection solaire de façon plus détaillée. La valeur  $g$  à atteindre est déterminée en fonction de l'orientation et de la part vitrée (la surface vitrée lumineuse par rapport à la surface visible de la façade). L'illustration 39 montre les valeurs à atteindre. Ces valeurs doivent être justifiées avec une protection solaire activée.

## Approvisionnement en lumière naturelle

L'approvisionnement des pièces intérieures en lumière naturelle reste un sujet d'actualité. Dans les écoles et les bureaux notamment, il faut concilier les exigences d'un rapport visuel avec l'extérieur, d'une quantité suffisante de lumière naturelle et d'un

bon travail à l'écran. Dans la planification, on utilise souvent le facteur de lumière naturelle pour évaluer la situation en termes de lumière naturelle. Le facteur de lumière naturelle TQ (daylight factor, DF) décrit la quantité de lumière naturelle qui parvient en un point dans une pièce (généralement une surface horizontale à la hauteur d'une table). Cela s'exprime dans l'intensité d'éclairage en % au niveau du point considéré, rapporté à l'intensité d'éclairage sur une surface horizontale à

### Constructions dotées d'une inertie thermique élevée

■ Plafonds en béton ou murs en béton, en brique ou en briques silico-calcaires en contact direct avec l'air ambiant; les éléments de construction ainsi matérialisés doivent correspondre au minimum à 80 % de la surface du sol.

### Constructions dotées d'une inertie thermique moyenne

- Chape en mortier de ciment d'au moins 6 cm d'épaisseur ou chape en sulfate de calcium d'au moins 5 cm d'épaisseur sur 80 % de la surface du sol, revêtue de plaques ou d'un matériau ayant une conductivité thermique élevée.
- Construction en bois massif (murs, sols, plafonds) avec au moins 10 cm d'épaisseur.
- Les constructions suivantes possèdent une inertie thermique faible (ce qui exclut l'application de la méthode 1):
- Construction légère en bois ou métal, sans couches lourdes.

La résistance à la perméabilité thermique  $R$  des couches de recouvrement des surfaces doit être au maximum de  $0,10 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ .

### Perméabilité thermique des couches de recouvrement sur les surfaces des pièces

Extérieur

Intérieur

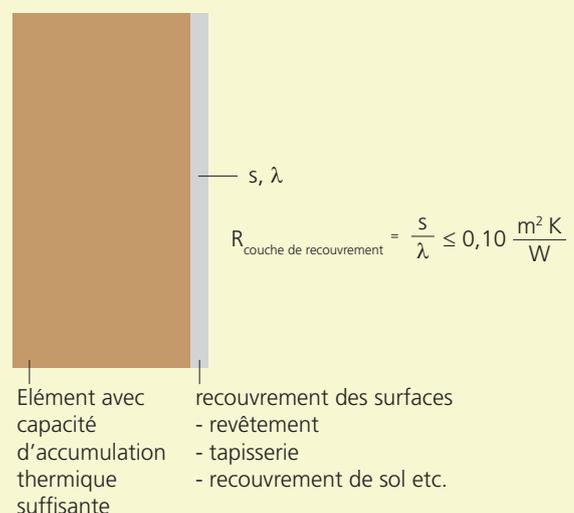


Tableau 6: Critères relatifs à l'utilisation et à la situation pour la méthode de justificatif 1: Parts vitrées maximales pour un justificatif simple du confort dans la saison chaude.

Catégorie de pièce	Fenêtre sur	Part vitrée maximale pour une protection solaire avec commande	
		Manuelle	Automatique
Habitation à haute inertie thermique	Une façade	50 %	70 %
	Plusieurs façades	30 %	50 %
Habitation à inertie thermique moyenne	Une façade	40 %	60 %
	Plusieurs façades	30 %	50 %
Bureau, salle de réunion, école, inertie thermique élevée	Une façade	—	40 %
	Plusieurs façades	—	30 %

l'extérieur sous un ciel diffus avec 10 000 lux. Le facteur de lumière naturelle est donc une valeur stationnaire qui décrit une situation donnée, qui n'arrive que rarement. Il peut donner de premières indications sur les conditions de lumière naturelle mais ne suffit pas à optimiser une façade dans le champ de contraintes entre la lumière naturelle, les apports de chaleur solaire et la minimisation de l'éblouissement (illustr. 41). L'optimisation de l'approvisionnement en lumière d'un espace

intérieur doit toutefois s'effectuer entre ces pôles, notamment pour les postes de fabrication, d'apprentissage et de travail. C'est pourquoi, pour la planification de l'approvisionnement en lumière naturelle, on utilise de plus en plus ce que l'on appelle la «planification de la lumière naturelle basée sur le climat». Le schéma de l'illustration 40 montre l'extension à des conditions d'éclairage naturelles, par rapport à l'hypothèse statique artificielle d'un ciel uniforme avec 10 000 lux.

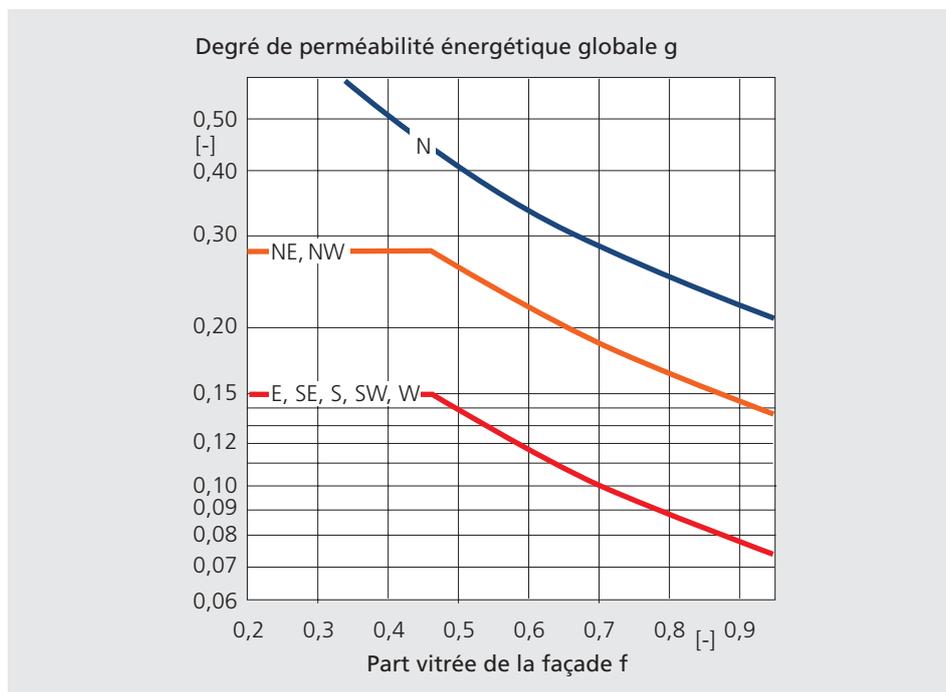


Illustration 39: Exigences en matière de valeur  $g$  des fenêtres de façade (vitrage et protection solaire) selon la part vitrée et l'orientation de la façade. Source: [7]

### Refroidissement nocturne

Le refroidissement nocturne est possible, dans le sens de la norme SIA 180 (2014), pour la méthode 1 et la méthode 2, lorsque les conditions suivantes sont réunies:

- Un refroidissement nocturne efficace de la masse du bâtiment par la ventilation nécessite des débits d'air spécifiques au volume de la pièce (renouvellement de l'air), d'au moins 3/h ou 9 m<sup>3</sup> par heure et par m<sup>2</sup> de surface de plancher nette. Si la part vitrée des façades de la pièce concernée est supérieure à 30 %, ces valeurs augmentent à 4/h ou 12 m<sup>3</sup> par heure et par m<sup>2</sup> de surface de plancher nette.
- Aux endroits appropriés, il convient de prévoir de grandes ouvertures de ventilation qui peuvent rester ouvertes la nuit et qui, même par vent calme, assurent une ventilation suffisante pour le refroidissement de la pièce. Les fenêtres et ouvertures de toit sont appropriées.
- Une ouverture d'évacuation d'air doit être placée au point le plus haut possible dans la pièce pour évacuer l'air chaud.
- La section transversale active des ouvertures doit s'élever, pour une ventilation d'un seul côté, à au moins 5 % de la surface de sol nette. Jusqu'à une profondeur de pièce de 3,5 m, la ventilation des pièces est possible via une façade, au-delà des ouvertures doivent être prévues au niveau de deux façades opposées.

## Lumière naturelle et intrants thermiques

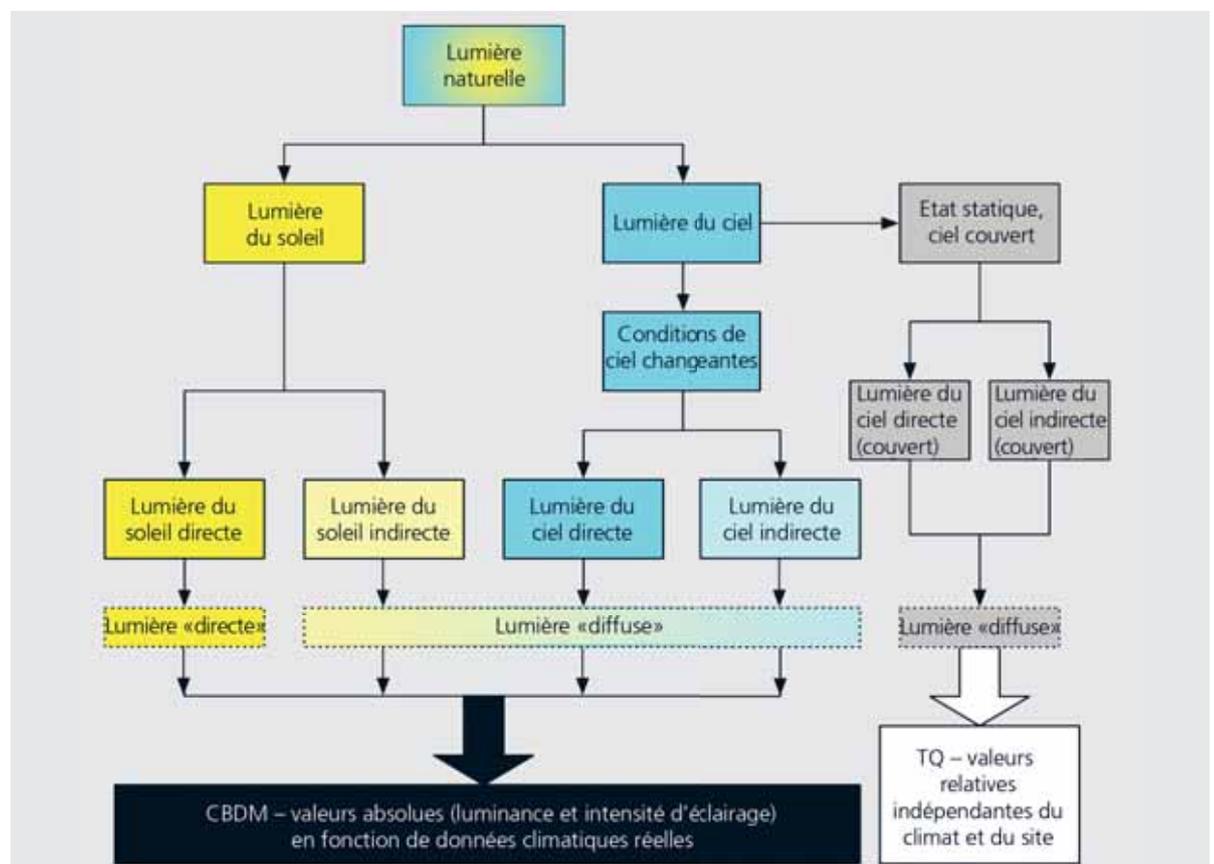
L'approvisionnement d'une pièce en lumière naturelle – rayonnement à ondes courtes dans la plage de longueurs d'onde de 380 à 780 nm – engendre bien entendu également un intrant thermique. L'efficacité de la lumière naturelle peut être exprimée, de la même manière que celle des moyens d'éclairage ou des lampes, en lm/W. L'efficacité lumineuse dépend des propriétés de physique du rayonnement du vitrage, notamment de la sélectivité du revêtement. Pour les vitrages de protection thermique, elle est légèrement plus élevée que dans le cas des meilleures lampes disponibles à ce jour, et dans le cas des vitrages de protection solaire, nettement plus élevée. Cette situation est amenée à changer dans les prochaines années, grâce à des développements plus poussés dans le domaine des LED (et probablement également des OLED), avec pour conséquence le fait que, du point de vue énergétique tout du moins, le débat autour de

la lumière naturelle prendra une autre orientation. Les tableaux 7 et 8 répertorient des valeurs de référence pour l'efficacité lumineuse de sources lumineuses naturelles et artificielles.

### Planification de la lumière naturelle basée sur le climat

Dans le cadre de la «Planification de la lumière naturelle basée sur le climat» («Climate-based daylight modelling» (CBDM)), des simulations détaillées basées sur le climat (p. ex. avec Daysim [5]) sont réalisées. Celles-ci sont fondamentalement comparables avec des simulations thermiques de bâtiments pour l'analyse détaillée et l'optimisation du comportement thermique des bâtiments. L'analyse intègre aussi bien le site, les durées d'utilisation, les ombres et les dispositifs de protection solaire que la stratégie de régulation et le comportement des utilisateurs. Les interactions entre l'approvisionnement en lumière naturelle, l'éblouissement, le besoin en électricité pour l'éclairage ainsi que les intrants thermiques solaires peuvent être évaluées

Illustration 40: Sources lumineuses prises en compte dans la planification de la lumière naturelle basée sur le climat (CBDM) par rapport à la valeur statique «facteur de lumière naturelle» (daylight factor, DF). Source: [1]



de façon globale, pour différentes variantes de planification. De telles analyses détaillées sont peu appropriées aux maisons individuelles et familiales en raison de leur complexité, mais sont précieuses pour les immeubles de bureaux et les écoles. Néanmoins, grâce à la numérisation toujours plus poussée de toutes les phases de la planification, on peut s'attendre à ce que le CBDM soit de plus en plus utilisé.

### Métriques

A l'exception de la valeur UGR, les métriques mentionnés ci-après – c'est-à-dire des systèmes de coefficient – reposent sur des simulations basées sur le climat à des intervalles de maximum une heure en général. Ces métriques permettent de réduire la quantité de données générées, de manière à ce que les résultats d'une interprétation soient accessibles. La valeur UGR n'est indiquée que par souci d'exhaustivité.

### L'autonomie en lumière naturelle (TA)

(Daylight Autonomy, DA) est la part d'heures d'utilisation pour laquelle une intensité d'éclairage définie est atteinte ou dépassée via la lumière naturelle. Cette indication est donnée en %. La visualisation s'effectue à l'aide d'une représenta-

tion en couleurs dégradées sur un plan de la pièce concernée.

### Autonomie en lumière naturelle simplifiée

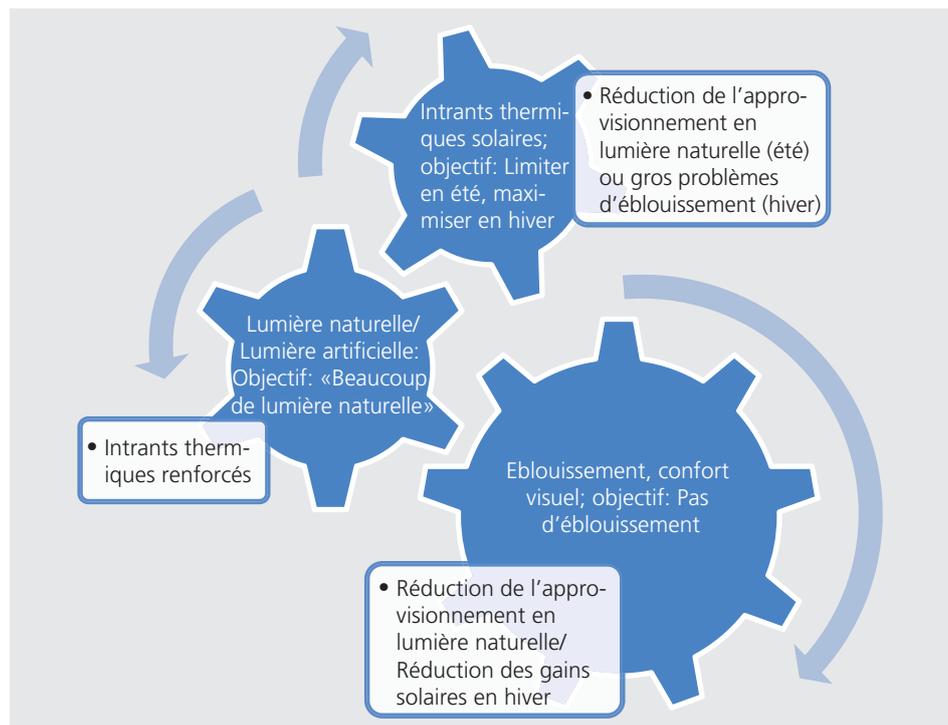
( $TA_{380/4}$ ): Sur la base de la norme SIA 380/4:2006, on peut utiliser les heures à pleine charge de l'éclairage pour une estimation simplifiée de l'autonomie en lumière naturelle: l'objectif de planification est de minimiser les heures à pleine charge de l'éclairage. Cela équivaut à une augmentation de l'autonomie en lumière naturelle.

$$TA_{380/4} = 100 \cdot (1 - t_{Li,Nz}/Nz)$$

$Nz$  Durée d'utilisation conformément à SIA 380/4 en heures par jour (valeur standard 11 heures)

$t_{Li,Nz}$  Heures à pleine charge par jour pour une durée d'utilisation  $Nz$  conformément à SIA 380/4

**Intensité d'éclairage utile (UDI):** L'intensité d'éclairage utile par la lumière naturelle (Useful Daylight Illuminance, UDI) correspond au pourcentage des heures d'utilisation dans l'année pendant lesquelles la lumière naturelle permet d'at-



*Illustration 41: Triangle de contraintes entre les objectifs d'un approvisionnement optimal en lumière naturelle, d'un non-éblouissement et d'intrants thermiques – les intrants thermiques doivent en outre être maximisés en hiver et minimisés en été.*

teindre une intensité d'éclairage donnée. Les plages de valeurs traditionnelles sont par exemple  $UDI_{>2000\text{ Lux}}$  (trop clair),  $UDI_{500-2000\text{ Lux}}$  (autonomie),  $UDI_{100-500\text{ Lux}}$  (en soutien) et  $UDI_{<100\text{ Lux}}$  (pas de lumière naturelle). Ces valeurs peuvent être représentées sous forme de couleurs dégradées sur un plan de la pièce concernée. La combinaison de l'autonomie en lumière naturelle et de l'EDI peut montrer des zones supplémentaires qui sont certes autonomes mais trop claires: Cela indique que la protection solaire sera plus souvent nécessaire que prévu dans l'état de planification initial [3].

**La probabilité d'éblouissement (DGP, Daylight Glare Probability)** indique le pourcentage d'utilisateurs qui, à l'endroit étudié, se sentiront éblouis dans la direction de regard considérée. La plage de définition se situe entre 20 et 80 %, des valeurs au-dessous de 32 à 35 % étant considérées comme «éblouissement non perceptible», des valeurs jusqu'à environ 40 % comme «perceptible», des valeurs jusqu'à environ 45 % comme «dérangeant» et des valeurs supérieures comme «intolérable» [4].

### Degré d'éblouissement direct (UGR):

Le degré d'éblouissement direct (Unified Glare Rating) est défini pour les lampes et est limité à des sources ayant un angle solide compris entre  $3 \cdot 10^{-4}$  et  $1 \cdot 10^{-1}$  sr (sr signifiant stéradian). La valeur UGR ne possède aucune unité. Le degré d'éblouissement direct est utilisé dans SIA 380/4:2006 pour la planification de l'éclairage. Les valeurs limites UGR recommandées forment une ligne dont les niveaux représentent une modification notable de l'éblouissement: 10, 13, 16, 19, 22, 25 et 28. Les postes de travail ne doivent pas dépasser une valeur UGR de 19 à 22 (SN EN 12464-1).

### Fenêtres et façades

Les fenêtres sont des produits haute performance. Elles remplissent des exigences multiples, assurent le passage de la lumière dans les pièces, les apports solaires thermiques passifs et un rapport visuel direct avec l'environnement. De nombreux immeubles administratifs modernes, mais également certains immeubles d'habitation, sont planifiés et conçus avec des façades-rideaux. En principe, une façade-ri-

Tableau 7: Valeurs indicatives pour l'efficacité lumineuse de sources de lumière naturelles et artificielles.  
Source: [1]

Source	Efficacité lumineuse (lm/W)
Lumière du soleil directe	70 – 95
Ciel bleu clair, part diffuse	130
Ciel couvert, part diffuse	110
Lumière naturelle globale (directe et diffuse)	105
Ampoule à incandescence	15
Lampes à fluorescence	57 – 72
Tubes fluorescents T5	70 – 100
LED	90 – 180*
*Version 2012 pour divers prototypes – LED simples, pas encore de moyen d'éclairage ni de lampe fini; température de lumière variable.	

Tableau 8: Valeurs indicatives pour l'efficacité lumineuse de sources de lumière naturelles du tableau 7, corrigées avec les propriétés sélectives des vitrages modernes.

Source	Type de verre*	Efficacité lumineuse (lm/W)
Lumière du soleil directe	Protection thermique	100 – 130
	Protection solaire	115 – 160
Ciel bleu clair, part diffuse	Protection thermique	180
	Protection solaire	217
Ciel couvert, part diffuse	Protection thermique	150
	Protection solaire	180
Lumière naturelle globale (directe et diffuse)	Protection thermique	145
	Protection solaire	176
*Verre de protection thermique Interpane IPlusE, verre de protection solaire Interpane 52/29; respectivement 6-16-6.		

deau entièrement vitrée est une grande fenêtre. Les illustrations 42 et 43 montrent des bâtiments dotés de façades-rideaux – la Prime Tower correspond au concept traditionnel, le bâtiment Renaissance pourrait également être une façade ajourée.

### Déperditions thermiques

Comme le montrent les illustrations 42 et 43, la conception architecturale n'est pas vraiment limitée par le type de construction qu'est la façade-rideau. Un aspect de fenêtres ajourées est réalisable, tout comme un aspect de fenêtres en bandeau. La structure d'une façade n'est pas nécessairement visible. Elle peut toutefois faire une nette différence au regard de ses propriétés thermiques: Les façades-rideaux possèdent en général, dans les zones opaques, une certaine part d'ossature. Celle-ci est nécessaire pour garantir la portance requise de la façade-rideau. La part d'ossature engendre toutefois, du point de vue thermique, des ponts thermiques qui n'apparaissent pas forcément dans cette ampleur dans le cas des façades ajourées ou des façades à fenêtres en bandeau. La base habituelle pour le calcul de la valeur U mur plus fenêtres, plus majoration pour ponts thermiques des ancrages et des appuis de fenêtres, peut conduire à une valeur U globale trop faible.

La formule empirique  $U_{cw} \approx 1,5 \cdot U_g$  peut donner une première estimation pour les façades-rideaux. Si la valeur U issue d'un

calcul conformément à la base habituelle mentionnée est nettement inférieure, la prudence est requise. La réponse à la question «pourquoi une valeur U de la façade autour de  $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  permet-elle encore de respecter la valeur limite du justificatif?» est simple. D'une part, dans les immeubles administratifs relativement grands, le facteur d'enveloppe est très faible. Les déperditions thermiques par l'enveloppe peuvent être réparties sur une grande surface de référence énergétique. En outre, les apports thermiques internes et solaires sont souvent relativement élevés. Une erreur de raisonnement fréquente pour de telles façades consiste à penser qu'en augmentant l'épaisseur de la couche d'isolant dans la zone du plafond de l'étage, on peut influencer de façon importante la valeur U de la façade toute entière. En règle générale, cela ne fonctionne pas du tout! Le potentiel d'optimisation est ailleurs.

### Apports thermiques

Les fenêtres et façades-rideaux dotées de grandes parts vitrées sont certes nettement moins performantes qu'un mur opaque ayant une épaisseur d'isolant habituelle, en ce qui concerne les déperditions thermiques par transmission. Inversement, les vitrages permettent l'entrée de chaleur dans le bâtiment. Dans le bilan global déperditions thermiques moins apports de chaleur, ces surfaces ont nettement l'avan-

Illustration 42: La Prime Tower à Zurich, dotée d'une façade-rideau entièrement vitrée.



Illustration 43: La Mobimo Tower à Zurich – Façade-rideau à l'aspect d'une façade ajourée.

**Valeur  $U_{cw}$** 

La norme SIA 380/1:2009 n'autorise pas la réalisation d'un justificatif par performances ponctuelles pour les façades-rideaux. Dans ces façades, les éléments que sont les fenêtres et les murs sont regroupés de façon inaliénable pour un calcul thermique. C'est pourquoi le calcul de la valeur  $U_{cw}$  des façades-rideaux s'effectue dans le cadre du justificatif de système selon la norme SN EN ISO 12631 (cw signifie curtain wall – façade-rideau). Pour les détails typiques de la construction de telles façades – p. ex. ossature/panneaux isolants, ossature/vitrages isolants, etc. –, des coefficients de déperditions linéaires sont définis, permettant un justificatif plus simple. Un calcul détaillé avec un programme de ponts thermiques en deux dimensions permet toutefois une optimisation spécifique au projet, et est recommandé.

**Valeur U équivalente pour les fenêtres et les façades**

$$U_{eq,w} = U_w - S_f \cdot (1 - F_f) \cdot g$$

- $U_w$  Valeur U de la fenêtre ou de la façade
- $S_f$  Facteur de gains solaires, dépendant de l'orientation, par exemple ordonnance sur la protection thermique 1995: Nord  $S_f = 0,95$ ; Ouest/Est  $S_f = 1,65$ ; Sud  $S_f = 2,4$ ; ce facteur ne prend pas en compte les ombrages individuels.
- $F_f$  Part d'ossature des fenêtres ou de la façade (rapport entre la surface de l'élément de construction auquel s'applique la valeur U et la surface vitrée visible)
- $g$  Valeur g de la fenêtre ou de la façade (cette valeur g doit se rapporter à toute la surface de l'élément exposée au rayonnement solaire, pour les fenêtres l'ouverture lumineuse dans le mur)

tage. Ce bilan peut être réalisé avec une valeur U équivalente. Attention, de telles valeur U équivalentes doivent être utilisées exclusivement pour la comparaison de fenêtres ou façades comme «produit», et ne doivent pas être intégrées dans des calculs plus poussés tels qu'un justificatif de protection thermique selon SIA 380/1.

**Sources**

- [1] J Mardaljevic, L Hescong, E Lee: Daylight metrics and energy savings; Lighting Res. Technol. 2009; 41: 261–283
- [2] Décret sur les économies d'énergie dans le bâtiment (décret sur la protection thermique); 1995
- [3] C. F. Reinhart, J. Wienold: The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylight spaces; Building and Environment 46 (2011), 386 – 396
- [4] Wienold, J. (2009): Dynamic daylight glare evaluation; Building Simulation 2009, Glasgow (RU), 944 – 951
- [5] Reinhart C.F.: Daysim; version 4.0, <http://daysim.ning.com> (version juin 2013)
- [6] Cahier technique SIA 2024: Conditions d'utilisation standard pour l'énergie et les installations du bâtiment; 2006
- [7] Norme SIA 180 (Version consultation, septembre 2013)
- [8] Norme SIA 380/1: L'énergie thermique dans le bâtiment; 2009
- [9] Norme SIA 380/4: L'énergie électrique dans le bâtiment; 2006
- [10] Norme SIA 382/1 Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et exigences; 2007
- [11] Modèles de prescriptions énergétiques des cantons, 2008
- [12] SN EN-673, SIA 331.152:2011: Verre dans la construction – Détermination du coefficient de transmission thermique, U – Méthode de calcul; 2011
- [13] SN EN-410, SIA 331.151:2011: Verre dans la construction – Détermination des caractéristiques lumineuses et solaires des vitrages; 2011
- [14] SN EN ISO 12631, SN EN ISO 12631 (SIA 180.083:2012): Performance thermique des façades-rideaux – Calcul du coefficient de transmission thermique (ISO 12631:2012); 2012

# Chauffage et eau chaude

## Heinrich Huber Terminologie et notions

En l'absence d'indications contraires, les données relatives à des surfaces sont considérées comme des surfaces de référence énergétiques. Les exceptions sont explicitement mentionnées. Une liste des abréviations souvent utilisées figure à la fin de ce chapitre.

### Références

Nous ne donnerons ici qu'un bref aperçu des domaines du chauffage, de la production d'eau chaude, de la ventilation et de la climatisation. Pour approfondir ce thème, reportez-vous aux publications suivantes de la série d'ouvrages spécialisés:

- Technique du bâtiment, planification intégrale des systèmes [1]
- Energies renouvelables [2]

### Standards énergétiques

En raison de l'évolution constante des standards énergétiques et des prescriptions, on peut supposer qu'à partir de 2020, les exigences suivantes s'appliqueront, en termes de besoin énergétique pour le chauffage, la production d'eau chaude et la ventilation:

■ Le besoin en énergie finale des constructions nouvelles correspondra à un équivalent mazout d'environ 3 l par m<sup>2</sup> ou à un indice énergétique pondéré de chaleur de 30 kWh/m<sup>2</sup>. Ce calcul est effectué à l'aide des facteurs de pondérations nationaux, également utilisés dans le CECB et dans Minergie.

■ Pour les bâtiments existants, l'objectif est d'atteindre un équivalent mazout d'env. 6 l par m<sup>2</sup> ou un indice énergétique pondéré de chaleur de 60 kWh/m<sup>2</sup>.

Les valeurs mentionnées représentent l'énergie finale fournie aux bâtiments, sans prendre en compte l'autoproduction d'une éventuelle installation photovoltaïque (PV). Dans le cas des bâtiments à énergie nulle ou quasi-nulle, la production annuelle d'une installation PV propre est au moins équivalente aux besoins mentionnés. Les

concepts et solutions détaillées traités ici doivent être considérés comme des solutions de soutien permettant d'atteindre ces standards énergétiques.

### Energies renouvelables

La génération actuelle et la prochaine génération de bâtiments présupposent, même si l'on utilise des énergies renouvelables, une technique du bâtiment efficiente. Bientôt, il ne sera pas convenable, ni autorisé dans le cadre des prescriptions énergétiques, de chauffer un bâtiment à l'aide d'un chauffage électrique résistif lorsque l'électricité est produite à l'aide d'une installation PV propre (principalement en été). Le bois est un agent énergétique renouvelable, toutefois, étant donné qu'il est disponible de façon limitée et devra, à l'avenir, être de plus en plus utilisé pour la chaleur de processus, ce combustible devra être utilisé avec parcimonie pour le chauffage ambiant et la production d'eau chaude. Par exemple, il sera considéré comme inapproprié de remplacer simplement un chauffage à mazout par un chauffage à granulés de bois, dans le cas d'un bâtiment d'habitation existant doté d'une isolation thermique moyenne, sans prendre aucune autre mesure énergétique. Par contre, si, dans le cas d'une maison familiale neuve à basse énergie, une à deux stères de bois sont consommées, cela ne constituera pas une atteinte sévère au potentiel de bois-énergie suisse, même si le concept est reproduit des milliers de fois.

### Pointes de puissance électriques

L'approvisionnement en chaleur, en présence de basses températures extérieures, ne doit pas entraîner une forte augmentation de l'appel de puissance électrique d'un bâtiment. C'est pourquoi dans le cas d'un immeuble d'habitation existant doté d'une isolation thermique moyenne, il n'est pas avantageux de remplacer une

chaudière à mazout par une pompe à chaleur air-eau monovalente, car cela entraînerait une pointe de puissance électrique supplémentaire d'environ 35 W/m<sup>2</sup>. Par contre, un bâtiment Minergie-P neuf peut être chauffé à l'aide d'une pompe à chaleur air-eau, cela n'entraîne une augmentation de la pointe de puissance électrique que d'environ 6 W/m<sup>2</sup>. Dans le cas des bâtiments dotés de leurs propres installations PV, l'électricité produite doit autant que possible être consommée dans la maison, autrement dit la part injectée dans le réseau doit être réduite au minimum. Si l'approvisionnement en chaleur s'effectue à l'aide d'une pompe à chaleur, il est intéressant de produire l'eau chaude entre environ 10 et 14 heures. Selon la pointe de mi-journée dans la consommation électrique du bâtiment et dans le réseau basse tension environnant, un décalage entre 12 à 16 heures est éventuellement pertinent.

#### Basses températures – haute efficacité

La quasi-totalité des systèmes de production de chaleur fonctionne d'autant plus efficacement que la température du fluide de chauffage est basse. Cela s'applique tout particulièrement aux pompes à chaleur. Lorsque la température de départ, par exemple de 50 °C (valeur maximale admissible pour l'exploitation des nouveaux corps de chauffe), baisse à 35 °C (valeur maximale admissible pour l'approvisionnement des nouveaux chauffages au sol), le coefficient de performance annuel d'une

pompe à chaleur air-eau augmente de 30 %, ou la consommation d'électricité baisse d'environ un tiers. Dans le cas des installations solaires thermiques, le rendement augmente à mesure que la température d'utilisation baisse. Même avec les chaudières de dernière génération, des températures de fluide de chauffage basses ont des répercussions positives sur le système: plus la température de retour est basse, plus la vapeur d'eau des gaz de fumée condense, ce qui permet d'obtenir un rendement plus élevé.

#### Concepts

Ce paragraphe regroupe des recommandations relatives aux concepts d'approvisionnement en chaleur pour les maisons d'habitation petites et moyennes. Ces concepts peuvent également s'appliquer aux écoles et aux immeubles de bureaux petits et moyens. Seuls les systèmes de production de chaleur les plus fréquents sont traités:

- Pompes à chaleur air-eau.
- Pompes à chaleur eau glycolée-eau, une sonde géothermique servant généralement de source de chaleur.
- Chauffages à bois: systèmes à granulés, à bois en bûches et à plaquettes.
- Installations solaires thermiques pour l'assistance au chauffage et la production d'eau chaude.

Ne sont pas traités:

- Les chaudières à énergies fossiles, car celles-ci ne doivent plus être utilisées que

Caractéristiques de bâtiments			
Standard	Bâtiment existant rénové	Construction nouvelle Minergie	Construction nouvelle Minergie-P
Chaleur de chauffage selon SIA 380/1	83 kWh/(m <sup>2</sup> a)	42 kWh/(m <sup>2</sup> a)	21 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Besoin énergétique pour la production d'eau chaude, maison familiale/ immeuble d'habitation	14 kWh/(m <sup>2</sup> a) / 21 kWh/(m <sup>2</sup> a)		
Besoin en puissance de chauffage	35 à 42 W/(m <sup>2</sup> a)	22 à 28 W/(m <sup>2</sup> a)	12 à 18 W/(m <sup>2</sup> a)
Ventilation	Fenêtres à actionnement manuel, air extrait dans la salle de bain et les WC	Aération douce avec récupération de chaleur	Aération douce avec récupération de chaleur

Tableau 9: Comparaison de caractéristiques de différents standards.

pour la couverture des besoins de pointe dans les rénovations.

■ Le couplage chaleur-force, car cette technologie est surtout utilisée pour les gros consommateurs de chaleur.

### Approvisionnement en chaleur et bâtiment

Des combinaisons de différents approvisionnements en chaleur sont représentées pour trois standards d'isolation thermique différents. Les valeurs du besoin en chaleur de chauffage s'appliquent à des bâtiments d'habitation du Plateau suisse dotés d'un facteur d'enveloppe d'environ 1,2 (maison d'habitation moyenne) à environ 2,2 (maison familiale mitoyenne, maison familiale compacte).

### Concepts de base de la distribution de chaleur

#### Chauffage de l'eau à l'aide de corps de chauffe

Un circuit d'eau alimente les corps de chauffe en chaleur dans les différentes pièces. Les installations existantes sont souvent conçues pour des températures de départ relativement élevées, par exemple 60 à 70°C. Après la mise en œuvre des mesures d'isolation thermique sur l'enveloppe du bâtiment, le départ peut toutefois être abaissé à env. 50 à 60°C. Dans les installations nouvelles, le départ s'élève à environ 40 à 50°C. La température de départ

est en général réglée en fonction des conditions climatiques. Les corps de chauffe individuels sont généralement équipés de vannes thermostatiques.

Les avantages de ce type d'installation sont les suivants:

■ Dans les différentes pièces, la température peut être réglée et réglée individuellement.

■ L'émission de chaleur peut être rapidement modifiée.

Les inconvénients sont les suivants:

■ Pour les bâtiments dotés d'un besoin en puissance de chauffage très bas, la distribution de chaleur est relativement complexe et ainsi relativement chère (investissements élevés pour chaque watt de puissance thermique).

■ Les corps de chauffe peuvent restreindre les possibilités d'ameublement et sont parfois peu appréciés pour des raisons esthétiques.

■ Les températures de départ relativement élevées ont une influence négative sur les coefficients de performance des pompes à chaleur.

#### Chauffage de l'eau à l'aide d'un chauffage au sol ou de dalles thermoactives (TABS)

La distribution de chaleur sur une grande surface garantit de basses températures de départ. Dans les bâtiments neufs bien isolés,

Illustration 44:  
Principe de chauffage à eau à l'aide de corps de chauffe.

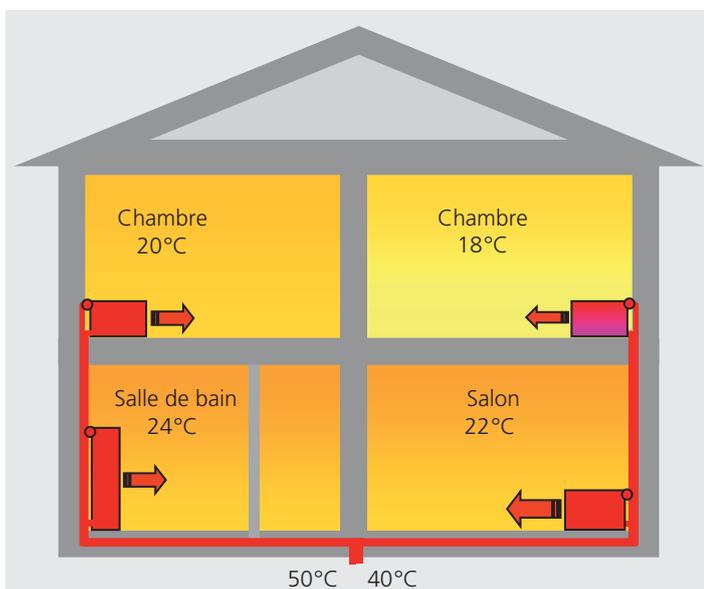
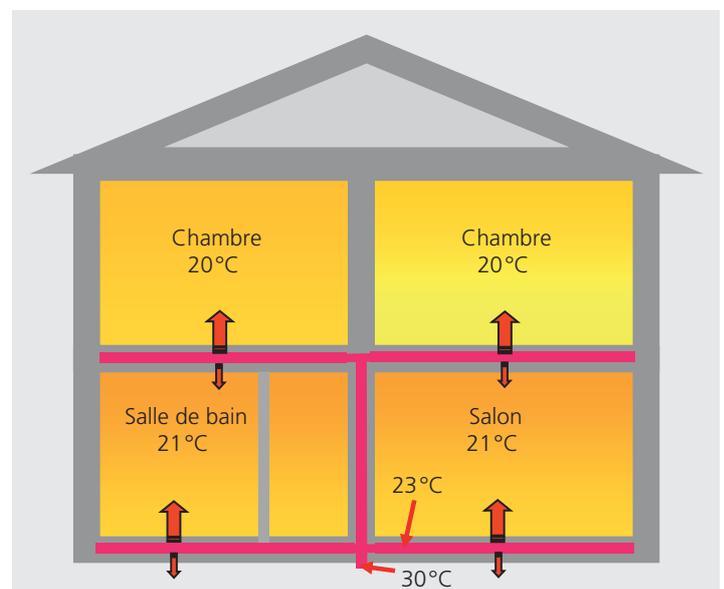


Illustration 45:  
Principe de chauffage à eau à l'aide d'un chauffage au sol ou de TABS.



les valeurs sont de l'ordre de 30 à maximum 35 °C. Avec les TABS, des valeurs de départ encore plus basses sont possibles. Les chauffages au sol relativement anciens et les chauffages de plafond peuvent toutefois nécessiter des températures de départ nettement plus élevées (jusqu'à environ 60 °C). La température de départ dépend en règle générale des conditions climatiques. Dans les maisons familiales, à la place de la température de départ, c'est souvent la température de retour qui est réglée.

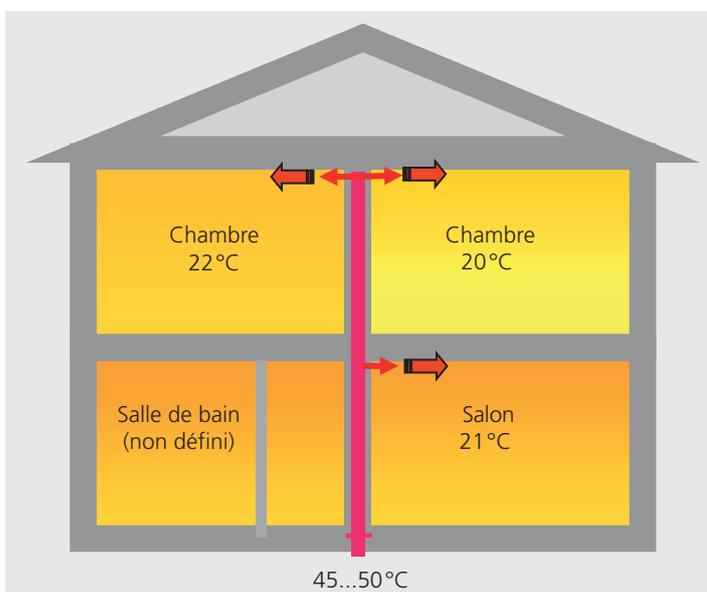
Les avantages de ce type d'installation sont les suivants:

- Les basses températures de départ permettent de bonnes conditions pour l'utilisation de pompes à chaleur.
- En présence de températures de départ inférieures ou égales à 30 °C, on obtient un effet d'autorégulation, qui permet de renoncer à une régulation individuelle des pièces.

Les inconvénients ou facteurs limitants sont les suivants:

- La puissance de la distribution de la chaleur est limitée (p. ex. environ 30 W par m<sup>2</sup> de surface de sol pour une température de départ de 30 °C).
- En raison de la capacité thermique élevée, on observe une inertie de la distribution de chaleur.
- Dans le cas des chauffages au sol, une partie de la chaleur est diffusée vers le bas.

Illustration 46: Principe de chauffage à l'aide de l'air pulsé.



Cela représente un inconvénient lorsque les pièces inférieures appartiennent à une autre unité d'utilisation.

- Dans les bâtiments ayant un faible besoin en puissance de chauffage, la surface de chauffage n'est pas sensiblement chaude. Les utilisateurs peuvent avoir l'impression, lorsqu'ils sont en contact avec cette surface, que le chauffage n'est pas en fonction.

### Chauffage à l'aide d'air pulsé

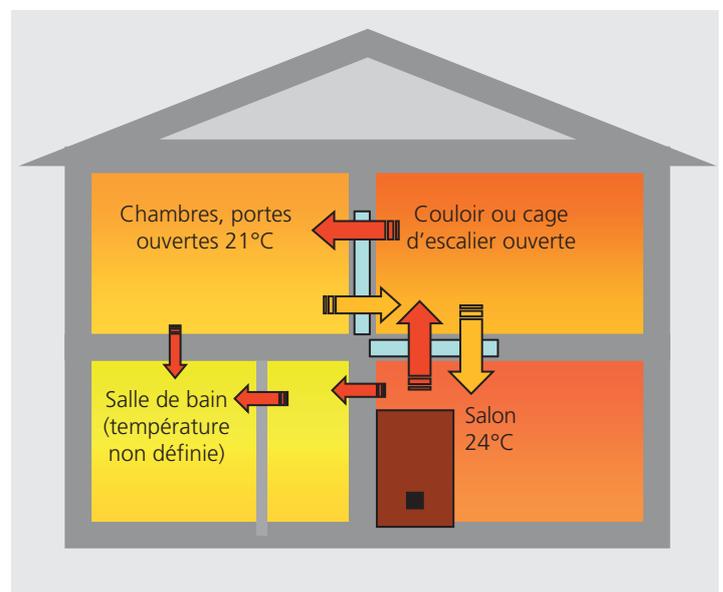
Dans les bâtiments ayant un besoin en puissance de chauffage spécifique de 10 W/m<sup>2</sup> au maximum, la chaleur de chauffage peut être distribuée via une installation de ventilation mécanique. La température ambiante est généralement réglée en fonction d'une pièce de référence. L'avantage de cette solution est le suivant:

- Au prix de quelques équipements supplémentaires, une installation de ventilation simple déjà présente peut prendre en charge la fonction de chauffage.

Les inconvénients ou facteurs limitants sont les suivants:

- Les régulations de pièces individuelles ne sont généralement pas réalisées pour des raisons de coût. Il est donc impossible de régler individuellement la température ambiante.
- Dans le cas des pièces exposées, telles que les chambres en angle, le débit volumique d'air pulsé nécessaire au chauffage

Illustration 47: Principe du poêle avec distribution libre de la chaleur.



peut être supérieur au débit volumique d'air pulsé adapté au renouvellement hygiénique de l'air, même si le besoin en puissance de chauffage est en moyenne (c.-à-d. sur l'ensemble du logement) inférieur à 10 W/m<sup>2</sup>.

■ Le système de production de chaleur distribue généralement la chaleur à un niveau de température plus élevé que dans le cas d'une distribution de chaleur utilisant de l'eau. Par conséquent, le coefficient de performance est réduit dans le cas des pompes à chaleur.

■ Dans la salle de bains et les WC, aucun air pulsé n'est généralement acheminé. Dans les bâtiments dotés d'un chauffage à air pulsé, ces pièces doivent donc avoir une disposition centrale.

#### Poêle avec distribution libre de chaleur

Un poêle central (p. ex. poêle en faïence ou à granulés) est généralement disposé dans le salon. La chaleur est distribuée par rayonnement et par circulation naturelle de l'air. Dans les maisons basse énergie, le poêle peut être utilisé pour chauffer toute

la maison. Des mesures constructives et fonctionnelles doivent alors garantir la répartition de la chaleur dans toutes les pièces.

Les poêles fixes peuvent être conçus de manière à présenter des surfaces de chauffe orientées vers différentes pièces. Dans les systèmes appelés poêles satellites, les surfaces de chauffe sont disposées sur deux étages. Les avantages de cette solution sont les suivants:

■ Les poêles à bois sont des générateurs de chaleur très appréciés.

■ Installation simple.

■ Installation protégée du gel.

Les inconvénients ou facteurs limitants sont les suivants:

■ Les différences de température spatiales et temporelles, ainsi que le travail de maintenance, doivent être acceptés par les utilisateurs.

■ Pour la garantir la distribution de la chaleur, les portes des pièces doivent souvent rester ouvertes.

Tableau 10: Recommandations relatives à la combinaison des standards d'isolation et des installations de chauffage.

Standard d'isolation thermique → Distribution de chaleur	Modernisation $Q_h = 83 \text{ kWh/m}^2$	Construction nouvelle Minergie $Q_h = 42 \text{ kWh/m}^2$	Construction nouvelle Minergie-P $Q_h = 21 \text{ kWh/m}^2$
Chauffage à eau à l'aide de corps de chauffe	Approprié pour le chauffage à distance ainsi que les chauffages à bois. En cas de départ > 50 °C, non approprié pour les PAC.	Dimensionnement pour départ ≤ 45 °C. Approprié pour les chauffages à bois, le chauffage à distance et les PAC eau glycolée-eau.	Dimensionnement pour départ ≤ 40 °C. Approprié pour les chauffages à bois et les PAC eau glycolée-eau.
Chauffage au sol ou TABS	Pour départ ≤ 50 °C approprié pour les chauffages à bois, le chauffage à distance et les PAC à sondes géothermiques, pour les grands bâtiments éventuellement pompes à chaleur et chaudières de couverture des besoins de pointe.	Dimensionnement pour départ ≤ 35 °C. Bien approprié pour tous les générateurs de chaleur.	Dimensionnement pour départ ≤ 30 °C. Parfaitement approprié pour tous les générateurs de chaleur.
Chauffage à air pulsé	Non approprié	Non approprié	Approprié pour une puissance de chauffage maximale de 10 W/m <sup>2</sup> . En combinaison avec une pompe à chaleur raccordée à l'air extrait pour le chauffage et la production d'eau chaude.
Poêle avec distribution libre de la chaleur	Non recommandé en raison de grandes différences de température et d'un travail de maintenance important.	Non approprié pour les immeubles d'habitation. En combinaison avec une installation solaire thermique, approprié pour les maisons familiales compactes.	Non approprié pour les immeubles d'habitation. En combinaison avec une installation solaire thermique, approprié pour les maisons familiales.

### Systèmes mixtes

Dans les installations destinées aux bâtiments ayant un faible besoin en chaleur de chauffage, on peut utiliser des générateurs de chaleur qui distribuent une partie de la chaleur produite vers un chauffage à eau. Il s'agit par exemple d'appareils compacts à pompes à chaleur avec distribution combinée de chaleur à l'air et à l'eau, ou de poêles dotés d'une technologie d'absorbeur.

Dans le cas de la technologie d'absorbeur, la masse d'accumulation du poêle est entourée d'absorbeurs (même construction que les capteurs solaires). Ceux-ci permettent de distribuer jusqu'à 70 % de la chaleur à un système de conduction d'eau. Un avantage de la technologie d'absorbeur réside dans l'intégration hydraulique simple.

### Combinaison des standards énergétiques et des systèmes de chauffage

Le tableau 10 illustre les types d'approvisionnement en chaleur recommandés pour les différentes combinaisons de standards d'isolation thermique et de distribution de chaleur. Commentaire relatif au tableau 10:

■ Dans la variante de la rénovation, l'objectif d'un indice énergétique pondéré de 60 kWh/m<sup>2</sup> ne peut être atteint que difficilement avec toutes les variantes. En d'autres termes, cela signifie que le besoin en énergie de chauffage de 83 kWh/m<sup>2</sup> se situe à la limite supérieure.

■ Dans les variantes avec chauffage à bois, une installation solaire thermique doit être utilisée pour couvrir au moins 60 % du besoin annuel en chaleur pour la production d'eau chaude. Cela est dû au fait que le chauffage à bois doit être désactivé en été, car le rendement et les émissions de polluants des chauffages à bois en charge partielle sont mauvais. S'il y a suffisamment de place pour un grand accumulateur, l'installation solaire doit être conçue de manière à couvrir en supplément 10 à 20 % du besoin en chaleur de chauffage. Si aucune installation solaire thermique n'est possible, on peut également utiliser pour la production d'eau chaude une pompe à chaleur de production d'eau

chaude séparée (chauffe-eau à PAC ou PAC raccordée à l'air repris).

■ Dans la variante Minergie-P, le besoin en chaleur est si faible que la question d'un raccordement à un réseau de chauffage à distance éventuel doit être bien réfléchi. Dans les grands bâtiments urbains, la densité de consommation de chaleur peut éventuellement être suffisamment élevée pour qu'un raccordement s'avère une solution économique. Dans les petits objets, une production de chaleur individuelle est plus appropriée.

### Basses températures de départ versus effet d'autorégulation de la puissance de chauffage

Une basse température de départ est la clé d'un approvisionnement en chaleur efficient. De plus, et cela est au moins aussi important, des températures de départ inférieures ou égales à 30 °C entraînent automatiquement un effet d'autorégulation. La température de surface du chauffage au sol est alors supérieure de seulement 2 K à la température ambiante. Lorsque, par exemple en raison du rayonnement solaire,

Distance de	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
Puissance de chauffage spécifique	35 W/m <sup>2</sup>	33 W/m <sup>2</sup>	30 W/m <sup>2</sup>	28 W/m <sup>2</sup>

Élément de construction	Surface A m <sup>2</sup>	Valeur U W/(m <sup>2</sup> K)	Puissance Φ W	Puissance relative
Murs extérieurs et toit	37,0	0,20	207	20 %
Fenêtres	21,6	1,30	786	74 %
Pertes par la ventilation	—	—	67	6 %
Somme			1061	100 %

Besoin spécifique en puissance de chauffage 35 W/m<sup>2</sup>

### Points supplémentaires pour des températures de départ maximales de 30 °C

- Besoin maximal en puissance de chauffage (par rapport à la surface de sol utile): 30 W/m<sup>2</sup>
- Eventuellement optimiser la valeur U des fenêtres.
- Eventuellement, pour les fenêtres non orientées vers le sud, vérifier les grandeurs (p. ex. balustrades dans les chambres à coucher)

*Tableau 11: Puissance de chauffage spécifique typique (par rapport à la surface au sol) d'un chauffage au sol pour un revêtement parquet. Température de départ 30 °C, température de retour 26 °C.*

*Tableau 12: Exemple du salon d'un logement en attique.*

la température ambiante augmente de 20 à 22 °C, le chauffage au sol ne distribue plus de chaleur dans la pièce. Etant donné que cette adaptation s'effectue sans aucun dispositif de régulation technique, on parle d'effet d'autorégulation.

Les prescriptions énergétiques n'exigent, pour des températures de départ  $\leq 30$  °C, aucune régulation technique des pièces individuelles. Cela permet de réaliser des installations simples et fiables sur le plan hydraulique.

### Puissance de chauffage spécifique

Pour obtenir des distances de pose praticables, le besoin en puissance de chauffage spécifique, dans la pièce la moins favorable, ne doit pas dépasser 30 W/m<sup>2</sup>. Pour les petites surfaces, telles que les salles de bain, des distances de pose de 10 cm ou moins peuvent éventuellement être réalisées.

### Exemple

Un logement en attique d'un immeuble d'habitation Minergie possède un salon de 30 m<sup>2</sup> avec des données conformes au tableau 12. Malgré de basses valeurs U du mur et du toit, la charge thermique spécifique est trop élevée pour atteindre une température de départ de 30 °C. Cela est dû aux grandes fenêtres avec double vitrage. En présence de bonnes fenêtres avec triple vitrage, une valeur U des fenêtres de 0,9 W/m<sup>2</sup> pourrait être obtenue. Cela ferait baisser le besoin en puissance de chauffage spécifique à 27 W/m<sup>2</sup> et la température de départ requise de 30 °C serait réalisable sans problème. Outre la réduction du besoin en puissance de chauffage, cette mesure augmenterait le confort thermique. Etant donné que les triples vitrages actuels atteignent des valeurs g de 0,6, il ne serait en outre pas nécessaire de prendre en compte un mauvais bilan énergétique du vitrage au sud.

### Eau chaude

#### Minimiser les pertes de distribution

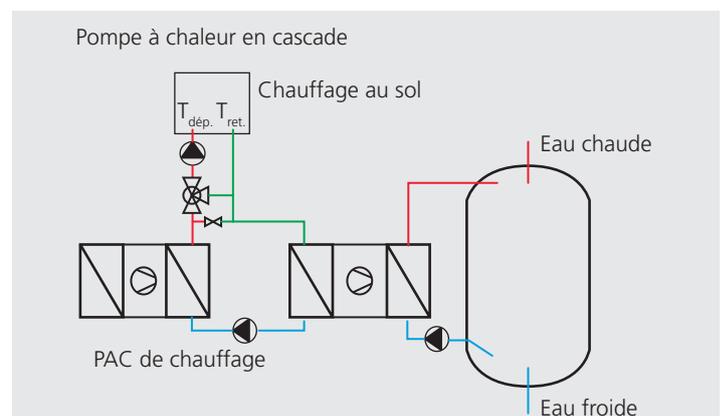
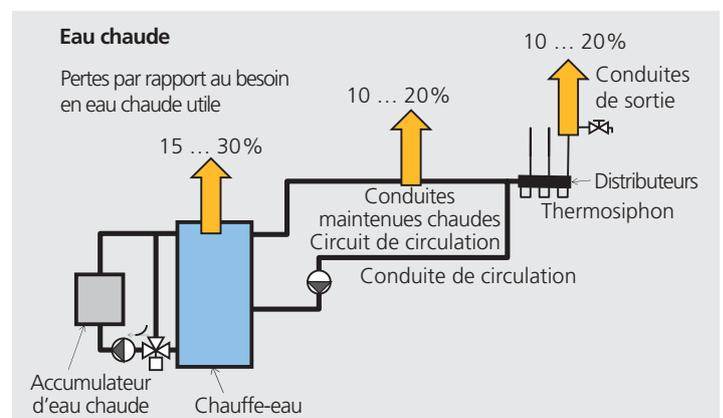
Les déperditions thermiques des installations de production d'eau chaude peuvent être comprises entre environ 20 et 60 %. Une des principales raisons de cette large

plage réside dans les pertes de distribution parfois élevées. Dans les bâtiments d'habitation basse énergie, tels que Minergie-P, le besoin en eau chaude est à peu près équivalent au besoin en chauffage. Les pertes liées à l'eau chaude ont, dans ces bâtiments, une influence au moins aussi importante que les ponts thermiques. Cela signifie également qu'il convient d'accorder, lors de la planification et de l'exécution, au moins autant d'attention aux pertes liées à l'eau chaude qu'aux ponts thermiques. C'est notamment dans la première phase de planification qu'une grande vigilance est de mise. Ces pertes peuvent être maintenues à un faible niveau grâce aux mesures suivantes:

- Les points de soutirage doivent être concentrés autour des colonnes montantes.
- Dans les maisons familiales, il convient de renoncer à une circulation ou à un ruban chauffant.
- Dans les immeubles d'habitation, il convient de privilégier les systèmes de circulation aux rubans chauffants électriques.

*Illustration 48: Pertes des installations de production d'eau chaude.*

*Illustration 49: Schéma d'une PAC raccordée au retour.*



### Approvisionnement en eau chaude: centralisé ou décentralisé?

Dans les immeubles d'habitation, il convient de déterminer si la production et l'accumulation d'eau chaude doivent s'effectuer de façon centrale, ou de façon décentralisée dans les différents logements. Dans le cas des installations centrales, conformément aux normes, l'eau doit être chauffée à 60°C dans l'accumulateur. Dans le cas des chauffe-eau propres aux logements, des températures plus basses, par exemple 50°C, sont admissibles. Une production d'eau chaude centrale doit être choisie dans le cas d'une production d'eau chaude solaire ou d'un raccordement au chauffage à distance.

Les chauffe-eau ne doivent être chauffés que très partiellement par un corps de chauffe électrique direct. Une production d'eau chaude décentralisée efficace est possible avec des pompes à chaleur raccordées sur le retour ou sur l'air repris. Les pompes à chaleur raccordées sur l'air repris sont de préférence utilisées en présence d'installations de reprise d'air simples. Il existe toutefois également des appareils qui peuvent être utilisés avec des aérations douces (p. ex. installations avec air pulsé et air repris). Les pompes à chaleur raccordées sur l'air repris atteignent des coefficients de performance annuels de 2,3 à 3,0. Les pompes à chaleur raccordées sur le retour utilisent le retour du chauffage du logement comme source de chaleur. Le bénéfice énergétique de ce système dépend principalement de la production de chaleur du chauf-

fage. Les pompes à chaleur raccordées au retour ne peuvent se justifier en termes d'efficacité énergétique que si la pompe à chaleur de chauffage atteint un coefficient de performance annuel d'au moins 4,5.

### Production d'eau chaude solaire thermique ou solaire électrique?

Etant donné la baisse constante du prix des cellules photovoltaïques, on peut se demander dans quelle mesure une production d'eau chaude solaire thermique est intéressante lorsque l'on utilise une pompe à chaleur pour le chauffage du bâtiment (comme dans 70 % des constructions nouvelles). Dans l'exemple d'un immeuble d'habitation, deux variantes sont comparées:

- Solaire thermique: production de 60 % de l'eau chaude à l'aide d'une installation solaire thermique. La pompe à chaleur chauffe le bâtiment et réchauffe l'eau chaude restante.

- Solaire électrique: la pompe à chaleur prend en charge la totalité de l'approvisionnement en chaleur pour le chauffage et l'eau chaude.

Pour la comparaison, on suppose:

- que le besoin en chaleur pour l'eau chaude correspond à l'utilisation standard selon la norme SIA 380/1 de 21 kWh/m<sup>2</sup>.

- que le coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur pour la production d'eau chaude est d'environ 2,8.

- que la comparaison est réalisée pour un logement avec une surface de référence énergétique de 100 m<sup>2</sup>.

Tableau 13: Comparaison d'une production d'eau chaude solaire thermique et solaire électrique, pour un logement de 4 pièces (100 m<sup>2</sup>) dans un immeuble d'habitation.

Variante	Solaire thermique	Solaire électrique
Rendement solaire spécifique	450 kWh d'énergie thermique par m <sup>2</sup> de capteur (par an)	800 kWh d'énergie électrique par kW de puissance installée (par an)
Capteurs ou panneaux installés	2,8 m <sup>2</sup>	0,56 kW <sub>p</sub> (env. 4 m <sup>2</sup> )
Rendement solaire absolu	1250 kWh thermique	466 kWh électrique
Production de chaleur pour l'eau chaude		
■ Installation solaire	1250 kWh	0 kWh
■ Pompe à chaleur	833 kWh	2083 kWh
Energie électrique		
■ Consommation de la pompe à chaleur	298 kWh	744 kWh
■ Production du photovoltaïque	0 kWh	446 kWh

■ que la consommation d'électricité nette est identique dans les deux variantes.

Avec un prix du PV élevé pour les conditions actuelles de 4000 francs par kWc, on obtient dans cet exemple un investissement de seulement 2000 à 2500 francs par logement (SRE 100 m<sup>2</sup>). Même dans le cas d'un grand immeuble d'habitation, il serait difficile de réaliser une production d'eau chaude solaire thermique à ce prix. Les autres avantages de la variante solaire électrique sont les suivants:

■ Installation de chauffage simple avec régulation simple.

■ Faible encombrement: accumulateur d'eau chaude plus petit.

■ Le système peut également être réalisé à l'aide d'une production d'eau chaude décentralisée (pompe à chaleur raccordée sur le retour ou pompe à chaleur raccordée sur l'air repris).

■ Dans les rénovations notamment, le câblage électrique est plus simple à réaliser que des conduites d'eau.

#### Points supplémentaires relatifs aux concepts globaux

Dans le cas des concepts d'approvisionnement en chaleur, les points suivants doivent être étudiés:

**Limitation à deux générateurs de chaleur:** En présence de plus de deux générateurs de chaleur, les installations de petite et moyenne taille deviennent si complexes qu'il est souvent impossible de les réguler et de les exploiter de façon optimale.

**Pompes à chaleur air-eau avec régulation de puissance:** Les coefficients de performance annuels des pompes à chaleur air-eau ont pu être considérablement améliorés grâce à la régulation de puissance (p.ex. technique de l'inverseur) et atteignent, dans les bâtiments d'habitation, pour une exploitation sur toute l'année (chauffage et eau chaude), des valeurs de 3,0 à 4,0. Les pompes à chaleur à sondes géothermiques sont certes encore plus efficaces mais, pour les petits bâtiments ayant de faibles températures de départ, l'économie d'énergie est souvent trop faible pour justifier les investissements supplémentaires.

#### Pompes à chaleur à sondes géothermiques en présence d'un besoin de refroidissement:

Les pompes à chaleur à sondes géothermiques permettent, pour une exploitation sur toute l'année, d'atteindre des coefficients de performance annuels de 3,5 à 5,0. En présence d'un besoin de refroidissement, les pompes à chaleur à sondes géothermiques sont à privilégier même pour les petits bâtiments, car la sonde géothermique permet en été un refroidissement bon marché et très efficace.

#### Combinaison des pompes à chaleur avec le photovoltaïque:

Lorsque, dans le cas des immeubles dotés de chauffages à pompes à chaleur, l'énergie solaire doit également être utilisée, les systèmes photovoltaïques permettent des solutions plus simples et plus fiables que la combinaison avec des installations solaires thermiques.

#### Combinaison du bois avec l'énergie solaire thermique:

Les chaudières à bois ou à granulés sont parfaitement appropriées à une exploitation hivernale. Toutefois, lorsqu'elles doivent être utilisées en été pour la production d'eau chaude, le mode de charge partielle entraîne souvent une diminution nette du rendement et des émissions de polluants trop élevées. C'est pourquoi il est intéressant de combiner les chaudières à bois et à granulés avec des installations solaires thermiques qui couvrent au moins 60 % du besoin annuel en eau chaude.

#### Analyse de l'énergie auxiliaire:

La consommation électrique des circulateurs, ventilateurs de brûleurs, dispositifs d'acheminement du combustible, commandes et régulations est souvent comprise entre 1 et 5 % de la chaleur produite. Si l'on prend en compte le facteur de pondération de l'énergie électrique, l'énergie auxiliaire peut ainsi devenir un consommateur d'énergie primaire important. Lors du renouvellement du système de production de chaleur dans des bâtiments existants, il est généralement intéressant de remplacer les anciens circulateurs. La puissance électrique installée peut souvent être réduite de 50 % et plus. En outre, les régulations en fonction du besoin permettent de réduire les temps de fonctionnement.

## Thèmes choisis

### Chauffage dans la salle de bain

Plus la température de départ est basse, plus une pompe à chaleur est efficace. En raison de la surface au sol limitée, la salle de bain détermine souvent la température de dimensionnement du chauffage au sol.

En raison d'un tableau quelque peu malencontreux dans le cahier technique SIA 2024:2006, on entend souvent qu'une température de 24°C est requise dans la salle de bain. Il suffit en réalité de chauffer une salle de bain inutilisée à une température ambiante de 22°C. Lorsqu'elle est utilisée (douche, bain), la température ambiante augmente immédiatement de quelques degrés, p. ex. jusqu'à environ 25°C. Bilan: les salles de bain et les douches dans les logements peuvent être dimensionnées à la même température que les pièces principales. Cela est également confirmé dans un rectificatif de la norme SIA 384.201.

En outre, il est autorisé d'utiliser dans les salles de bain des chauffages électriques (radiateurs chauffe-serviettes) dans la mesure où ceux-ci sont utilisés uniquement à des fins de confort et non pour couvrir le besoin en chauffage. Pour plus de détails à ce sujet, reportez-vous à l'aide à l'exécution EN-3 du MoPEC 2008.

### Facteur de confort revêtement de sol

En présence de revêtements de sol comprenant de la céramique et des dalles de pierre, la chaleur du corps transmise via les pieds est plus importante qu'avec une moquette ou un parquet. La caractéristique physique correspondante est l'indice de pénétration de chaleur. En présence d'un indice de pénétration de chaleur élevé, les pieds refroidissent rapidement. Auparavant, cela pouvait être compensé en hiver par le chauffage au sol. Avec les températures de départ admissibles aujourd'hui, les températures de surface du sol sont toutefois au maximum d'environ 25°C, et sont ainsi inférieures à la température de la plante du pied. En d'autres termes, même pendant le fonctionnement du chauffage au sol, la chaleur s'écoule du pied vers le sol. En outre, dans l'intersaison et en dehors de la

saison de chauffe, la température de surface du sol baisse. Dans les pièces d'habitation, des revêtements de sol en céramique peuvent entraîner une température ambiante ressentie plus basse que par exemple du parquet, même si une température ambiante identique est mesurée. On peut donc en déduire que dans les bâtiments d'habitation dotés de revêtements de sol en céramique, dans les pièces d'utilisation principales (notamment dans le salon), le chauffage doit parfois être activé plus tôt dans l'intersaison que dans les logements équipés de parquet ou de moquette.

## Chauffages à bois dans les logements

Les cheminées et poêles à bois sont surtout appréciés pour leur fonction d'agrément. Dans les bâtiments bien isolés, ils peuvent également être utilisés pour l'assistance au chauffage ou le chauffage de l'ensemble de la maison. Indépendamment du domaine d'utilisation, quelques principes doivent toutefois être respectés.

### Rapports de pression

Avec les nouveaux chauffages à bois, l'air de combustion doit être conduit directement de l'extérieur jusque dans la chambre de combustion via un conduit séparé. En cas de remplacement d'un chauffage à bois, on ne peut renoncer à ce conduit que s'il est garanti que sur toute la durée d'utilisation, l'apport d'air sera suffisant.

La présence d'un conduit d'air de combustion ne rend pas un chauffage à bois indépendant de l'air ambiant. La notion de «indépendant de l'air ambiant» signifie que le système de chauffage, en présence d'une dépression dans la pièce, n'est pas affecté et qu'aucune fumée ne sort du foyer. Un chauffage à bois est ainsi indépendant de l'air ambiant uniquement lorsqu'il est certifié par un organisme de contrôle agréé indépendant. Malheureusement, cela n'est pas toujours connu même du côté des fournisseurs spécialisés et des installateurs, de sorte que même les spécialistes parlent parfois à mauvais escient de chauffages à bois indépendants de l'air ambiant pour peu

qu'une arrivée d'air de combustion soit disponible. Sur le marché, on trouve des poêles à bois et à granulés indépendants de l'air ambiant. S'il n'y a aucun risque de dépression, ils ne doivent pas obligatoirement respecter les exigences relatives aux modules certifiés. La norme SIA 384/1:2009 définit qu'aucun dispositif technique de ventilation ne doit causer de dépression excédant les valeurs suivantes:

- Chauffages à bois dépendants de l'air ambiant (poêles à bois et à granulés traditionnels) maximum 4 Pa

- Chauffages à bois indépendants de l'air ambiant (modules spécialement certifiés) maximum 8 Pa

- Une dépression non admissible peut être empêchée par les mesures suivantes:

- Fermeture des dispositifs de reprise d'air (hotte aspirante, reprise d'air des WC, aspirateur central etc.) via un interrupteur à contact de fenêtre. De tels interrupteurs sont également appelés «contacts Reed».

- Dispositif d'apport d'air qui s'ouvre et se ferme à l'aide d'entraînements électriques.

- Surveillance contrôlée de la dépression (selon fournisseurs des modules chauffage).

- En présence d'aérations douces, les appareils utilisés doivent être conçus pour fonctionner avec des chauffages (pas de protection contre le gel via commande de ventilateur, surveillance du débit).

### Puissance de chauffage

Un poêle à bois trop grand peut surchauffer une pièce. Il est donc recommandé que la puissance de diffusion de chaleur vers la pièce soit au maximum trois fois supérieure au besoin en puissance de chauffage. La pièce concernée peut comprendre toute la surface par des portes. Dans le cas des nouveaux plans de logements, il s'agit généralement du salon, de la salle à manger, de la cuisine et du couloir. Dans les constructions nouvelles, cela signifie toutefois que la puissance nominale du chauffage à bois est de maximum 8 kW, dans les constructions Minergie-P elle ne doit pas dépasser 4 kW. Les cheminées et poêles suédois, notamment, émettent parfois des puissances de chauffage nettement plus élevées, pouvant atteindre plus de 20 kW. Outre une puissance

de combustion plus faible, une masse d'accumulation élevée entraîne également une puissance de diffusion plus faible. La puissance de diffusion vers la pièce peut être réduite à l'aide de satellites ou d'une technologie d'absorbeur.

### Pas de feux ouverts

Les feux ouverts ne sont plus admis dans les logements, principalement parce que la qualité de combustion est moins bonne et ainsi les émissions de polluants plus élevées que dans les chambres de combustion fermées. Étant donné que la combustion est bien moins contrôlée que dans les chambres de combustion fermées, le rendement baisse également. De plus, l'étanchéité à l'air du logement est nettement réduite. Les pertes par la ventilation augmentent alors considérablement.

### Module Minergie

Le module Minergie Chauffage à bois comprend non seulement les poêles à bois, mais également le conduit des gaz de fumée et l'arrivée d'air de combustion. En outre, des exigences élevées sont posées en termes de qualité de la planification et de l'exécution. L'installation est donc conforme aux principes susmentionnés.

### Stockage du bois et des granulés

En ce qui concerne les réservoirs de combustibles, les prescriptions de l'Association suisse des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI) ainsi que les éventuelles prescriptions locales doivent être respectées. Le réservoir de combustible doit se trouver le plus près possible du chauffage à bois afin que l'effort de manutention reste faible. En cas de systèmes d'assistance au chauffage ou de chauffages destinés à l'ensemble de l'habitation, une réserve de plusieurs jours doit pouvoir être stockée à proximité immédiate du poêle.

### Sources

- [1] Von Euw, Alimpic, Hildebrand: Technique du bâtiment, planification intégrale des systèmes. Faktor Verlag, Zurich 2012

- [2] Eicher, H.P., et al.: Energies renouvelables, Faktor Verlag, Zurich 2013

*Illustration 50: Module Minergie Poêles. Source: Tonwerk AG*





# Ventilation, climatisation et refroidissement

Heinrich Huber **Qualité de l'air**

## Pollution de l'air ambiant et débits volumiques d'air

Les normes SIA et les standards de construction facultatifs s'accordent sur le fait qu'une enveloppe de bâtiment doit par principe être étanche à l'air. Par conséquent, il convient d'élaborer pour chaque bâtiment un concept de ventilation. La ventilation a pour objectif premier d'évacuer les substances qui polluent l'air dans les différentes pièces:

- Odeurs des personnes
- Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) provenant principalement des personnes
- Vapeur d'eau
- Emissions des matériaux de construction, des meubles et des équipements

Dans les pièces dans lesquelles les personnes représentent la pollution de l'air ambiant la plus importante, la teneur en CO<sub>2</sub> est une grandeur fiable et facilement mesurable pour l'évaluation de la qualité ressentie de l'air ambiant. Dans les immeubles d'habitation et de bureaux, l'objectif est généralement d'atteindre une teneur en CO<sub>2</sub> comprise entre 950 et 1300 ppm. Ces valeurs correspondent, conformément à SIA 382/2, à une qualité moyenne de l'air ambiant.

Le CO<sub>2</sub> n'a pas d'odeur et, jusqu'à une concentration de 5000 ppm, n'est pas dangereux pour la santé. Il sert uniquement d'indicateur pour les odeurs émises par les personnes. Ces odeurs ne peuvent pas être précisément mesurées et ne peuvent donc pas être utilisées comme grandeurs de référence dans la normalisation. Par contre, une régulation de la qualité de l'air ambiant à l'aide de capteurs de gaz mixtes (qui détectent la somme de toutes les substances odorantes) dans des pièces fortement polluées par des odeurs peut s'avérer pertinente. Les débits volumiques d'air doivent être dimensionnés et régulés selon l'occupation des personnes. Pour obtenir la qualité moyenne de l'air ambiant mentionnée

ci-avant, les valeurs suivantes sont requises, conformément à SIA 382/1:

- Bureau: 36 m<sup>3</sup>/h par personne
- Salle de classe et magasin: 30 m<sup>3</sup>/h par personne

Dans le cas des logements, l'occupation des personnes ne peut pas être précisément planifiée. C'est pourquoi on utilise comme grandeur auxiliaire le nombre de pièces. Les valeurs indicatives utilisées sont un débit volumique d'air de 30 m<sup>3</sup>/heure pour chaque chambre à coucher. Un dimensionnement différencié s'effectue selon le cahier technique SIA 2023.

## Hygiène

L'air fourni acheminé dans la pièce doit présenter sur le plan hygiénique une qualité au moins égale à celle de l'air extérieur. Pour atteindre cet objectif d'hygiène général, les principes suivants doivent être respectés:

- Le captage de l'air extérieur doit, pour des installations de grande taille, être positionné au moins à 3 m au-dessus du sol. Pour les installations plus petites, p.ex. pour les maisons familiales, la hauteur peut être réduite à 1,5 à minimum 0,7 m au-dessus du sol (pour plus de détails, voir le cahier technique SIA 2023). Un captage de l'air extérieur à hauteur du sol ou même dans un saut-de-loup doit aujourd'hui être considéré comme un défaut.

- L'air extérieur doit être filtré à l'aide de filtres de classe F7. La charge de particules qui parvient dans l'installation avec cette qualité de filtre est tellement faible qu'un nettoyage des conduits d'air fourni tous les 10 à 20 ans au maximum est suffisant. Les conduits d'air repris sont soumis à une charge de particules plus importante et doivent donc être nettoyés environ tous les 5 à 10 ans.

- Tous les composants d'une installation de ventilation doivent être accessibles pour une inspection et un nettoyage. En présence de conduits bétonnés, il convient d'intégrer des accès de révision, p.ex. dans des caissons de distribution.

■ L'eau stagnante dans les installations de ventilation présente un risque sur le plan hygiénique. Les installations sans humidification de l'air sont donc, sur le plan technique, nettement moins problématiques en termes d'hygiène que les installations avec humidification. Toutefois, même avec des installations sans humidification, il convient de veiller à ce que de l'eau ne s'infilte pas dans la partie air fourni de l'installation, p. ex. par le captage d'air extérieur ou le puits canadien.

■ Les contrôles d'hygiène et inspections doivent, pour les installations moyennes et grandes sans humidification, être réalisés tous les 3 ans. Pour les installations avec humidification, l'intervalle s'élève à 2 ans. Pour les petites installations sans humidification, p. ex. les aérations douces dans les maisons familiales, l'intervalle peut même être augmenté jusqu'à environ 6 ans. Toutes les installations doivent être nettoyées selon le besoin. En d'autres termes, c'est à l'occasion d'une inspection que l'on décide quelles parties de l'installation doivent être nettoyées. Le plus grand risque d'encrassement survient pendant la phase de construction. C'est pourquoi on recommande pour tous les types d'installations de ventilation de réaliser une première inspection après le montage. Le contrat d'usine doit donc définir comment les coûts de l'inspection et des éventuels nettoyages seront réglés.

### Aspects particuliers des installations de reprise d'air

Pour les passages d'air neuf des installations de reprise, le filtre F7 n'est pas nécessaire si la qualité de l'air extérieur est bonne.

*Illustration 51: Dispositif d'inspection et de nettoyage: caméra IR et tête de nettoyage à air comprimé sur un flexible. Moniteur pour affichage en ligne (SM Heag).*



*Illustration 52: Caméra IR et tête de nettoyage à air comprimé en cours d'utilisation.*



Conformément à SIA 382/1, le filtre F7 n'est pas obligatoire seulement si la valeur moyenne annuelle des immissions de particules fines PM10 est inférieure à 20 µg/m³. Les valeurs d'immissions figurent sur les sites Internet des services cantonaux spécialisés de l'environnement ou de l'air\* et de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Les conduits des installations de reprise d'air s'encrassent autant que les conduits de reprise d'air des aérations douces. En d'autres termes, même dans les installations de reprise d'air, ils doivent être nettoyés tous les 5 à 10 ans environ. En outre, tous les passages d'air extérieur doivent être inspectés au moins tous les ans. L'entretien des installations de reprise d'air est ainsi à peine moins exigeant que celui des aérations douces.

### Humidité de l'air ambiant

Dans les logements, 1,5 à 3 litres d'eau par personne s'évaporent chaque jour. Cette quantité de vapeur doit être évacuée par la ventilation, afin d'éviter tout dommage sur la construction et toute moisissure.

Du point de vue du confort thermique, l'objectif est d'atteindre, conformément aux normes SIA, une humidité relative de l'air ambiant comprise entre 30 et 60 % d'humidité relative. Des valeurs brièvement inférieures ne sont pas problématiques. Dans les logements, bureaux et salles de classe traditionnels, aucun système de ventilation ne permet de garantir le respect des valeurs limites d'humidité, car l'influence des utilisateurs est trop importante. En présence d'aérations douces notamment, le problème d'une humidité insuffisante de l'air ambiant se pose souvent. Les mesures pour y remédier sont les suivantes:

- Le débit d'air extérieur ne doit pas être trop important. Les installations de ventilation ne doivent pas être surdimensionnées. Dans tous les types de systèmes de ventilation, les débits volumiques d'air doivent correspondre au besoin hygiénique.
- En présence de basses températures extérieures, les débits d'air extérieur doivent être réduits. Avec des installations mécaniques, cela revient à choisir une allure plus réduite.
- Ne pas surchauffer les pièces. Lorsqu'une pièce est trop chaude de 2 K, le taux d'hu-

\* p. ex.

[www.ostluft.ch](http://www.ostluft.ch) ou  
[www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)

midité relative de l'air baisse d'environ 5 %.

■ On peut éventuellement utiliser des appareils de ventilation avec récupération d'humidité. Ils ne sont toutefois réellement avantageux qu'avec des installations dimensionnées et exploitées de façon optimale.

■ Avec de petites installations de ventilation, telles que p. ex. les aérations douces pour les logements individuels, il convient, pour des raisons d'hygiène, de n'utiliser aucun système d'humidification active de l'air fourni. Pour les grandes installations avec humidification de l'air fourni, des exigences élevées en matière d'hygiène s'appliquent.

■ Avec des utilisations particulières, p. ex. des chambres à coucher destinées aux asthmatiques, des humidificateurs d'air peuvent être brièvement utilisés. Là aussi cependant, les précautions sont requises sur le plan hygiénique.

■ Des humidités ambiantes trop élevées sont plus problématiques, sur le plan hygiénique, que des valeurs trop basses. Chez les allergiques aux acariens notamment, il convient de veiller à ce que l'humidité de l'air, en hiver, ne dépasse pas 50 % d'humidité relative.

### Parquet

L'humidification de l'air fourni est requise dans des locaux très secs pour améliorer le confort des utilisateurs, et non en raison de matériaux de construction spéciaux. Dans ce contexte, il convient d'évoquer le parquet. Un bon revêtement en parquet, approprié au climat suisse, supporte une humidité ambiante de 30 % ainsi que des valeurs brièvement inférieures.

### «Murs respirants»

La diffusion de vapeur d'eau à travers les constructions de mur et de toiture ne permet d'évacuer qu'une fraction de l'humidité produite dans la pièce. Même avec les constructions ouvertes à la diffusion, dotées de murs à pores ouverts ou «respirants», un débit d'air extérieur suffisant est donc nécessaire. Les surfaces à pores ouverts peuvent toutefois absorber l'humidité: En présence d'humidités ambiantes élevées, ils stockent la vapeur d'eau, et la

restituent ensuite dans la pièce en présence de faibles taux d'humidité. Selon le type et la taille de ces surfaces, celles-ci peuvent contribuer à remédier aux faibles taux d'humidité ambiante.

### Climatisation et refroidissement

Jusque dans les années 1980, les charges de refroidissement étaient principalement évacuées via la ventilation. Les débits de renouvellement d'air importants que cela nécessitait généraient parfois des phénomènes de courant d'air. L'opinion générale actuelle en Suisse est que les fonctions de ventilation et de refroidissement doivent être séparées. Une installation de ventilation doit être dimensionnée de manière à évacuer les pollutions de l'air ambiant. C'est en général le taux d'occupation des personnes qui détermine le dimensionnement. Cela signifie également qu'avec les nouvelles installations de ventilation, aucun mode de recyclage de l'air n'est prévu. Par rapport aux anciennes installations de climatisation, on obtient des débits volumiques d'air environ 2 à 4 fois moins importants.

Pour les bâtiments ayant de faibles charges thermiques et des fenêtres pouvant s'ouvrir, le refroidissement s'effectue traditionnellement via une aération par les fenêtres, la nuit ou à l'aube. Avec des fenêtres qui ne peuvent pas s'ouvrir, ou lorsqu'une détermination des besoins selon SIA 180 montre qu'un refroidissement est nécessaire, celui-ci doit s'effectuer via des systèmes de conduction d'eau. Dans le cas de ce refroidissement appelé statique, on peut souvent utiliser les mêmes éléments de construction que pour le chauffage ambiant: des dalles thermoactives (TABS) ou, en présence de charges de refroidissement très faibles, des chauffages au sol. Une autre solution consiste à utiliser des convecteurs qui, à l'aide de petits ventilateurs très efficaces, sont capables de céder ou d'évacuer la chaleur avec de faibles différences de température (entre l'eau et l'air ambiant). On peut également envisager l'utilisation de plafonds rafraîchissants. Ces éléments peuvent éventuellement être utilisés pour le chauffage ambiant, ou en soutien de celui-ci.

### Il ne s'agit pas d'empêcher le refroidissement, mais de le rendre efficient

Les anciennes installations de climatisation ont la réputation justifiée d'être de véritables gouffres énergétiques. Aujourd'hui, il est toutefois possible de réaliser des systèmes de refroidissement ambiant très efficaces. Ceci, à la condition que les intrants thermiques de l'extérieur soient minimisés par une protection solaire efficace. En outre, malgré une bonne technique d'installation, les charges internes doivent rester faibles. Comme pour les installations de chauffage, la solution d'un refroidissement efficient réside dans la température de l'eau: plus la température de l'eau froide (du refroidissement ambiant) est proche de la température ambiante, plus le coefficient de performance du système de production de froid est élevé et plus un refroidissement passif est possible.

Le tableau 14 montre des coefficients de performance typiques de générateurs de froid pour le refroidissement ambiant. Les appareils auxiliaires et le refroidissement de retour sont pris en compte.

Les très bonnes valeurs des nouveaux systèmes ne peuvent être atteintes que si le refroidissement est pris en compte au début

du processus de planification. Si l'on décide seulement dans une phase de planification ultérieure, ou même dans la phase d'exécution, de réaliser un refroidissement, il n'est plus possible de mettre en œuvre des concepts optimisés sur le plan énergétique. Dans le cas d'installations ultérieures, il ne reste que des appareils split. Les très bons appareils split atteignent certes également des coefficients de performance annuels de 4 à 5, mais la consommation d'énergie est 2 à 3 fois supérieure à celle d'une solution optimale. En outre, il faut alors faire des compromis en termes de confort et d'esthétique. En conclusion: Dans les constructions nouvelles, il ne s'agit pas d'éviter de mettre en place un système de refroidissement, mais plutôt de rechercher des solutions optimales dès le début. Les lois actuelles sur l'énergie vont également dans ce sens.

## Méthodes de ventilation et systèmes

### Aération par les fenêtres

L'aération naturelle est complexe car elle dépend non seulement de la géométrie (entre autres dimension et position des fenêtres) mais aussi des conditions clima-

Tableau 14: Coefficients de performance de générateurs de froid.  
\* Dép.: température de départ, Ret.: température de retour  
\*\* COPan: coefficient de performance annuel; AET: amplification électrothermique

Système	Température de l'eau froide départ/retour en °C *	COPan ou AET **
Climatisation jusqu'à env. 1970	6 °C/12 °C	2 à 3
Poutres froides, à partir d'env. 1990	12 °C/18 °C	3 à 4
TABS ou convecteurs à ventilateur efficients sans Freecooling	18 °C/22 °C	5 à 7
TABS ou convecteurs à ventilateur efficients avec Freecooling	20 °C/23 °C	8 à 15

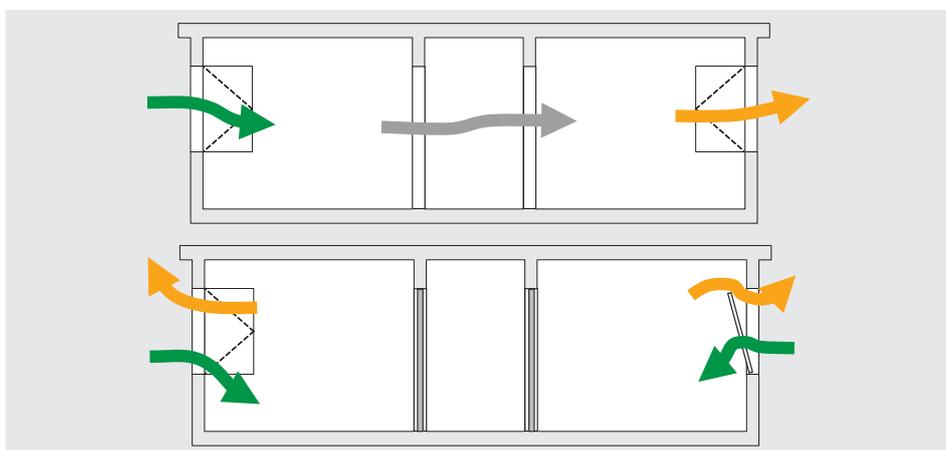


Illustration 53: Aération unilatérale par les fenêtres et aération transversale.

tiques et du comportement des utilisateurs. Les ventilations naturelles automatiques des grands bâtiments sont ainsi dimensionnées à l'aide de programmes de simulation, et fonctionnent via des systèmes d'automatisation du bâtiment. L'aération naturelle à actionnement manuel pour les bâtiments d'habitation peut toutefois être dimensionnée à l'aide de valeurs indicatives conformément au cahier technique SIA 2023.

Valeurs indicatives pour le dimensionnement de systèmes d'aération par les fenêtres dans les bâtiments d'habitation. Sections transversales libres des vantaux d'aération dans les bâtiments d'habitation:

- Aération unilatérale au moins 2 à 3 % de la surface au sol
- Aération transversale au moins 1 à 2 % de la surface au sol

Rapport maximal entre la profondeur de la pièce L et la hauteur de la pièce H:

- Aération unilatérale: L/H inférieur à 2,5
- Aération transversale: L/H inférieur à 5,0

Les valeurs indicatives pour les surfaces d'ouverture libres des vantaux d'aération se basent sur l'utilisation d'une aération par les fenêtres pour le refroidissement nocturne. Cela permet d'atteindre un renouvellement de l'air 2 à 3 fois par heure durant les nuits d'été. Ce dimensionnement pour le refroidissement nocturne suffit également à garantir toute l'année une bonne qualité de l'air ambiant sur le plan hygiénique à l'aide d'une ventilation forcée.

Les valeurs indicatives se basent sur une géométrie traditionnelle des fenêtres. En d'autres termes, cela signifie en particulier que le vantail d'aération peut se situer jusqu'à 20 cm en dessous du plafond. Des

valeurs inférieures s'appliquent à des vantaux de fenêtres hauts et étroits (rapport de la hauteur sur la largeur supérieur à 2). Pour les vantaux ayant une faible hauteur pour une grande largeur (p. ex. les impostes), les valeurs plus élevées s'appliquent.

Les surfaces doivent être considérées comme des sections transversales libres. En présence d'éventuelles grilles de protection contre les intempéries ou contre les insectes, les vantaux d'aération doivent alors être agrandis de façon inversement proportionnelle à la section transversale libre des grilles. Pour les bâtiments non destinés à l'habitation, les normes suisses ne proposent aucune valeur indicative. On trouve toutefois parfois des indications dans les prescriptions relatives à la construction. En l'absence de telles indications, il est recommandé d'utiliser des valeurs environ 50 % supérieures à celles s'appliquant aux bâtiments d'habitation.

Dans le cas de pièces accueillant un grand nombre de personnes, donc exigeant des débits d'air extérieur élevés, il convient de prendre en compte non seulement la dimension des fenêtres mais également la géométrie de la pièce. Pour obtenir une aération suffisante des pièces, le rapport entre la profondeur de la pièce et sa hauteur ne doit pas dépasser les valeurs indicatives.

### Limites d'utilisation de l'aération par les fenêtres

Dans des régions soumises à de fortes nuisances sonores ou à des émissions de polluants importantes (en particulier pour les particules fines), une simple aération par les fenêtres n'est pas recommandée. La norme SIA 382/1 définit des exigences quantitatives en termes de bruit et de polluants.

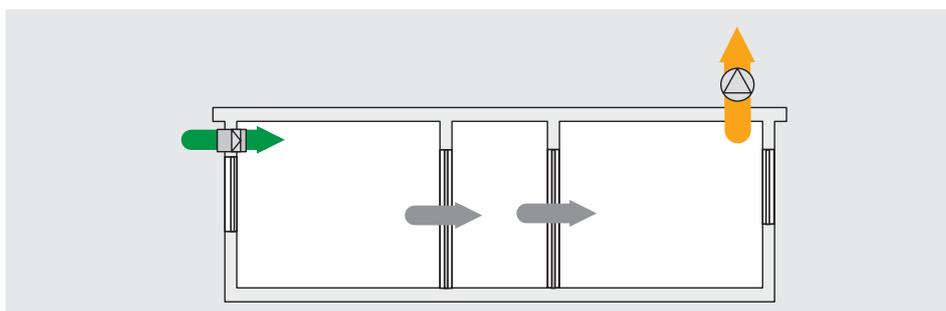


Illustration 54:  
Schéma d'une installation de reprise d'air.

### Installation de reprise d'air

■ Etant donné qu'aucun conduit d'air fourni n'est requis, les installations de reprise d'air représentent, notamment dans la rénovation, une alternative aux aérations douces.

■ Lorsque de l'air est aspiré, de l'air de remplacement doit également être acheminé. Les bâtiments dotés d'installations de reprise d'air doivent ainsi être équipés de passages d'air extérieur. En raison de la protection phonique, de l'encrassement, de la filtration, de la dépression ou du confort thermique, les passages d'air extérieur ne sont pas simplement des trous dans le mur, mais sont des composants relativement complexes.

■ La planification et l'exécution d'installations de reprise d'air sont au moins aussi exigeantes que celles des autres installations de ventilation. Cela signifie également que des prestations de planification qualifiées doivent être apportées. Le dimensionnement technique des installations de reprise d'air est règlementé dans la norme SIA 2023. Le dimensionnement acoustique ou le justificatif de protection phonique pour les passages d'air extérieur s'effectue selon SIA 181.

Pour les installations de reprise d'air, les points suivants doivent être tout particulièrement pris en compte:

■ Les passages d'air extérieur doivent être dimensionnés de manière à ce que la dépression dans la pièce ne dépasse pas 4 à 5 Pa. Cette exigence ne peut être satisfaite, dans la pratique, que si aucun filtre F7 n'est requis (voir le paragraphe sur l'hygiène). En

d'autres termes, les installations de reprise d'air ne doivent être envisagées que dans des régions où la qualité de l'air extérieur est bonne (valeur moyenne annuelle PM10 maximum  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

■ La dépression ne doit pas accroître le risque de radon. Pour les maisons familiales existantes notamment, ce risque doit être écarté.

■ En raison de l'infiltration (causée par la dépression), le débit volumique d'air extérieur pour les installations de reprise d'air est environ 30 à 40 % supérieur à celui des aérations douces.

■ Malgré le débit volumique d'air extérieur plus élevé, une installation de reprise d'air ne fonctionne sans problème que si l'enveloppe du bâtiment présente une bonne étanchéité à l'air. La perméabilité à l'air ne doit pas dépasser une valeur  $n_{50}$  de 1,0/h.

■ Une autre conséquence de la dépression est la perturbation possible des chauffages à combustion. Des foyers dépendants de l'air ambiant ne doivent donc pas être utilisés dans des logements dotés d'installations de reprise d'air. Il est également déconseillé d'utiliser des foyers indépendants de l'air ambiant.

■ Lorsque les fenêtres sont ouvertes relativement longtemps, une installation de reprise d'air ne fonctionne plus correctement. L'air extérieur s'écoule dans les pièces dans lesquelles les fenêtres sont ouvertes et celles dans lesquelles les fenêtres sont fermées ne sont quasiment plus alimentées en air frais, malgré les passages d'air extérieur.

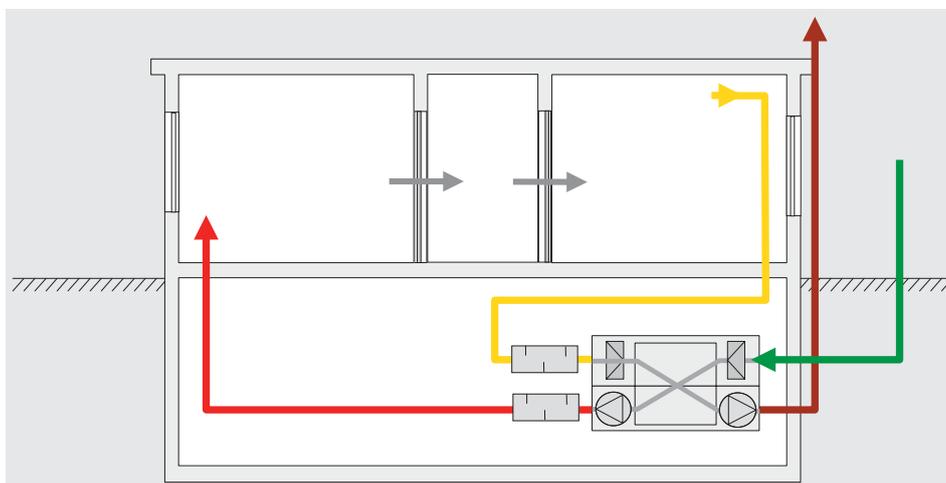


Illustration 55:  
Principe d'une aération douce.

### Aération douce

Grâce à la récupération de chaleur, les pertes de chaleur par l'aération peuvent être réduites d'environ 80 % avec une aération douce par rapport à une aération par les fenêtres. Avec des installations correctement réalisées, la consommation d'énergie du ventilateur est environ 7 à 10 fois inférieure à l'économie de chaleur de la récupération de chaleur.

L'aération douce s'est bien établie en Suisse. La qualité des installations réalisées est toutefois encore variable. Il faut donc impérativement veiller à ce que les exigences du cahier technique SIA 2023 soient respectées. On trouve également des indications et conseils dans le document «Komfortlüftung – Projektierung von einfachen Lüftungsanlagen in Wohnbauten» [1]. Le document «Garantie de performance Aération douce» [2] de SuisseEnergie propose également un guide rapide gratuit ainsi que des listes de contrôle.

Avec une aération douce, les fenêtres peuvent être ouvertes à tout moment sans nuire au fonctionnement de l'installation. Il faut toutefois préciser que lorsque les fenêtres sont souvent ouvertes en hiver, il en résulte des pertes de chaleur supplémentaires par l'aération.

### Extraction d'air de la table de cuisson dans les logements

L'extraction d'air de la table de cuisson fonctionne dans la plupart des cas indépendamment de l'aération du logement.

Elle peut toutefois influencer sur la qualité de l'air ambiant, même en dehors de la cuisine.

Les hottes d'extraction d'air acheminent l'air repris du poste de cuisson directement à l'extérieur. Comme toutes les installations de reprise d'air, elles nécessitent en principe des dispositifs de renouvellement de l'air. Sinon, les chauffages à combustion peuvent être perturbés et l'air de remplacement peut s'infiltrer par des voies non souhaitables sur le plan hygiénique (gainés d'installations, reflux de l'air repris des WC, logement voisin etc.).

Dans le cas des hottes à air recyclé, l'air est simplement mis en circulation. Les filtres à graisse et à charbon actif nettoient l'air. La vapeur d'eau reste toutefois dans le logement et doit être évacuée par une autre aération (p.ex. fenêtres ou aération douce). Aucun filtre n'élimine à 100 % les polluants de l'air. C'est pourquoi une faible partie des odeurs revient dans la pièce.

Dans la mesure où l'on tient compte des documents spéciaux relatifs à la protection contre l'incendie, les hottes d'extraction d'air peuvent être combinées à des aérations douces.

Lorsque l'on cuisine, notamment lorsque l'on fait griller ou frire des aliments, des particules fines sont produites. Avec des foyers à gaz, des particules issues de la combustion s'y ajoutent. Une hotte aspirante doit ainsi présenter une efficacité de captage la plus élevée possible. Les hottes murales sont plus efficaces que les hottes en îlot.

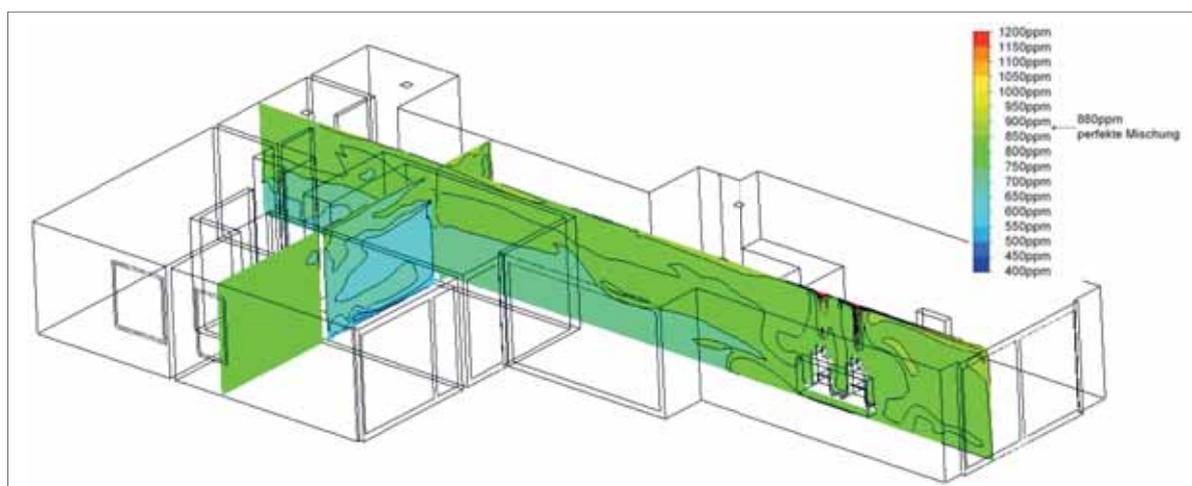


Illustration 56:  
Concentration de  $\text{CO}_2$  pour un écoulement libre de l'air dans le salon.  
Source: AHB 09.

### Écoulement de l'air ambiant

De manière générale, on peut dire que dans le cas d'un renouvellement mécanique de l'air inférieur à environ 3/h, la convection thermique (personnes, appareils, chauffage, surfaces chaudes ou froides de la pièce) influe sur l'écoulement de l'air ambiant. Dans le cas d'un renouvellement mécanique de l'air supérieur à 3/h, l'air acheminé mécaniquement domine par rapport à l'écoulement de l'air ambiant. Etant donné que la transition est progressive et que la zone proche des passages d'air est toujours influencée par l'air acheminé de façon mécanique, la valeur indicative de 3/h doit être utilisée avec précaution.

### Bâtiments d'habitation et utilisations avec de faibles renouvellements de l'air

Dans les pièces ayant les caractéristiques suivantes, on peut considérer que l'écoule-

ment de l'air ambiant est principalement déterminé par la convection thermique:

- Renouvellement de l'air maximum 1,5/h
- Débit volumique d'air fourni par les passages d'air maximum 40 m<sup>3</sup>/h

Dans ces conditions, l'air fourni est pratiquement complètement mélangé à l'air ambiant et il n'y a quasiment aucun court-circuit. Dans de telles pièces, la position des passages d'air fourni n'a pas d'influence importante sur la qualité de l'air ambiant. En d'autres termes, il existe une grande liberté de planification pour le placement des passages. Peu importe donc si, dans une chambre à coucher, l'air fourni est acheminé par la fenêtre ou au-dessus de la porte de la chambre.

Cela peut également s'appliquer à plusieurs pièces qui ne sont pas séparées les unes des autres par des portes fermées. Dans le projet [3], cette question est étudiée dans un logement réel de 4,5 pièces, dans lequel des passages d'air fourni ne sont présents que dans les chambres à coucher mais pas dans le salon ni dans la salle à manger. Etant donné que le salon est inhabituellement long, on suppose que le passage libre de l'air sera moins bon que dans le cas de plans typiques. Dans ces études, on suppose que deux personnes sont assises dans le salon. La concentration de CO<sub>2</sub> représentée dans l'illustration 56 montre que dans la zone de séjour, l'air se mélange parfaitement presque partout. Par conséquent, l'air extérieur requis dans ces zones est disponible et le système fonctionne. Ces résultats de simulation ont pu être confirmés par une mesure. On peut remarquer que le débit volumique d'air circulant dans le couloir est environ 10 fois plus important que le débit volumique d'air fourni de l'ensemble de l'appartement. Dans les salons ouverts, on peut donc renoncer à des passages d'air en raison de la qualité de l'air ambiant.

Illustration 57: Mouvement de l'air dans les pièces d'habitation.

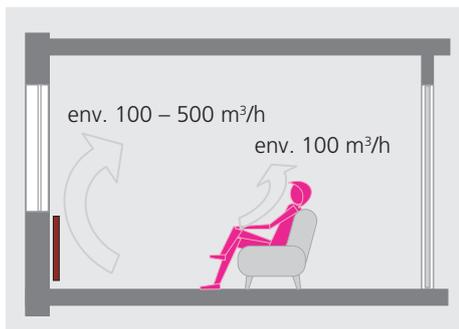


Illustration 58: Position des passages d'air fourni; le flux d'air fourni ne doit pas être orienté dans la zone de séjour.

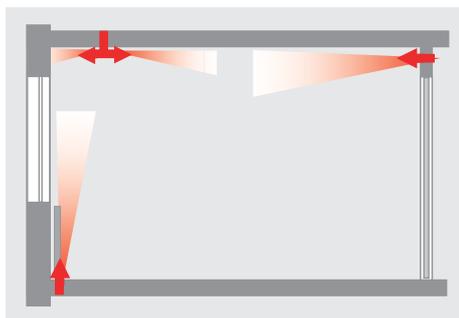


Illustration 59: Exemples de passages d'air fournis.



### Utilisations avec des renouvellements d'air moyens et élevés

Dans les pièces ayant des renouvellements d'air mécaniques supérieurs à 1,5/h, la convection thermique peut éventuellement influencer l'écoulement de l'air am-

biant, ainsi le placement et le choix des passages d'air fourni requièrent nettement plus de connaissances spécialisées que dans les bâtiments d'habitation.

En général, on différencie la ventilation par mélange et la ventilation par déplacement (illustr. 60). Dans le cas de la ventilation par mélange, l'air fourni est mélangé de la façon la plus optimale possible à l'air ambiant. Ce système présente l'avantage de permettre le placement des passages d'air au plafond (p.ex. diffuseurs circulaires) et au mur (p.ex. grilles, buses à longue portée). La surface utile des pièces n'est ainsi pas réduite. En outre, l'air fourni peut être acheminé à des températures jusqu'à 10 K inférieures. Des températures supérieures du même ordre sont également possibles. Ces écarts importants entre la température inférieure et la température supérieure peuvent permettre des traitements de l'air plus avantageux, notamment avec les petites installations. En d'autres termes, cela permet éventuellement de renoncer à l'utilisation de réchauffeurs et de refroidisseurs. Avec une ventilation par déplacement, l'air fourni s'écoule dans la pièce à une faible vitesse, au maximum égale à 0,2 m/s, et à une température inférieure de 2 à 3 K. Il en résulte une nappe d'air frais. Au niveau des surfaces chaudes telles que les personnes et les appareils, l'air frais monte. Les personnes «aspirent» l'air frais provenant de la zone du sol, par leur chaleur corporelle. La ventilation par déplacement est considérée comme efficace et confortable. Des phénomènes de courant d'air n'apparaissent qu'à proximité des passages d'air fourni, ce qui signifie que les

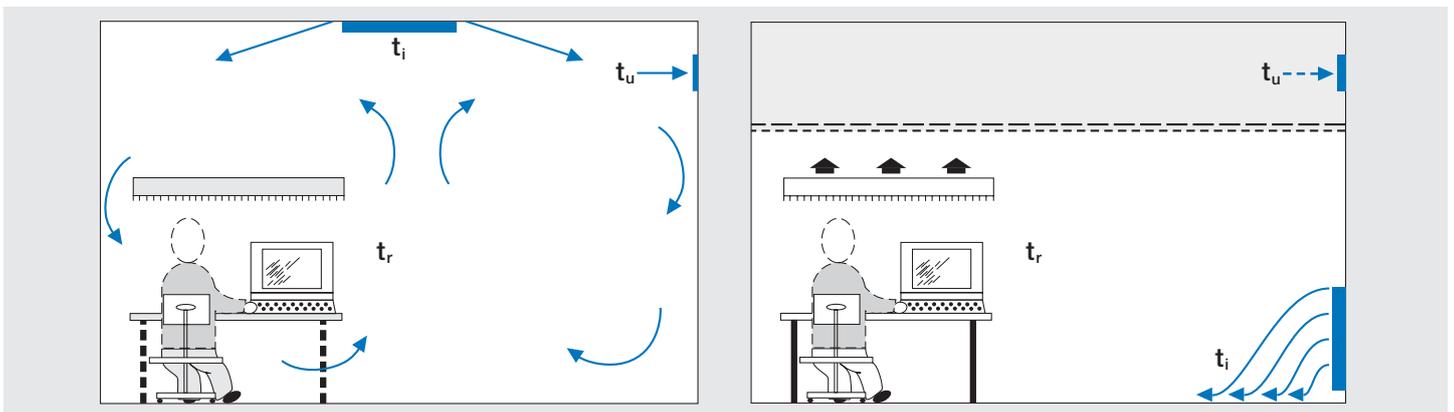
zones proches de ceux-ci ne sont pas appropriées au séjour de personnes. La température inférieure définie de 2 à 3 K requiert un traitement de l'air correspondant, avec réchauffage et refroidissement. Un inconvénient de la ventilation par déplacement réside en outre dans le fait que la nappe d'air frais peut être perturbée par des surfaces froides ou chaudes de la pièce (en particulier les fenêtres) et par des mouvements mécaniques (p.ex. le déplacement de personnes).

### Ventilation par mélange

Dans la technique de ventilation classique, l'air fourni est acheminé via des conduits d'air jusqu'aux pièces qui en ont besoin. Comme illustré dans le paragraphe Bâtiments d'habitation, l'air se répartit généralement très bien dans des zones dotées de plusieurs pièces lorsque les portes des chambres sont ouvertes. En d'autres termes, dans un logement ou dans un petit étage de bureaux, la totalité de l'air fourni peut être acheminée par un seul point jusque dans une zone de passage. Si les portes restent ouvertes, l'air fourni se répartit dans les pièces. Pour pouvoir réaliser ce concept même avec des portes fermées, on utilise des ventilateurs mixtes ou des déverseurs. Ceux-ci sont intégrés dans les portes ou à côté de celles-ci. Lorsque les portes sont fermées, un mini-ventilateur achemine l'air provenant du couloir jusque dans la pièce (chambre ou bureau) et un second petit ventilateur restitue l'air ambiant dans le couloir. Lorsque les portes sont ouvertes, les petits ventilateurs peuvent être désactivés. Avec ce concept, le couloir devient

*Illustration 60: Ventilation par mélange (à gauche) et ventilation par déplacement (à droite).*

*Source: Lindab*



pour ainsi dire une canalisation d'air frais ou un réservoir d'air frais. En présence de ventilations par mélange, il convient de veiller aux points suivants:

- La protection contre l'incendie limite la dimension des zones. Dans les logements, cela ne pose aucun problème car un logement forme une section coupe-feu. Dans les bureaux, les sections coupe-feu et les sorties de secours doivent être prises en compte.

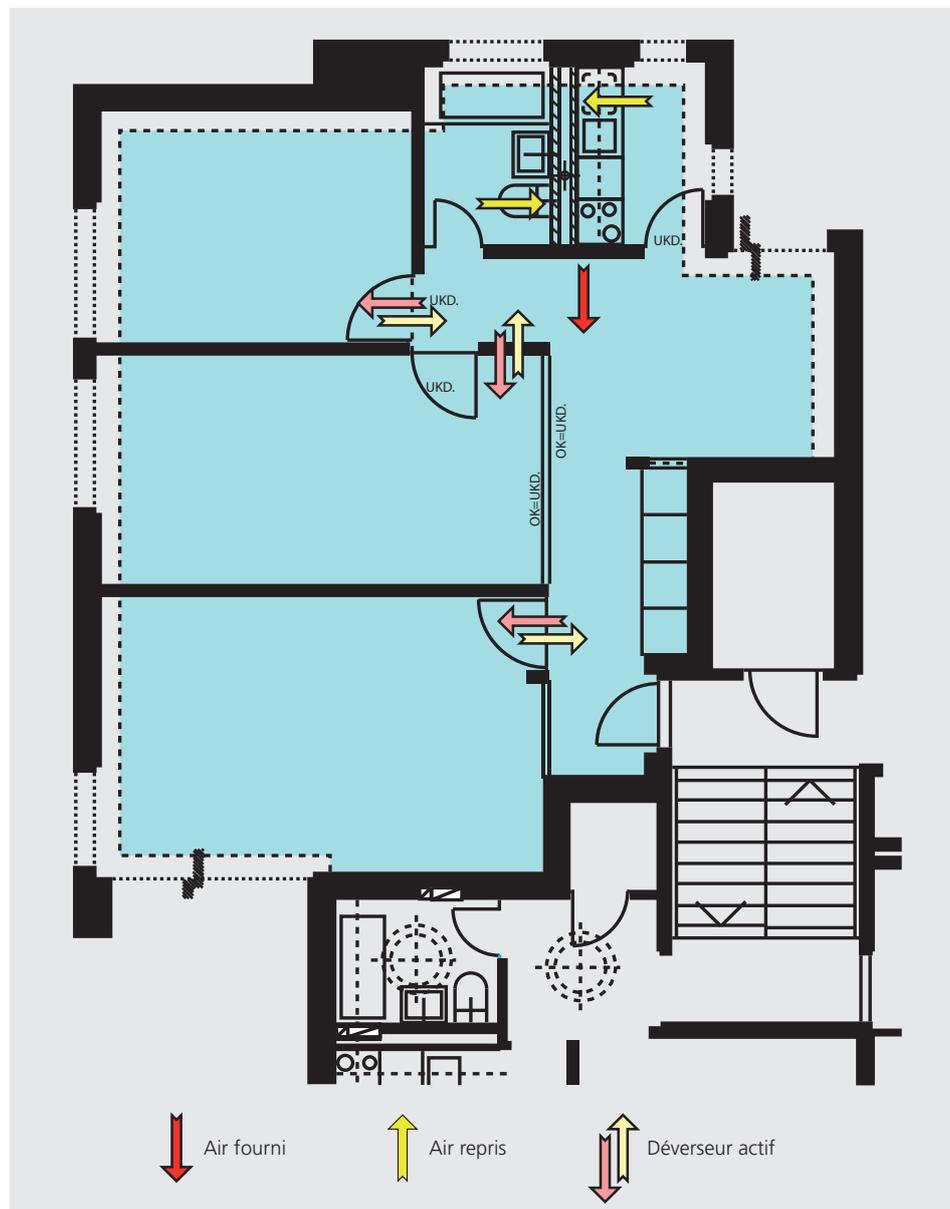
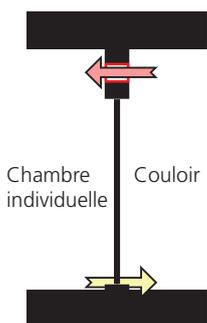
- Les locaux humides et les locaux soumis à de fortes pollutions de l'air ambiant (locaux avec imprimantes, salles fumeurs) ne doivent pas être intégrés dans les ventilations par mélange. De tels locaux doivent être équipés de sorties d'air repris. Si cela

est autorisé en termes de protection incendie, l'air fourni dans ces locaux peut malgré tout provenir du couloir, de zones de ventilation par mélange.

- Etant donné que l'air du couloir présente une qualité d'air mélangé, les ventilateurs mixtes doivent acheminer des débits volumiques d'air deux fois plus importants que ceux acheminés dans les locaux dotés de ventilations classiques. Les pressions d'acheminement des mini-ventilateurs étant toutefois très faibles, la puissance absorbée pour un bureau ou une chambre à coucher est de l'ordre de 2 à 3 watts.

- Des odeurs peuvent se répartir uniformément dans les zones de ventilation par

Illustration 61:  
Principe de la ventilation par mélange dans le cas d'un logement.



mélange. Dans les logements, il s'agit notamment des odeurs de cuisine. Il est donc recommandé d'équiper les ventilateurs mixtes des différentes pièces de programmeurs: Lorsqu'un programmeur est actionné, l'échange d'air avec le couloir est interrompu pendant environ une demi-heure. Les odeurs de cuisine ne se diffusent plus autant que lorsque les portes des pièces restent ouvertes.

■ Les ventilateurs par mélange produisent des bruits d'écoulement d'air et peuvent dégrader la protection phonique entre la pièce et le couloir. La construction de ventilateurs mixtes de haute qualité sur le plan acoustique est ainsi très exigeante. Pour des raisons acoustiques notamment, il convient donc de n'utiliser que des ventilateurs mixtes ayant été développés en tant que produits de série et disposant de données de contrôle acoustique.

Un grand avantage des ventilations par mélange réside dans le fait que la qualité de l'air de toute une zone peut être régulée via un unique capteur. Pour les bureaux notamment, une régulation du CO<sub>2</sub> est recommandée. La simplification importante de la distribution de l'air fourni permet éventuellement de réduire la hauteur des étages.

Comme tous les dispositifs techniques de ventilation, les ventilateurs par mélange sont également soumis à des travaux d'entretien. Ainsi, il convient de prévoir au minimum un contrôle annuel. Il ne faut pas non plus oublier que les mini-ventilateurs sont des pièces rotatives dont la durée d'utilisation s'élève à environ 10 à 15 ans.

### Ventilation dans la rénovation

En principe, les constructions nouvelles et les rénovations sont soumises aux mêmes exigences en matière de technique de ventilation et connaissent les mêmes phénomènes. La principale différence réside dans les conditions constructives. Si les conduits d'extraction d'air ou les zones d'installation pour les conduits de reprise d'air sont souvent disponibles, la conduction de l'air fourni constitue un élément critique. La question essentielle dans les

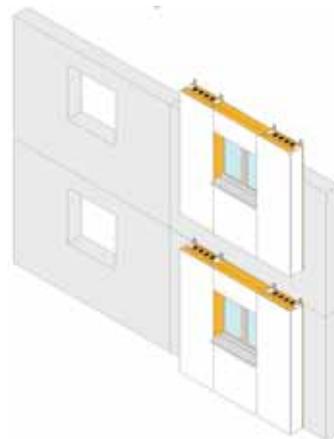
rénovations est la suivante: Comment l'air fourni parvient-il dans la pièce?

Dans les bâtiments d'habitation et parfois même dans les bâtiments non destinés à l'habitation, les variantes suivantes sont envisageables:

■ Conduits d'air fourni au niveau des plafonds des couloirs et passages d'air fourni



*Illustration 62: PremiVent, le système d'aération par les fenêtres avec récupération de chaleur et d'humidité, a remporté sur le salon Swissbau 2012 le premier prix du concours produits, décerné par l'Office fédéral de l'énergie et l'Office des constructions de la ville de Zurich. (Zehnder Comfosystems)*



*Illustration 63: Éléments de façade avec conduits d'air. Source: Projet CCEM [4]*



au-dessus des portes des chambres. Pour cela, la hauteur sous plafond dans le couloir doit pouvoir être réduite d'environ 15 cm. Selon les exigences architecturales et le concept, des plafonds suspendus ou des conduits visibles sont réalisables.

- Air fourni dans le couloir, alimentation des pièces via un ventilateur mixte.

- Conduits d'air fourni dans les éléments de façade: pour cela, la façade doit être isolée sur une épaisseur d'au moins 15 cm. Cette variante a été étudiée en détail et documentée dans le projet CCEM [4]. Diverses indications, p. ex. relatives à la protection incendie, figurent dans le rapport final correspondant.

- Appareils de ventilation des pièces individuelles ou appareils de façade: Ces petits appareils de ventilation avec récupération de chaleur sont installés dans le salon, les chambres à coucher et les bureaux. L'efficacité des appareils de ventilation des pièces individuelles actuels est proche de celle des appareils et installations plus grands. Dans la zone d'habitation, il convient tout particulièrement de veiller au bruit: seuls quelques produits remplissent les exigences d'un niveau de pression acoustique de 25 dBA pour un débit volumique d'air de 30 m<sup>3</sup>/h.

- Installations d'air repris: l'air neuf est acheminé via des passages d'air neuf dans la façade.

- Aération automatique par les fenêtres. L'ordre de ces variantes correspond à une recommandation de l'auteur en termes de priorité d'application. Dans le cas des installations d'air repris et des aérations automatiques par les fenêtres, il convient de veiller à ce que la nuisance sonore extérieure et la pollution de l'air extérieur ne compromettent pas la mise en application. Outre la mise en œuvre des différents concepts, des solutions mixtes et des systèmes hybrides sont également possibles. Ainsi, il est par exemple envisageable de raccorder certaines pièces d'un logement via des conduits d'air fournis classiques. Une chambre située à l'écart peut être équipée d'un ventilateur mixte ou d'un appareil de ventilation de pièce individuelle. À l'intérieur d'une même unité

d'utilisation, seuls des systèmes de ventilation ayant les mêmes rapports de pression doivent être utilisés. En d'autres termes, les installations d'air repris ne peuvent pas être combinées à d'autres systèmes. Étant donné que dans les bâtiments relativement anciens, l'étanchéité à l'air entre les unités d'utilisation ne correspond souvent pas aux normes actuelles, la prudence est requise lorsque des unités d'utilisation voisines sont équipées de systèmes ayant des rapports de pression différents. Par exemple, lorsque l'on installe dans un appartement une installation de reprise d'air, de l'air et ainsi des odeurs d'un appartement adjacent pourraient être transmis, en raison de la dépression.

### Centralisé ou décentralisé?

Dans les bâtiments d'habitation et les bâtiments non destinés à l'habitation, les concepts d'installations suivants peuvent en principe être sélectionnés:

- Installations destinées à plusieurs unités d'utilisation. Dans les bâtiments d'habitation, celles-ci sont appelées installations multi-logements.

- Installations destinées à des unités d'utilisation individuelles. Dans les bâtiments d'habitation, on parle alors d'installations de logements individuels.

- Un appareil de ventilation par pièce. Dans les bâtiments d'habitation, on utilise dans ce cas la notion d'appareils de ventilation de pièces individuelles. Dans les bâtiments non destinés à l'habitation, c'est la désignation d'appareils de façade qui est répandue.

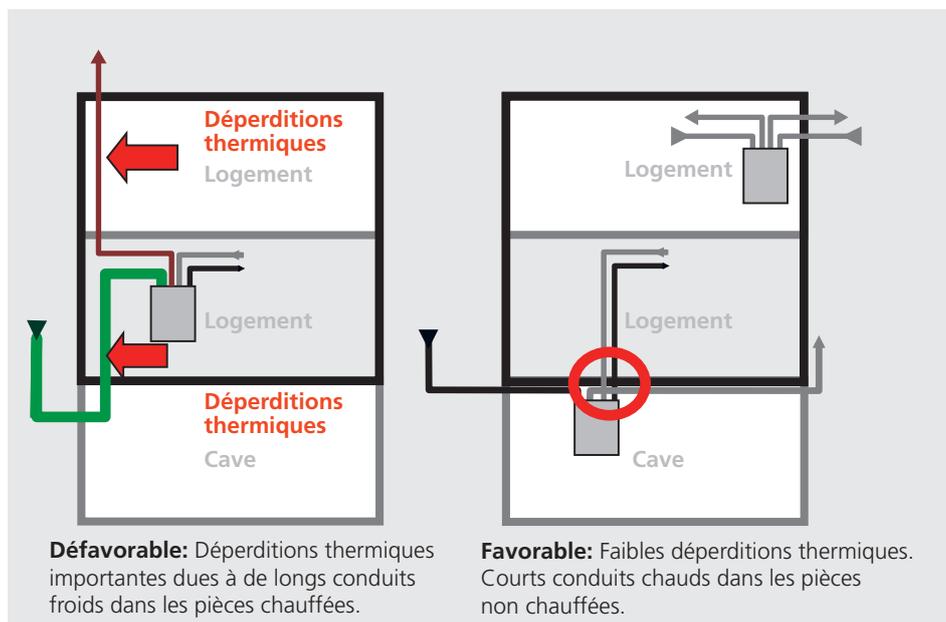
En termes d'efficacité, les différentes solutions sont similaires. Que ce soit pour la récupération de chaleur ou pour l'énergie du ventilateur, les installations correctes et les techniques actuelles atteignent des valeurs spécifiques très similaires. Cela présume toutefois que les installations multi-zones ou multi-logements sont équipées d'une commande selon les besoins ou mieux, d'une régulation selon les besoins. Dans les bâtiments non destinés à l'habitation, la technique correspondante du régulateur de débit volumique variable

est déjà utilisée depuis plusieurs décennies. Dans les bâtiments d'habitation, on trouve sur le marché depuis environ 2012 des systèmes appropriés, répondant notamment aux exigences phoniques plus importantes. Dans les installations multi-logements, il est recommandé, pour des raisons d'interface, de faire appel à des systèmes globaux fournis par un unique fournisseur de systèmes, comprenant régulateur de débit volumique variable, appareils de ventilation et régulation.

Les déperditions thermiques des conduits et des canalisations d'air sont souvent oubliées. Dans le cas des conduits principaux des grandes installations centrales, ces déperditions sont négligeables. Dans les installations de logements individuels, par contre, la disposition détermine si 10 % ou plus de l'énergie récupérée par la récupération de chaleur est éventuellement perdue par les conduits. Du point de vue énergétique, un appareil de ventilation doit être placé près de l'enveloppe thermique du bâtiment, par exemple près du mur extérieur ou dans la cave directement sous le premier étage chauffé. Les conduits froids (air neuf et air rejeté) doivent si possible être acheminés à travers des pièces non chauffées et les conduits chauds (air fourni et air repris du logement) à travers des pièces chaudes. Les installations multi-logements sont en général conçues de

manière à ce que ce principe soit respecté sans nécessiter de mesures spéciales. Dans les installations de logements individuels, dans lesquelles les appareils sont disposés dans des logements à l'étage, il convient de garantir une disposition appropriée des conduits froids courts (illustr. 64). Si cela n'est pas possible, une épaisseur d'isolation de 100 mm est exigée, conformément aux prescriptions énergétiques cantonales. Plus l'installation est grande, plus la planification, l'installation et la mise en service sont exigeantes. Les petites installations ont une exploitation plus complexe. En termes d'hygiène, les grandes installations s'encrassent plutôt lors du montage. Dans les petites installations, le remplacement des filtres et l'inspection de, par exemple, des centaines d'appareils de pièces individuelles, sont plus complexes. Avec une planification et une exécution correctes, les installations multi-zones sont finalement considérées comme moins problématiques sur le plan hygiénique que les installations décentralisées.

En termes de coût, il en va de même: les solutions décentralisées peuvent entraîner des mesures constructives moins importantes, mais sont souvent plus chères en termes d'exploitation. Dans le cas des installations de logements individuels d'aération douce, la protection contre le gel de la récupération de chaleur doit être soigneu-



*Illustration 64:*  
*Schéma avec agencement favorable et défavorable.*

sement étudiée. Des appareils avec échangeurs de chaleur à enthalpie, ou le préchauffage de l'air extérieur avec la chaleur environnante (échangeur de chaleur à eau glycolée ou puits canadien), sont appropriés. Les solutions qui causent une dépression en arrêtant le ventilateur d'air fourni ou en réduisant son régime ne sont pas appropriées. Un préchauffage électrique de l'air extérieur est dans la plupart des cas problématique sur le plan énergétique. Dans le cas des installations multilogements, la protection contre le gel peut être facilement réalisée sur le plan technique, car les solutions techniques correspondantes (préchauffage, dérivation) sont disponibles depuis longtemps déjà sur le marché.

### Alimentation en air efficiente

Dans de nombreuses installations de ventilation, la puissance du ventilateur ne répond pas aux exigences de la norme SIA 382/1. Une aération douce doit présenter, pour un débit volumique d'air de 100 m<sup>3</sup>/h, une puissance électrique absorbée ne dépassant pas 35 W. Cela concerne la consommation électrique des ventilateurs d'air fourni et d'air repris, y compris les éventuels entraînements auxiliaires tels que l'entraînement du rotor et la commande. Des études montrent que cette puissance électrique absorbée est réalisable dans la pratique.

### Dimensionnement technique de l'écoulement

Dans les installations de logements individuels, la perte de charge externe (perte de charge des conduits d'air et des composants à l'extérieur de l'appareil de ventilation) doit s'élever à 70 Pa au maximum, aussi bien du côté air neuf et air fourni que du côté air repris et air rejeté. Cela présuppose une exploitation avec les vitesses d'air prescrites par la loi, ainsi que des composants performants sur le plan de l'écoulement. En d'autres termes, des conduits d'air ronds et aucun coude angulaire. Souvent, les grilles d'air extérieur et d'air rejeté sont trop petites. Les grilles rondes doivent être supérieures au mini-

mum d'une largeur nominale au conduit raccordé. Les régulateurs à débit volumique constant doivent être évités.

### Appareils les plus performants

Dans les nouveaux appareils, les ventilateurs sont entraînés avec des moteurs à courant continu ou des moteurs EC. Dans les petites installations, la puissance électrique absorbée est à peu près divisée par deux par rapport aux anciens ventilateurs fonctionnant avec des moteurs à courant alternatif. Néanmoins, même avec cette nouvelle technologie, le développement se poursuit. Il est donc intéressant de comparer, à l'aide des déclarations d'appareils, l'importance de la puissance électrique absorbée. Outre les contrôles pour les maisons passives et la déclaration de energie-cluster.ch, on dispose également des données du module Minergie Aération douce.

### Sources

- [1] Huber, H.: Planungshandbuch Komfortlüftung, Faktor Verlag, Zurich 2010
- [2] Garantie de performance Aération douce. SuisseEnergie, Berne 2010.
- Téléchargement sur [www.leistungsgarantie.ch](http://www.leistungsgarantie.ch)
- [3] Amt für Hochbauten der Stadt Zürich: Projekt Luftaustausch. Diverses publications sur le projet, (rapport de synthèse), Zurich 2009. Téléchargement sur [www.stadt-zuerich.ch/nachhaltigesbauen](http://www.stadt-zuerich.ch/nachhaltigesbauen) → 2000-Watt-Gesellschaft → Technik
- [4] Kobler, R., et al.: Nachhaltige Wohnbauerneuerung: Schlussbericht der Module A3, A4 im CCEM Forschungsprojekt. Vorfabrizierte Fassaden- und Dachmodule. FHNW, IEBau, Muttenz 2010

# Electricité

**Beate Weickgenannt** **Appareils ménagers**

**Appareils ménagers fixes**

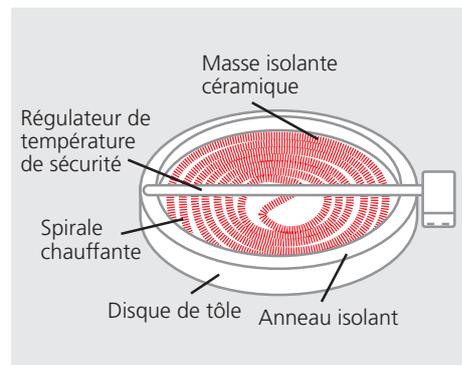
**Tables de cuisson:** Dans les plaques de cuisson, la chaleur peut être produite de différentes manières. Dans les plaques de cuisson électriques, les plats sont chauffés au moyen d'un élément chauffant électrique. En général, trois enroulements de chauffage sont coulés dans la plaque et sont commandés à l'aide d'un circuit à 7 positions. Le commutateur à 7 positions permet le réglage de 6 niveaux de puissance plus un niveau d'arrêt.

Le renforcement au centre des plaques de cuisson permet d'empêcher la dilatation vers le haut de la plaque lors du chauffage, qui réduirait la surface de contact avec la marmite.

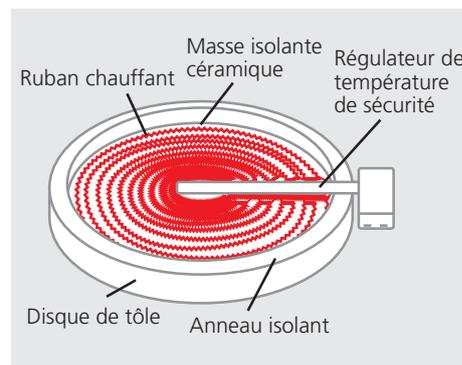
**Les tables en vitrocéramique** possèdent, à la place des plaques de cuisson, des zones de cuisson où est produite la chaleur. Les corps de chauffe à rayonnement se composent de disques équipés d'une couche

d'isolant thermique. La production de chaleur peut s'effectuer à l'aide de spirales et rubans de chauffe, ou encore d'éléments halogènes. Ceux-ci sont conçus comme une lampe à incandescence halogène avec réflecteur. La transmission de chaleur s'effectue du disque chauffant, à travers la plaque vitrocéramique, jusqu'au récipient de cuisson. Pour protéger la plaque de verre des dommages dus à la chaleur, les disques chauffants sont équipés d'une protection contre la surchauffe.

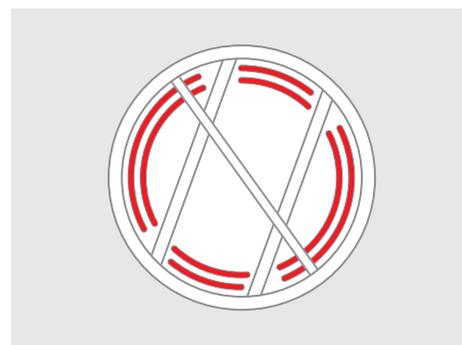
La transmission de chaleur, dans ces trois types de systèmes chauffants, s'effectue



*Illustration 67: Avec spirale chauffante. Un à trois conducteurs chauffants enroulés, à rayonnement libre, sont disposés de façon annulaire et intégrés dans un disque de tôle avec anneau isolant.*



*Illustration 68: Avec ruban chauffant. Dans le cas de la zone de cuisson avec ruban chauffant, l'élément chauffant se compose d'un ruban ondulé, à rayonnement libre, d'env. 0,7 mm d'épaisseur et 4 mm de hauteur.*

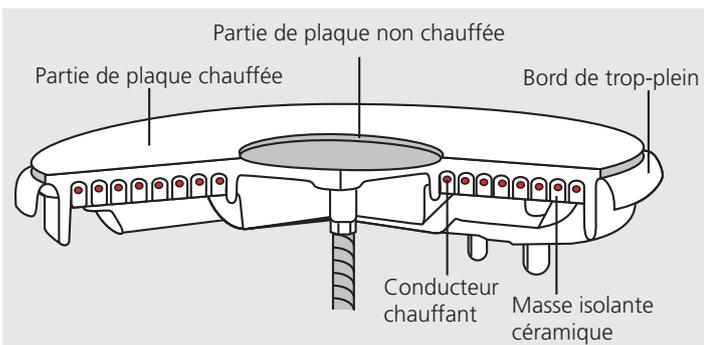


*Illustration 69: Avec projecteur halogène et spirale chauffante. Les éléments chauffants halogènes en forme de tige sont combinés à un chauffage par rayonnement par une spirale chauffante ou un ruban chauffant.*

*Illustration 65: Table avec plaques de cuisson.*



*Illustration 66: Coupe transversale d'une plaque de cuisson.*



par rayonnement thermique vertical. Etant donné qu'une partie du rayonnement est absorbée par le matériau en verre, la transmission de chaleur jusqu'au récipient de cuisson s'effectue par rayonnement et conduction thermique.

**Table à induction:** Dans les tables à induction, une bobine d'induction plate, constituée de conducteurs en cuivre, est disposée sous la plaque vitrocéramique. La bobine de cuivre est alimentée en courant alternatif haute fréquence et produit ainsi des champs électromagnétiques alternatifs puissants. Le récipient de cuisson à utiliser doit se composer d'un matériau magnétique bon conducteur de chaleur. Lorsqu'il est posé sur la zone de cuisson, des flux tourbillonnants se forment dans le fond du récipient, qui se réchauffe. L'avantage est que la chaleur n'est produite qu'en présence d'un récipient. La surface vitrocéramique n'est chauffée que par le retour de chaleur du récipient de cuisson. D'autres avantages sont les temps de réaction, la possibilité de régulation fine et les temps de chauffage plus courts. Source: hea.de

Néanmoins, l'importance des économies d'énergie pouvant être réalisées avec les tables à induction dépend largement du comportement des utilisateurs. S'ils cuisinent souvent et en grandes quantités, l'économie est importante par rapport à d'autres types de chauffage.

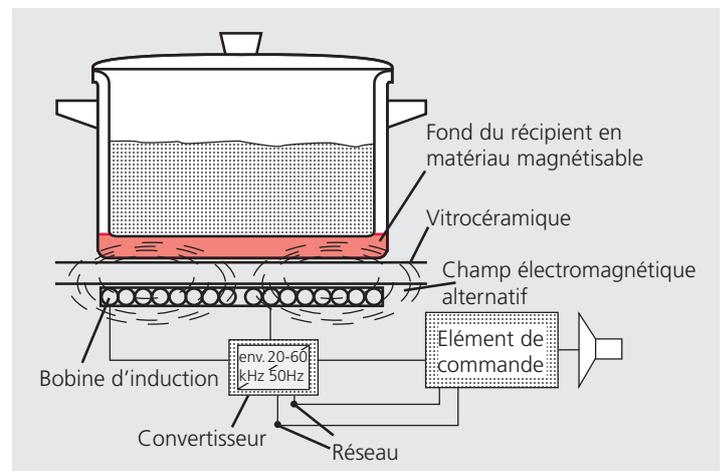
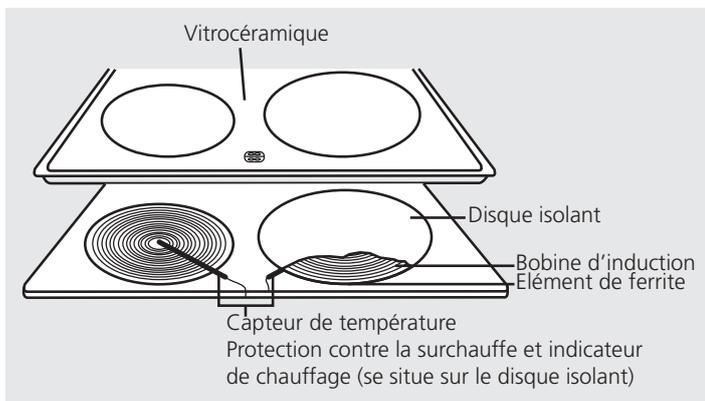
L'inconvénient de la technique à induction est le bourdonnement qu'elle produit, et qui dépend du récipient et du remplissage. En outre, cette technique requiert généralement l'achat de nouvelles marmites et poêles adaptées à l'induction. Tous les champs de cuisson disposant d'un écran tactile présentent une puissance de veille, qui peut s'élever à quelques watts et doit donc impérativement être prise en compte. Dans les tables de bonne qualité, la puissance de veille est limitée à moins de 1 W.

**Conseils pour l'économie d'énergie dans le domaine des tables de cuisson**

1. Il est plus avantageux de chauffer de l'eau dans une bouilloire que sur une table de cuisson.

*Illustration 71: Structure d'une table de cuisson à induction.*

*Illustration 70: Schéma de fonctionnement d'une table de cuisson à induction.*



*Tableau 15: Comparaison du besoin en temps et en énergie lors de l'utilisation de différentes tables de cuisson. Source: Stiftung Warentest*

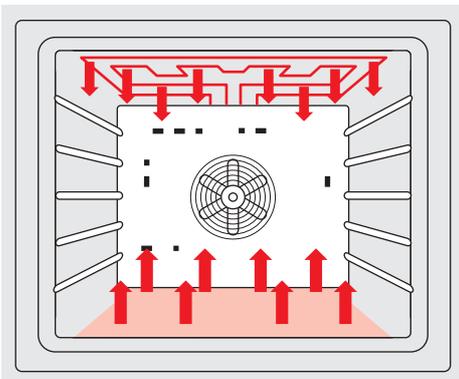
Description du produit		Plaques de cuisson classiques	Vitrocéramique infrarouge	Vitrocéramique halogène	Vitrocéramique induction
Fonctionnement		Spirales chauffantes dans une plaque de cuisson métallique	Spirales chauffantes sous la vitrocéramique	Filament de tungstène dans un corps en verre rempli de gaz sous la vitrocéramique	Bobine électromagnétique sous la vitrocéramique
Chauffer 1,5l d'eau à 90°C	Temps nécessaire	10,5 minutes	8 minutes	7,5 minutes	6,5 minutes
	Energie consommée	260 Wh	220 Wh	230 Wh	180 Wh
Chauffer une marmite de lentilles	Temps nécessaire	4,0 minutes	3,0 minutes	3,0 minutes	2,0 minutes
	Energie consommée	100 Wh	80 Wh	90 Wh	60 Wh

2. Adapter la taille du récipient de cuisson à celle de la plaque de cuisson: si le récipient est trop grand, le temps de cuisson est allongé, s'il est trop petit, de la chaleur est inutilement perdue; avec les tables à induction, des champs de dispersion peuvent apparaître (champ magnétique non absorbé par l'induction dans le fond du récipient). Pour plus d'infos: [www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/03156/](http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/03156/)

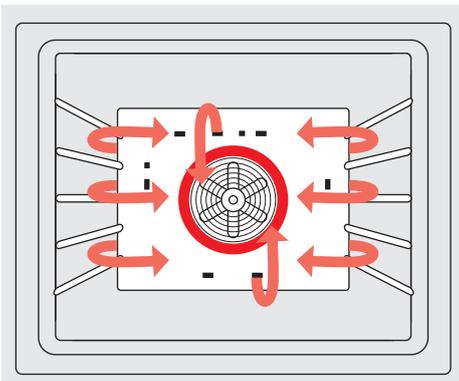
3. Veiller à utiliser des récipients de cuisson de bonne qualité (les fonds de marmite non plats réduisent la transmission de chaleur).

4. Réaliser les cuissons couvercle fermé. Avec des plaques de cuisson dotées de zones de cuisson chauffées par rayonnement, utiliser la chaleur résiduelle.

**Illustration 72:**  
Chauffage par de la chaleur provenant du dessus ou du dessous, ou par convection.



**Illustration 73:**  
Chauffage avec de l'air chaud.



### Fours de cuisson

On différencie trois types de fours de cuisson, qui se distinguent par leur mode de diffusion de la chaleur. Le four de cuisson standard chauffe le produit de cuisson par rayonnement et convection naturelle. Pour ce faire, des tiges chauffantes sont placées dans les zones supérieure et inférieure du four. Le four ne peut être occupé que sur un étage. Lorsque la chaleur est répartie uniformément au moyen d'un ventilateur, on parle d'un four à chaleur tournante. Dans ce cas, la cuisson peut s'effectuer sur deux étages en même temps (illustr. 72). Dans le cas du four à air pulsé, un ventilateur situé dans la paroi arrière du four répartit la chaleur produite par un corps de chauffe circulaire dans tout l'espace de cuisson. Cette convection forcée permet d'utiliser simultanément jusqu'à quatre étages de cuisson, et de réaliser ainsi des

économies de temps et d'énergie. En outre, la température peut être réglée 20 à 30°C en dessous de celle d'un four conventionnel (illustr. 73).

Depuis 2004, il existe une étiquette énergie obligatoire pour les fours de cuisson. L'échelle de l'efficacité énergétique va de G (rouge, consommation d'énergie maximale) à A (vert, consommation d'énergie minimale). L'étiquette énergie comporte, outre la consommation d'énergie, également le volume utile – petit, moyen ou grand.

### Conseils pour l'économie d'énergie

1. Exploiter intégralement l'espace de cuisson.
2. N'utiliser le four que pour cuire de grandes quantités.
3. Renoncer si possible au préchauffage.
4. Eviter d'ouvrir inutilement la porte du four.

**Illustration 74:** Etiquette énergie des fours de cuisson.

**Tableau 16:** Consommation d'énergie des fours de cuisson en fonction de leur taille et de leur classe d'efficacité (selon un mode de chauffage standard).

Consommation d'énergie E (kWh/a) pour une charge	Petit 12 l – 35 l	Moyen 35 l – 65 l	Grand + de 65 l
A	$E < 0,6$	$E < 0,8$	$E < 1,0$
B	$0,6 \leq E < 0,8$	$0,8 \leq E < 1,0$	$1,0 \leq E < 1,2$
C	$0,8 \leq E < 1,0$	$1,0 \leq E < 1,2$	$1,2 \leq E < 1,4$
D	$1,0 \leq E < 1,2$	$1,2 \leq E < 1,4$	$1,4 \leq E < 1,6$
E	$1,2 \leq E < 1,4$	$1,4 \leq E < 1,6$	$1,6 \leq E < 1,8$
F	$1,4 \leq E < 1,6$	$1,6 \leq E < 1,8$	$1,8 \leq E < 2,0$
G	$1,6 \leq E$	$1,8 \leq E$	$2,0 \leq E$

Énergie		Four électrique
Fabricant Modèle		Logo ABC 123
Économe	A B C D E F G	<b>A</b>
Peu économe		
Consommation d'énergie (kWh)		X.YZ
Fonction chauffage:	Classique Convention forcée	X.YZ X.YZ
(Calculée en charge normalisée)		
Volume utile (litres)		XZ
Type:	Faible volume Volume moyen Grand volume	←
Bruit (dB(A) re 1 pW)		
Une fiche d'information détaillée figure dans la brochure.		
Norme EN 50304 Fours électriques Directive «Étiquette énergétique» 2002/95/CE		

### Appareils frigorifiques

Les appareils frigorifiques comprennent les réfrigérateurs et les congélateurs. Tous les appareils frigorifiques ont pour fonction de prélever de la chaleur d'une zone définie. Le principe: par évaporation d'un liquide, de la chaleur est prélevée à son environnement. La température du liquide reste constante. Lorsque la vapeur produite est comprimée, sa température augmente. Par évacuation de cet excédent de température, la vapeur peut se condenser et le cycle recommence au début.

Dans la zone fraîche du réfrigérateur, on relève des températures de +4 à +8°C. Celles-ci sont appropriées au stockage à court terme de denrées alimentaires facilement périssables. Dans la zone froide du réfrigérateur, la température se monte à environ +2°C. L'humidité relative dans la zone froide sèche s'élève à environ 50% et est appropriée au stockage de denrées alimentaires froides emballées, telles que le poisson et la viande. Dans le bac à légumes situé en dessous, l'humidité relative de l'air s'élève à environ 90%. Elle est due à la basse température de l'air et au stockage de denrées alimentaires non emballées, telles que des fruits et légumes qui, par leur propre humidité, contribuent à cette humidité ambiante élevée. Les denrées alimentaires stockées dans le bac à légumes peuvent être conservées 2 à 3 fois plus longtemps que si elles sont stockées dans la zone fraîche traditionnelle.

Les congélateurs sont appropriés à la sur-gélation de denrées alimentaires. On y relève des températures inférieures ou égales à -18°C.

Depuis 2012, une étiquette énergie diffère sept classes d'efficacité. Celles-ci

vont de A+++ à D. Depuis janvier 2011, seuls des réfrigérateurs et congélateurs à partir de la classe d'efficacité A+ peuvent être vendus en Suisse. Pour l'évaluation des réfrigérateurs et congélateurs, un indice d'efficacité est calculé. Il se base sur différentes valeurs telles que la consommation d'énergie, le volume utile, la température la plus basse et quelques facteurs de correction.

### Conseils pour l'économie d'énergie

1. Etant donné que les réfrigérateurs et congélateurs fonctionnent 24 heures sur 24, l'achat d'un appareil A+++ est recommandé.
2. Veiller à choisir la bonne taille (une grande famille aura besoin d'un réfrigérateur plus grand qu'un ménage de deux personnes).
3. Les plats chauds doivent d'abord être refroidis à température ambiante avant d'être placés dans le réfrigérateur.
4. Les portes ne doivent être ouvertes que brièvement.

Tableau 17: Indices d'efficacité d'appareils frigorifiques en fonction de la classe d'efficacité (fiches info SuisseEnergie).

Classe d'efficacité	Indice d'efficacité EEI
A+++	EEI < 22
A++	22 ≤ EEI < 33
A+	33 ≤ EEI < 44
A	44 ≤ EEI < 55
B	55 ≤ EEI < 75
C	75 ≤ EEI < 95
D	EEI ≥ 95

Illustration 75: Etiquette énergie pour les appareils frigorifiques.

The image shows a standard European energy label for a refrigerator. It features a scale from A+++ (green) to D (red), with the current class A++ highlighted. The label includes fields for manufacturer, type, energy consumption (XYZ kWh/annum), and other technical specifications. Numbered callouts 1 through 8 point to specific parts of the label: 1. Nom ou marque du fabricant; 2. Type; 3. Classe d'efficacité; 4. Consommation d'énergie en kWh/an sur la base de 280 standards. La consommation d'énergie effective dépend de l'utilisation de l'appareil.; 5. Contenance utile totale de tous les compartiments de réfrigération (compartiments non désignés par une étoile); 6. Contenance utile totale de tous les compartiments de congélation (compartiments désignés par une étoile); 7. Emissions sonores en dB(A) ou 1pW (puissance acoustique); 8. Désignation de la réglementation.

### Lave-vaisselle

Le lave-vaisselle fonctionne de la façon suivante: la partie inférieure du lave-vaisselle est remplie d'eau. Une pompe de circulation achemine l'eau dans les bras d'aspersion qui, en tournant, aspergent la vaisselle avec de l'eau. La rotation des bras d'aspersion résulte de l'effet de recul du jet d'eau. L'eau est collectée au point le plus bas de la machine et est pompée par la pompe de circulation avant d'être réinjectée dans les bras d'aspersion.

Le système de chauffage qui chauffe l'eau à la température appropriée se situe dans la partie inférieure du lave-vaisselle. C'est lui qui consomme la majeure partie de l'énergie électrique. Les appareils les plus récents disposent d'un raccordement à l'alimentation en eau chaude, ce qui permet de renoncer à la phase de chauffage dans l'appareil. Ce raccordement est intéressant sur le plan écologique et économique lorsque:

1. L'eau chaude est produite à plus de 50 % à l'aide d'énergies renouvelables ou de chauffage à distance (issu d'énergies renouvelables ou de rejets thermiques).
2. Lorsque le contenu de la conduite de soutirage est inférieur à 1,5 l. C'est le cas lorsque la planification a été réalisée selon la norme SIA 385/1 (2010) «Installations d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments – Bases générales et exigences».
3. L'intégration d'une vanne double sous l'évier pour le raccordement à l'eau chaude et à l'eau froide est possible.

Tableau 18: Indices d'efficacité de lave-vaisselle en fonction de la classe d'efficacité (fiches info SuisseEnergie).

Classe d'efficacité	Indice d'efficacité EEI
A+++	EEI < 50
A++	50 ≤ EEI < 56
A+	56 ≤ EEI < 63
A	63 ≤ EEI < 71
B	71 ≤ EEI < 80
C	80 ≤ EEI < 90
D	EEI ≥ 90

### Étiquette énergie

- L'étiquette ne donne aucune indication sur l'efficacité de nettoyage car une efficacité minimale correspondant à la classe «A» est prescrite.
- La consommation d'eau n'est pas incluse dans l'étiquette énergie mais indiquée séparément.
- L'efficacité du séchage est classifiée séparément de A à G.
- Les classes d'efficacité entre l'ancienne et la nouvelle étiquette énergie ne coïncident pas. Un ancien lave-vaisselle de classe A passe généralement en classe A+.

### Conseils pour l'économie d'énergie

1. Bien remplir le lave-vaisselle et sélectionner le programme adéquat.
2. Étant donné que les appareils sont très silencieux, des programmes relativement longs sont peu dérangement. Les programmes courts augmentent la consommation électrique d'environ 15 %.

Illustration 76: Étiquette énergie pour les lave-vaisselle.

1 Nom ou marque du fabricant

2 Type

3 Classe d'efficacité

4 Consommation d'énergie en kWh/an sur la base de 28 cycles de lavage standard. La consommation d'énergie effective dépend de l'utilisation de l'appareil.

5 Emissions sonores en dB(A) ou 1pW (puissance acoustique)

6 Nombre de couverts pour une charge standard

7 Classification de l'efficacité de séchage

8 Consommation d'eau annuelle en litres sur la base de 280 cycles de lavage standard. La consommation d'eau effective dépend de l'utilisation de l'appareil.

9 Désignation de la régulation

### Lave-linge

L'illustration 77 montre la façon dont fonctionne un cycle de lavage: lorsque la température est abaissée, l'efficacité des autres facteurs doit être augmentée pour obtenir un résultat de lavage équivalent. Etant donné que la plus grande part de l'énergie d'un lave-linge est consommée pour le chauffage de l'eau (tout comme pour les lave-vaisselle), les mesures d'économie d'énergie consistent à réduire la consommation d'eau par kg de linge. Dans les anciens lave-linge, le rapport entre la quantité de remplissage (en kg) et l'eau consommée était de 1 pour 4 à 1 pour 5 pour le cycle de lavage. Les nouveaux lave-linge présentent un rapport de 1 pour 3. Pour réduire la consommation d'énergie, on peut également réduire la température du cycle de lavage. Les classes d'efficacité des lave-linge vont de D (classe la plus mauvaise) à A+++ et sont évaluées à l'aide de l'indice d'efficacité énergétique. La performance d'essorage est répartie dans des classes d'efficacité de A à G. En Suisse, depuis le premier janvier 2010, seuls des lave-linge de classe A ou mieux peuvent être vendus.

Illustration 77: Cycle de lavage selon Sinner (HEA).

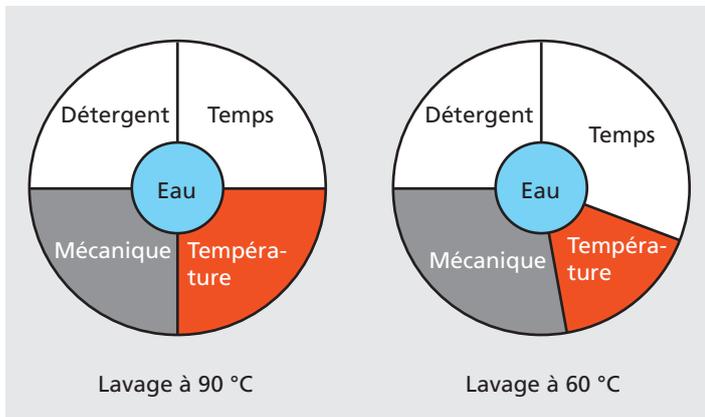


Tableau 19: Indices d'efficacité de lave-linge en fonction de la classe d'efficacité (fiches info SuisseEnergie).

Classe d'efficacité	Indice d'efficacité EEI
A+++	EEI < 46
A++	46 ≤ EEI < 52
A+	52 ≤ EEI < 59
A	59 ≤ EEI < 68
B	68 ≤ EEI < 77
C	77 ≤ EEI < 87
D	EEI ≥ 87

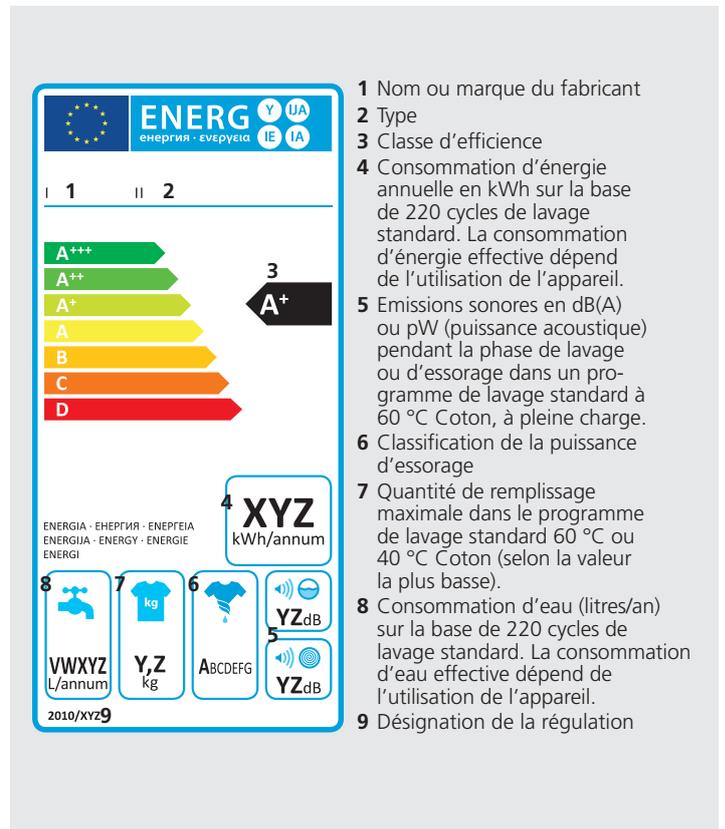
### Conseils pour l'économie d'énergie

1. Remplir le lave-linge au maximum afin de réduire au minimum la consommation d'énergie et d'eau par rapport à la quantité totale.
2. Choisir le programme de lavage adéquat ou la température adéquate: la plupart des bactéries sont éliminées dès 60 °C. Une température de 95 °C ne doit être choisie que pour des linges très sales. Les détergents actuels permettent des lavages à des températures réduites (p. ex. 20 °C).
3. Si le linge doit ensuite être séché à la machine, il est conseillé de choisir la vitesse d'essorage la plus élevée afin que l'humidité résiduelle du linge soit moins importante.

### Sèche-linge

Dans le cas des sèche-linge, de l'air chaud est soufflé à travers le linge, ce qui entraîne une évaporation de l'eau. Les programmes se différencient selon l'humidité résiduelle. Celle-ci est indiquée en % et se réfère à chaque fois à la quantité respective du linge séché à l'air. Le séchage du linge à la machine consomme énormément d'énergie.

Illustration 78: Etiquette énergie pour les lave-linge.



- 1 Nom ou marque du fabricant
- 2 Type
- 3 Classe d'efficacité
- 4 Consommation d'énergie annuelle en kWh sur la base de 220 cycles de lavage standard. La consommation d'énergie effective dépend de l'utilisation de l'appareil.
- 5 Emissions sonores en dB(A) ou pW (puissance acoustique) pendant la phase de lavage ou d'essorage dans un programme de lavage standard à 60 °C Coton, à pleine charge.
- 6 Classification de la puissance d'essorage
- 7 Quantité de remplissage maximale dans le programme de lavage standard 60 °C ou 40 °C Coton (selon la valeur la plus basse).
- 8 Consommation d'eau (litres/an) sur la base de 220 cycles de lavage standard. La consommation d'eau effective dépend de l'utilisation de l'appareil.
- 9 Désignation de la réglementation

gie. Si tout le linge devait être séché à la machine, la quantité d'énergie consommée serait deux fois plus importante que pour le lavage. Les chiffres d'affaires en constante augmentation dans le domaine des sèche-linge montrent que la tendance va bien dans ce sens. L'échelle de l'étiquette énergie des sèche-linge va de G à A. Les valeurs de consommation d'énergie se rapportent à un appareil doté d'une capacité de 5 kg. En d'autres termes, pour un sèche-linge doté d'une capacité de 5 kg, la classe d'efficacité A exige une consommation d'énergie maximale de 2,75 kWh. L'étiquette indique également le type d'appareil, c'est-à-dire s'il s'agit d'un sèche-linge à évacuation d'air ou d'un sèche-linge à condensation. Dans le cas du sèche-linge à évacuation, l'air humide est évacué via un flexible ou une conduite d'évacuation d'air. Cet air contient de l'humidité et des peluches, qui sont souvent évacuées vers l'extérieur afin d'éviter les pièces humides. Dans le cas des sèche-linge à condensation, l'air chaud enrichi en eau est refroidi via un condenseur. Pour cela, de l'air environnant froid est acheminé transversalement à travers le condenseur. Les sèche-linge à condensation fonctionnant selon le principe d'une pompe à chaleur sont particulièrement efficaces. Les sèche-linge à air ambiant sont des appareils muraux qui soufflent dans la pièce un flux d'air sec. La lessive pendue sur des fils diffuse son humidité dans l'air ambiant, qui est à nouveau aspiré par l'appareil. L'humidité se condense sur la surface froide de l'échangeur de chaleur. Dès que la teneur en humidité de l'air ambiant atteint un niveau souhaité, l'appareil s'arrête. Les sèche-linge à air ambiant ne doivent pas être utilisés dans des pièces

Tableau 20: Indices d'efficacité de sèche-linge en fonction de la classe d'efficacité (fiches info SuisseEnergie).

Classe d'efficacité	Indice d'efficacité EEI
A	< 0,55 kWh
B	0,56 à 0,64 kWh
C	0,65 à 0,73 kWh
D	0,74 à 0,82 kWh
E	0,83 à 0,91 kWh
F	0,92 à 1,00 kWh
G	> 1,00 kWh

trop froides. En effet, de nombreux sèche-linge sont équipés d'un chauffage de démarrage pour les pièces froides, qui augmente la consommation d'électricité.

### Conseils pour l'économie d'énergie

1. Plus le linge sort sec du lave-linge, plus la consommation d'énergie lors du séchage est faible.
2. Les anciens appareils sont commandés via des programmes horaires et ne possèdent aucun capteur d'humidité. Ces appareils consomment beaucoup d'énergie car ils continuent de fonctionner même si le linge est sec.
3. Si possible, faire sécher le linge dehors à l'air et au soleil.
4. Choisir le programme adéquat et la quantité de remplissage adéquate.

### Remplacement des appareils ménagers

Lors de l'achat d'appareils ménagers, il est judicieux, sur le plan écologique et économique, d'opter pour les appareils les plus performants. Les coûts d'achat généralement plus élevés sont compensés par une

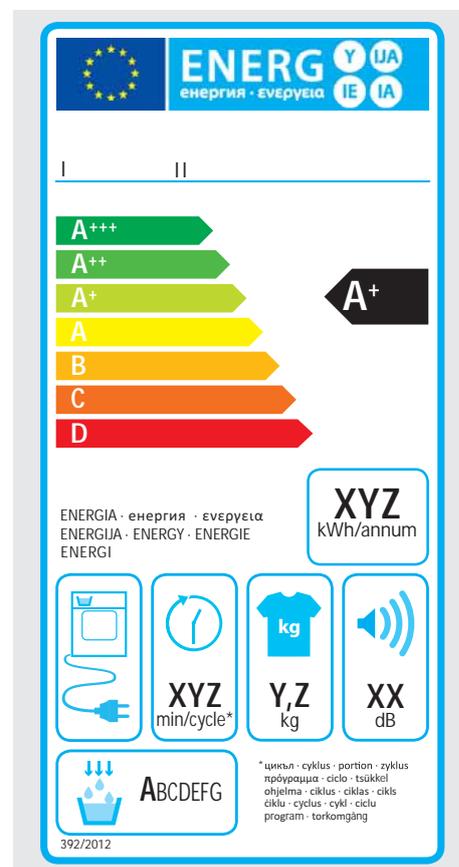


Illustration 79: Etiquette énergie des sèche-linge.

consommation d'électricité plus faible. Lorsqu'un ancien appareil est hors service, cela ne vaut souvent pas le coup de le réparer. L'évolution éclair des appareils ménagers efficaces permet même de remplacer des appareils encore fonctionnels par de nouveaux appareils pour économiser de l'électricité.

L'énergie grise, c'est-à-dire la dépense d'énergie pour la fabrication, le transport, le stockage, la vente et l'élimination d'un appareil ménager, est difficile à estimer. Toutefois, même cette énergie est plus ou moins rapidement compensée selon le type d'appareil. Il convient d'être prudent avec les appareils encastrables. Le système de mesure en application jusqu'à 1995 en Suisse réglementait la dimension des appareils, la dimension de base étant 55-60-90 cm (largeur de l'élément – profondeur – hauteur). Lors du remplacement d'un ancien appareil encastré, il faut donc bien étudier ses dimensions si l'on ne souhaite pas rénover toute la cuisine. Dans certaines conditions, il peut même s'avérer impossible d'acheter l'appareil le plus performant.

#### Autres appareils

Pour de nombreux autres appareils, il existe également des étiquettes énergie, par exemple pour les téléviseurs et les machines à café. Dans le cas des aspirateurs, ce n'est pas la puissance absorbée qui est la grandeur de référence pour un bon résultat d'aspiration, mais l'efficacité d'aspiration. Celle-ci dépend notamment de la brosse de tête, du tuyau d'aspiration et de la configuration des voies d'air. De nombreuses sociétés font la publicité d'aspirateurs «puissants» en indiquant des valeurs de puissance élevées. Cependant, même des aspirateurs ayant des valeurs en watts relativement faibles peuvent faire preuve d'une très bonne efficacité d'aspiration. Par principe, il est intéressant de comparer la consommation électrique non seulement en fonctionnement mais également en veille. Les appareils qui présentent typiquement une consommation en veille sont les ordinateurs et leurs périphériques, les téléviseurs, les lecteurs DVD, les chaînes hi-fi et les machines à café. Dans le cas de

ces appareils, il est intéressant d'envisager des possibilités de désactivation complète. Des dispositifs de mise hors tension manuels existent, ainsi que des dispositifs de mise hors tension automatiques, des commutateurs à distance et des programmeurs, qui se différencient en termes de commande et de prix. Certains dispositifs de mise hors tension (p.ex. blocs multiprises maître-esclave) ont même besoin d'électricité, de sorte que l'économie d'énergie, avec ces systèmes, n'est pas si importante.

#### Bloc multiprises avec interrupteur.

Avantage: lorsque le bloc est mis hors tension, tous les appareils raccordés sont également entièrement coupés du secteur. Inconvénient: l'interrupteur n'est parfois pas facile à atteindre. En variante, on peut utiliser un bloc multiprises avec interrupteur souris ou une prise avec interrupteur radio. Dispositifs de mise hors tension automatiques, tels que le bloc multiprises maître-esclave: par la mise hors tension de l'appareil principal (maître), tous les autres appareils raccordés sont également mis hors tension. Ainsi, lorsque le PC en tant qu'appareil principal est mis hors tension, l'imprimante, le moniteur, le modem etc. sont également mis hors tension. L'appareil principal reste toutefois relié au secteur et continue de consommer l'énergie de veille. De ce fait, ainsi qu'en raison d'une consommation propre du bloc multiprises, l'économie d'énergie n'est pas aussi élevée que dans le cas d'un bloc multiprises manuel. Ces blocs multiprises existent également avec télécommande ou interrupteur de proximité, fonctionnant à l'aide d'un détecteur de présence. Lors de l'achat d'un dispositif de mise hors tension automatique, il convient de veiller à sa consommation propre, qui doit rester inférieure à 0,5 W. Dans le cas des programmeurs, il est possible de définir des plages horaires dans lesquelles l'appareil raccordé est relié au secteur.

**Informations complémentaires**  
[www.energyday.ch/images/Altgeraete\\_A5\\_DE\\_web.pdf](http://www.energyday.ch/images/Altgeraete_A5_DE_web.pdf)  
[www.topten.ch](http://www.topten.ch)



Illustration 80: Commutateurs programmables et à actionnement manuel.

## Eclairage

### Qu'est-ce que la lumière?

La lumière est un rayonnement électromagnétique auquel notre œil est sensible. La plage des longueurs d'onde commence à environ 380 nm et s'étend jusqu'à 780 nm; c'est donc une très petite zone de l'ensemble du spectre électromagnétique du rayonnement solaire (illustr. 80). La plage du rayonnement visible est entourée par le rayonnement ultraviolet (courtes longueurs d'onde) et le rayonnement infrarouge (longues longueur d'onde).

### Grandeurs techniques relatives à la lumière

La lumière est émise par une source lumineuse et vient frapper les objets, les murs, les plafonds et les sols. La quantité de lumière est définie par le flux lumineux  $\Phi$  en lumens (lm). Etant donné que les sources lumineuses rayonnent différemment dans différentes directions, le flux lumineux est lié à la grandeur spatiale de l'angle solide  $\Omega$  en stéradians (sr). La grandeur tech-

nique qui en résulte est l'intensité lumineuse  $I$  en candela (cd). Elle est la seule grandeur technique relative à la lumière dans le système d'unités international. Si l'on rapporte les deux grandeurs  $\Phi$  et  $I$  à la surface frappée par le rayonnement, on obtient deux autres grandeurs techniques relatives à la lumière: la luminance  $L$  (cd/m<sup>2</sup>) donne une indication sur une impression de clarté. Elle est la seule grandeur relative à la lumière qui peut être perçue par l'homme. L'éclairement  $E$  (lm/m<sup>2</sup>) est documenté dans la norme SN EN 12464-1 Eclairage des lieux de travail, pour de nombreux domaines de travail.

### Sources lumineuses – Grandeurs caractéristiques de différentes lampes

Pour évaluer et comparer les sources lumineuses sur le plan énergétique, on peut utiliser différentes grandeurs caractéristiques. La première est la **puissance absorbée** en watts. Il est intéressant de déterminer quelle proportion de la puissance électrique absorbée est effectivement convertie en lumière. L'**efficacité lumi-**

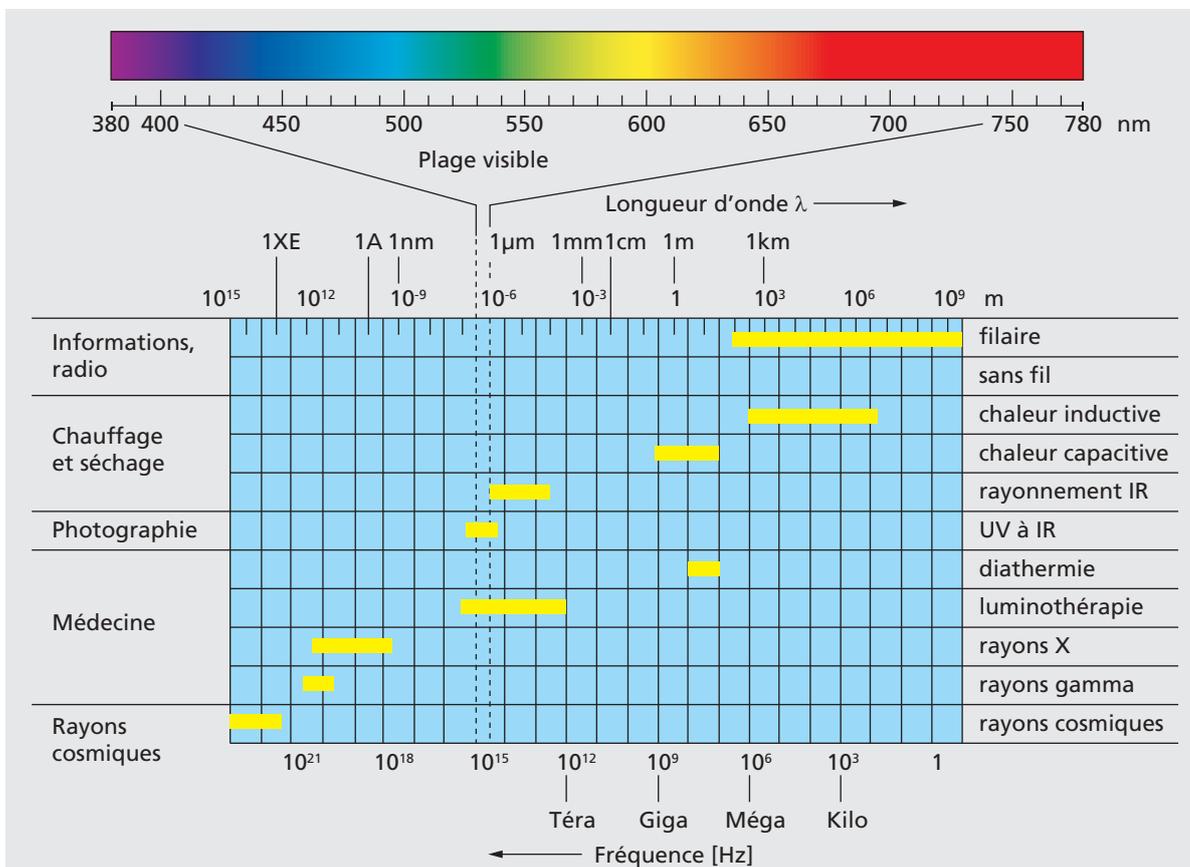


Illustration 81: Spectre du rayonnement électromagnétique. Source: Handbuch für Beleuchtung; Lange

**Illustration 82: Rapport entre les grandeurs techniques relatives à la lumière.** Flux lumineux  $\Phi$  (lumen), Intensité lumineuse  $I$  (candela), Eclairement  $E$  (lumen/m<sup>2</sup>), Luminance  $L$  (candela/m<sup>2</sup>). Source: *Licht-technische Grundlagen*; ADB

**Illustration 83: Flux lumineux en lumen, 2 Eclairement en lux, 3 Luminance en candela par unité de surface, 4 Degré de réflexion.** Source: *Handbuch für Beleuchtung*; Lange

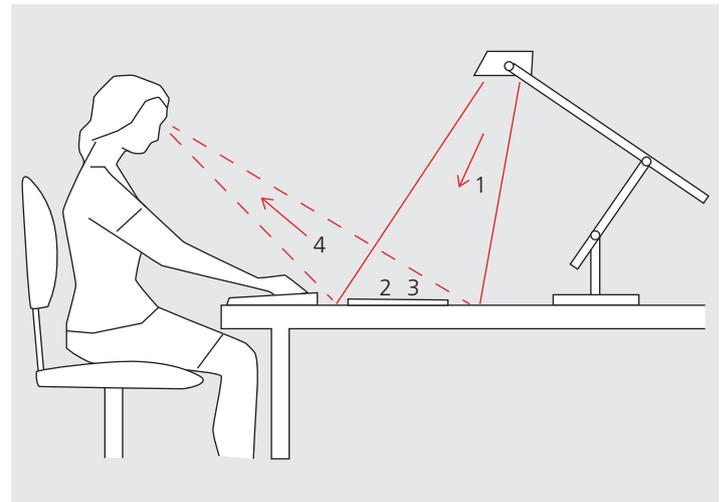
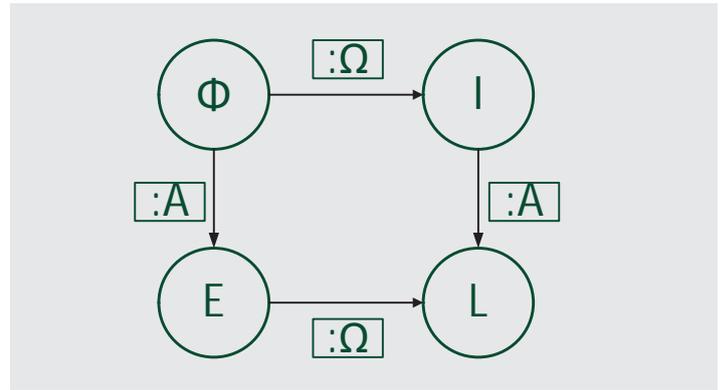
**Tableau 21: Couleurs de lumière ou températures de lumière de lampes fluorescentes (catalogue Osram).**

**Illustration 84: Systématique des sources lumineuses avec exemples.**

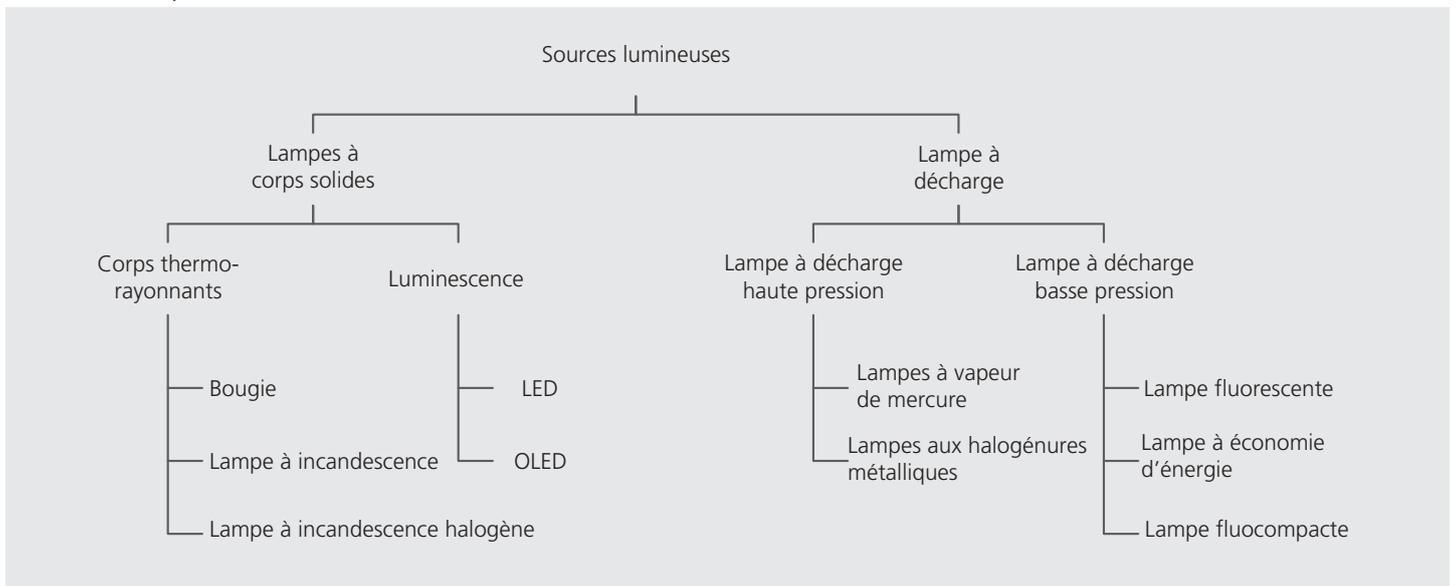
**neuse** est le facteur du flux lumineux sur la puissance électrique (lumen/watt).

La **température de couleur** d'une source lumineuse est mesurée en kelvins. Lorsqu'un corps noir est lentement chauffé, son aspect traverse les couleurs rouge foncé, rouge, orange, jaune, blanc à bleu clair. Imaginons un morceau de fer à la forge: plus la température du fer est élevée, plus son incandescence est blanche. La température de couleur d'une source lumineuse est la température que prendrait un corps noir s'il était chauffé à cette température. Plus la température de couleur est élevée, plus la lumière est blanche (froide). La lumière blanche se différencie en plusieurs tons de blanc: blanc chaud, blanc neutre et blanc lumière du jour (tabl. 21).

L'**indice de rendu des couleurs**  $R_a$  donne des indications sur la qualité de rendu de la couleur d'un objet sous la lumière d'une source lumineuse donnée. La valeur maximale de  $R_a$  est 100. Elle dépend principalement du spectre de la source lumineuse. Par exemple, s'il manque une couleur dans le spectre d'une source lumineuse, un corps de cette couleur apparaît gris. La source lumineuse ayant le meilleur indice de rendu des couleurs est le soleil. Son spectre est continu, c'est-à-dire qu'il rayonne dans chaque plage de longueurs d'onde entre 380 et 780 nanomètres de rayonnement, et possède ainsi une valeur  $R_a$  de 100. Pour déterminer l'indice de



Désignation	Température de couleur en Kelvin [K]
Blanc chaud	2700 K à 3300 K
Blanc neutre	4000 K
Blanc lumière du jour	5400 K à 8000 K



rendu des couleurs, on utilise huit couleurs test respectivement éclairées avec une source lumineuse de référence ( $R_a=100$ ) et avec la source lumineuse à tester. Plus les différences sont faibles, plus l'indice de rendu des couleurs de la source lumineuse est bon.

La couleur d'une source lumineuse détermine uniquement l'aspect colorimétrique, et non la qualité du rendu de la couleur. Une lampe à incandescence de 2700K (blanc chaud) possède un indice de rendu des couleurs  $R_a=100$ , tandis qu'une lampe fluorescente de 4000 K (blanc neutre) atteint un indice de rendu des couleurs plus faible de maximum  $R_a=90$ .

La **durée de vie** de la source lumineuse dépend de son type et de son exploitation. Dans le cas des corps thermorayonnants et des lampes à économie d'énergie, la durée de vie moyenne est indiquée. Celle-ci désigne le temps jusqu'à ce que 50 % des lampes d'une installation d'éclairage soient hors d'usage. Dans le cas des lampes à décharge, la durée de vie utile est indiquée. Outre les lampes hors d'usage, la durée de vie utile prend également en compte la réduction du flux de lumière d'une installation d'éclairage après une certaine durée d'exploitation. Celle-ci ne doit pas être inférieure aux valeurs minimales. Source: licht.de



Illustration 85:  
Lampe à incandescence universelle (Osram)

Tableau 22: Puissance, flux lumineux et efficacité lumineuse de lampes à incandescence.

Puissance [W]	Flux lumineux [lm]	Efficacité lumineuse [lm/W]
15	100	7
25	220	9
40	415	10
60	710	12
75	935	12

### Lampe à incandescence et lampe à incandescence halogène

Les sources de lumière qui produisent de la lumière à partir de feu, ainsi que les lampes à incandescence universelles aujourd'hui interdites, entrent dans la catégorie des corps thermorayonnants. Dans ceux-ci, l'électricité amène un filament de tungstène à incandescence. Une partie du rayonnement électromagnétique ainsi

créé se situe dans la zone visible et est donc perçu comme de la lumière. Comme l'indique le nom «corps thermorayonnant» indiqué ci-dessus, le maximum de rayonnement se situe dans la zone infrarouge. En d'autres termes, ces lampes produisent non seulement de la lumière, mais également une grande quantité de rayonnement thermique. Environ 95 % de la puissance fournie est restituée sous forme de chaleur (puissance dissipée). L'**efficacité lumineuse** de la lampe à incandescence est ainsi très faible.

La **température de couleur** d'une lampe à incandescence universelle est relativement faible (2700 K) et est ainsi perçue comme blanc chaud. En raison de son spectre continu, la lampe à incandescence possède des propriétés de rendu des couleurs exceptionnelles et atteint un indice de rendu des couleurs de  $R_a=100$ . Une lampe à incandescence universelle n'a besoin d'aucun équipement supplémentaire et son intensité est facilement variable. Toutefois, une baisse de tension entraîne une baisse disproportionnée du flux lumineux. Cela a des conséquences sur le plan énergétique: lorsque la puissance est réduite de moitié, le flux lumineux baisse d'environ 10 %.

Outre l'inconvénient de la faible efficacité lumineuse et du comportement de variation, la **durée de vie** relativement courte d'environ 1000 heures pose également problème. Lors du chauffage du filament de tungstène d'une lampe à incandescence universelle, une partie des atomes s'évapore et se heurte à la paroi du bulbe en verre. Etant donné que ce phénomène n'est pas uniforme, le filament devient plus fin à certains endroits, jusqu'à la rupture. La tension d'alimentation et les chocs influent également sur la durée de vie d'une lampe à incandescence.

La **lampe à incandescence halogène** représente un développement de la lampe à incandescence. Une pression de gaz accrue dans le bulbe permet de contrer l'évaporation des particules de tungstène, ce qui nécessite des dimensions de bulbe plus petites. L'ajout d'un gaz halogène entraîne dans le bulbe une sorte de processus cy-



Illustration 86:  
Lampes à incandescence halogène

clique: le tungstène s'évapore et se heurte à la paroi du bulbe en verre; à proximité de la paroi du bulbe, les atomes de tungstène se lient aux atomes de l'halogène. Les liaisons ainsi produites reviennent par convection à proximité du filament de tungstène incandescent où, en raison des hautes températures, elles se désagrègent à nouveau, redéposant ainsi des atomes de tungstène sur l'enroulement de tungstène. Les atomes d'halogène libérés sont de nouveau disponibles pour un nouveau cycle. L'efficacité lumineuse des lampes à incandescence halogène n'est pas beaucoup plus élevée que celle des lampes à incandescence universelles. De même, en termes de **température de couleur** et de **propriétés de rendu des couleurs**, la lampe à incandescence halogène est similaire à la lampe à incandescence universelle. Avec environ 3000 K, la température de couleur est légèrement supérieure, mais se situe toujours dans la zone du blanc chaud. Le spectre d'une lampe à incandescence halogène est également continu, ce qui lui confère des propriétés de rendu des couleurs exceptionnelles. Le comportement de variation est aussi défavorable sur le plan énergétique que celui de la lampe à incandescence universelle. Pour les lampes à incandescence halogène basse tension, des équipements sont nécessaires.

La **durée de vie** d'environ 2000 à 5000 heures des lampes à incandescence halogène dépend fortement de la tension à laquelle elles sont exploitées. Une tension relativement élevée permet certes d'avoir plus de lumière, mais réduit de façon disproportionnée la durée de vie. Une tension plus faible allonge la durée de vie mais est moins efficiente.

#### Lampes à décharge de gaz

Dans les lampes à décharge haute pression, la décharge de gaz est générée dans un récipient de brûleur entre deux électrodes. Un arc de décharge permet la formation d'un plasma, le remplissage étant ainsi partiellement ionisé. De hautes températures et une haute pression règnent dans le récipient de décharge. Les lampes à décharge haute pression comprennent les

lampes à vapeur de mercure, les lampes aux halogénures métalliques et les lampes à vapeur de sodium. Selon le type et le remplissage du brûleur, les grandeurs caractéristiques des lampes sont différentes. L'efficacité lumineuse varie entre 50 et 114 lm/W. Lors des processus de décharge dans les gaz, seules certaines couleurs de lumière sont produites. A l'inverse de celui des corps thermorayonnants (spectre continu), le spectre se compose de lignes individuelles relativement espacées. Différents éléments dans le brûleur permettent d'obtenir les températures de couleur (blanc chaud et blanc neutre) et le rendu des couleurs ( $R_a$  80 ou  $R_a$  90) souhaités. On observe également de grandes différences en termes de durée de vie: 5000 à 10000 heures. Les lampes aux halogénures métalliques ont besoin, pour fonctionner, d'un dispositif d'allumage et d'un ballast, et requièrent un temps d'allumage de quelques minutes ainsi qu'une phase de refroidissement plus longue avant d'être rallumées

#### Lampes à décharge basse pression

Les lampes à décharge basse pression comprennent les lampes fluorescentes, qui portent des noms différents selon leur structure. Le terme de lampe fluorescente désigne une lampe en forme de tige. Les lampes fluocompactes ainsi que les lampes à économie d'énergie sont également des lampes fluorescentes, qui sont pliées au moins une fois ou, dans le cas de la lampe à économie d'énergie, sont similaires à

Tableau 23: Flux lumineux et efficacité lumineuse de tubes fluorescents.

Efficacité lumineuse de tubes T8		
Puissance [W]	Flux lumineux [lm]	Efficacité lumineuse [lm/W]
18	1350	75
36	3350	93
58	5200	90
Efficacité lumineuse de tubes T5		
Puissance [W]	Flux lumineux [lm]	Efficacité lumineuse [lm/W]
28	2600	93
35	3320	95
49	4310	88
54	4450	82
80	6150	77



Illustration 87: Lampes à décharge haute pression.

une lampe à incandescence. Comme les lampes à décharge haute pression, les lampes à décharge basse pression ont également besoin d'un ballast pour limiter leur courant.

Les lampes fluorescentes sont des lampes basses pression à vapeur de mercure. Les atomes de mercure y sont excités par l'application d'une tension électrique, de manière à émettre un rayonnement UV. Ce rayonnement UV est un rayonnement électromagnétique en dehors de la zone visible. Grâce à un luminophore également placé à l'intérieur des tubes de verre, le rayonnement UV produit se décale dans la zone visible.

Dans le cas des lampes fluorescentes en forme de tige, on utilise des lampes ayant deux diamètres différents. Les lampes

ayant un diamètre de 26 mm sont appelées lampes T8 ou T26 et celles ayant un diamètre de 16 mm sont appelées lampes T5 ou T16. Les très vieilles installations d'éclairage sont encore équipées de lampes fluorescentes ayant un diamètre de 38 mm (T12). Elles ne sont toutefois plus utilisées aujourd'hui. L'efficacité lumineuse varie en fonction du diamètre et de la longueur du tube de verre, ainsi que du luminophore utilisé. Les températures de couleur des lampes fluorescentes peuvent être influencées par le luminophore à l'intérieur du verre. Elles atteignent en général entre 2700 K (blanc chaud) et 6500 K (blanc lumière du jour). Le rendu des couleurs dépend également de la couche lumineuse. Dans le cas des lampes fluorescentes à 3 bandes, le rayonnement UV généré lors de la décharge est principalement converti en lumière bleue, verte et rouge. Le mélange de ces trois couleurs de lumière donne une lumière blanche. Toutefois, cela ne permet d'obtenir que des indices de rendu des couleurs de Ra 80 au maximum. Les lampes fluorescentes à 5 bandes peuvent atteindre des indices de rendu des couleurs jusqu'à Ra 90. Les lampes fluocompactes sont des lampes fluorescentes pliées au moins une fois. Grâce à cette forme plus compacte, elles peuvent par exemple être utilisées dans des spots encastrés. Toutefois, ces sources lumineuses ont l'inconvénient de n'at-

Tableau 24: Efficacités lumineuses de lampes à économie d'énergie.

Puissance [W]	Flux lumineux [lm]	Efficacité lumineuse [lm/W]
8	400	50
14	740	53
23	1400	61
30	1940	65

Tableau 25: Efficacités lumineuses de lampes fluocompactes.

Puissance [W]	Flux lumineux [lm]	Efficacité lumineuse [lm/W]
18	1200	67
55	4800	87
80	6500	81



Illustration 89: Lampes à économie d'énergie.

Flux lumineux relatif en [%] par rapport à la valeur finale

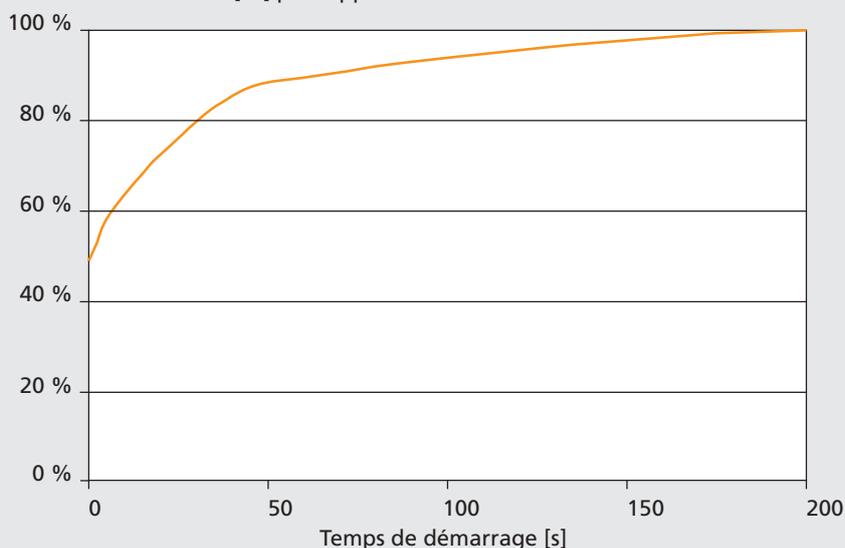


Illustration 88: Evolution du flux lumineux après l'allumage, pour un démarrage normal. Source: Osram



Illustration 90: Lampes fluocompactes.

teindre leur flux lumineux maximal que quelques secondes après l'allumage (illustr. 88). La lampe à économie d'énergie dispose, à l'inverse de la lampe fluorescente et de la lampe fluocompacte, d'un ballast intégré dans le socle.

### Electroluminescence

Les LED sont des éléments semi-conducteurs, c'est-à-dire des corps solides qui, du point de vue électrique, peuvent être considérés comme conducteurs et non conducteurs. Dans le cas d'une diode, l'élément semi-conducteur présente une conductivité dépendante du sens. La diode lumineuse se compose de deux couches: le semi-conducteur de base négatif avec un excédent d'électrons et une couche mince semi-conductrice positive avec un manque d'électrons (souvent appelé «trou»). Lorsqu'une tension est appliquée, les électrons en excès de la première couche et les «trous» de l'autre couche migrent les uns vers les autres et se recombinent en une couche barrière. Cette recombinaison se déroule dans une LED en produisant un rayonnement. La longueur d'onde et ainsi également la couleur de ce rayonnement dépendent du matériau semi-conducteur. Les LED rouges, vertes, oranges et jaunes ont déjà été développés dans la seconde moitié du siècle passé. La production de lumière LED blanche peut s'effectuer de deux façons différentes, ces deux manières ayant toutes deux été développées plus tard. La LED bleue à grand succès commercial a été développée dans les années 1990. Le procédé utilise la conversion par luminescence, lors de laquelle une couche lumineuse de phosphore est vaporisée au-dessus d'une LED bleue. Cette couche transforme la lumière bleue de la LED en lumière blanche. Une autre possibilité de générer de la lumière blanche au moyen de LED est le mélange additif des couleurs. Dans ce cas, on mélange de la lumière rouge, verte et bleue (RGB) de manière à produire de la lumière blanche. D'autres mélanges de couleurs peuvent également être réalisés. On dénombre également de nombreuses lampes à LED «Retrofit» sur le marché, ayant la

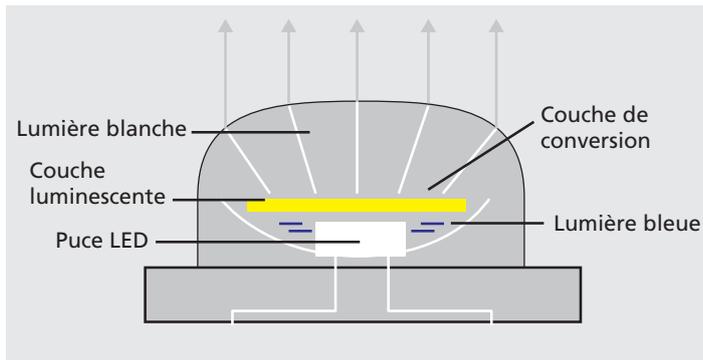


Illustration 91: Production de lumière blanche au moyen d'une LED bleue.

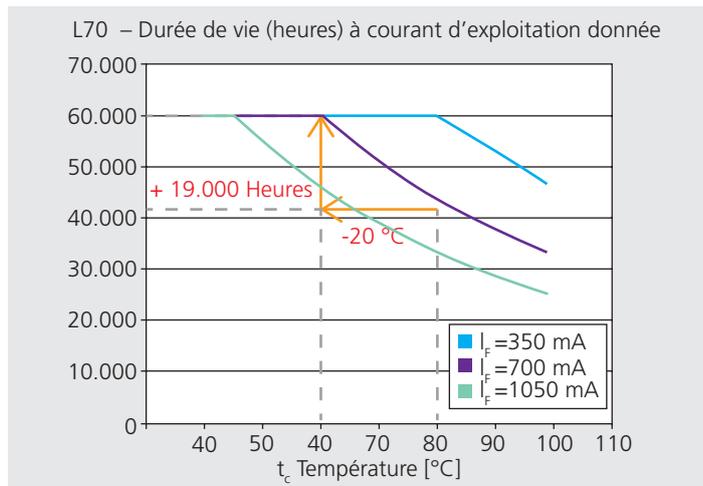


Illustration 92: Réduction de la durée de vie en fonction de la température. Source: Vossloh-Schwabe

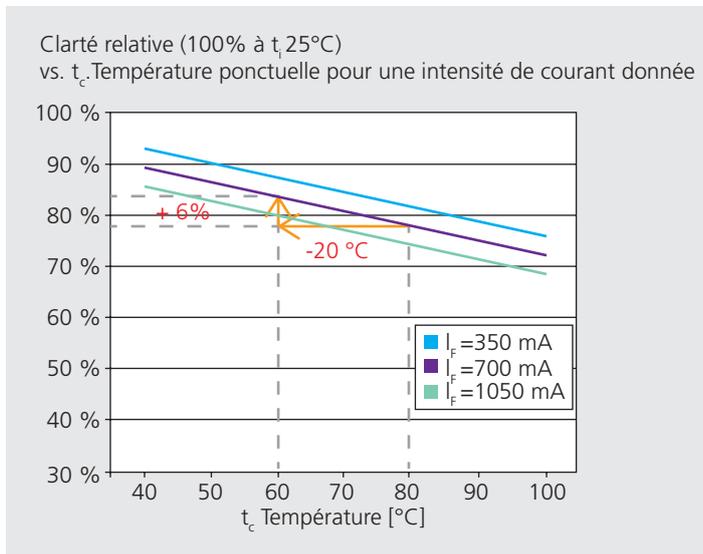


Illustration 93: Réduction de la clarté. Source: Vossloh-Schwabe

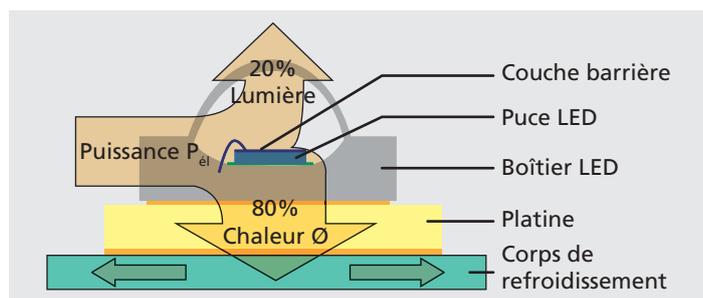


Illustration 94: Flux d'énergie d'une LED.

même structure que les sources lumineuses traditionnelles, donc aptes à remplacer les anciens éclairages. Dans ce cas, il ne faut pas oublier que le flux lumineux et la durée de vie dépendent de la température.

L'illustration 94 montre la structure schématique d'une lampe LED. Généralement, la structure de refroidissement est la partie de la lampe la plus visible et la plus encombrante, notamment dans le cas des lampes de remplacement.

En d'autres termes, lors du remplacement de sources lumineuses conventionnelles par des lampes Retrofit, il faut vérifier très précisément si cela est réellement possible. Le moyen d'éclairage dans la lampe doit être entouré d'air, ce qui interdit quasiment toute utilisation dans des éclairages fermés. Dans le cas des lampes encastrées également, il faut veiller à ce que suffisamment de place soit disponible.

L'utilisation de lampes LED est donc à privilégier. Avec ces lampes, le corps de refroidissement ou le refroidissement actif (par ventilateur) est construit de telle sorte

que la puce LED intégrée fonctionne à la température optimale. Cela permet de garantir une durée de vie élevée et un flux lumineux important (et ainsi également une bonne efficacité) des LED.

### Luminaires

Les luminaires constituent l'entourage d'une source lumineuse. Ils sont équipés de dispositifs, accueillent des moyens d'éclairage et doivent être reliés à la source de courant. En outre, ils permettent de dévier la lumière à l'aide de réflecteurs, de l'adoucir à l'aide de diffuseurs (p. ex. abat-jour) et de la rendre non éblouissante à l'aide de grilles. Pour une systématique des luminaires, on se base sur différents critères:

- Type de montage: luminaire suspendu, luminaire en applique, luminaire encastré
- Lieu de montage: plafonnier, luminaire mural, luminaire au sol, luminaire d'intérieur, luminaire d'extérieur, lampe antidéflagrante
- Caractéristique de rayonnement: spot encastré, lèche-mur, lampe à distribution

Illustration 95:  
Lampes Retrofit.



Tableau 26: Exemples de sources lumineuses.

	LED	Lampe à incandescence	Halogène basse tension	Halogène haute tension	Lampe fluo-compacte	Lampe fluo-rescente	Lampe à décharge haute pression
<b>Puissance (watt)</b>	2–48	100	20–100	80–1000	9–55	24–54	20–400
<b>Flux lumineux (lumen)</b>	160–4800	1380	320–2200	1450–22 000	600–4800	1750–4450	18 000–35 000
<b>Efficacité lumineuse (lumen par watt)</b>	100	15	22	22	78	90	114
<b>Couleur de la lumière</b>	Différente	Blanc chaud	Blanc chaud	Blanc chaud	Blanc chaud, blanc neutre, blanc lumière du jour	Blanc chaud, blanc neutre, blanc lumière du jour	Blanc chaud, blanc neutre
<b>Température de couleur (Kelvin)</b>	1700–10 000	2700	3000	3000	2700–6500	2700–6500	3000–4200
<b>Rendu des couleurs</b>	80–90	100	100	100	80–82	89	81–90
<b>Durée de vie (heures)</b>	50 000	1000	4000	2000	12 000–13 000	18 000–20 000	5000–15 000

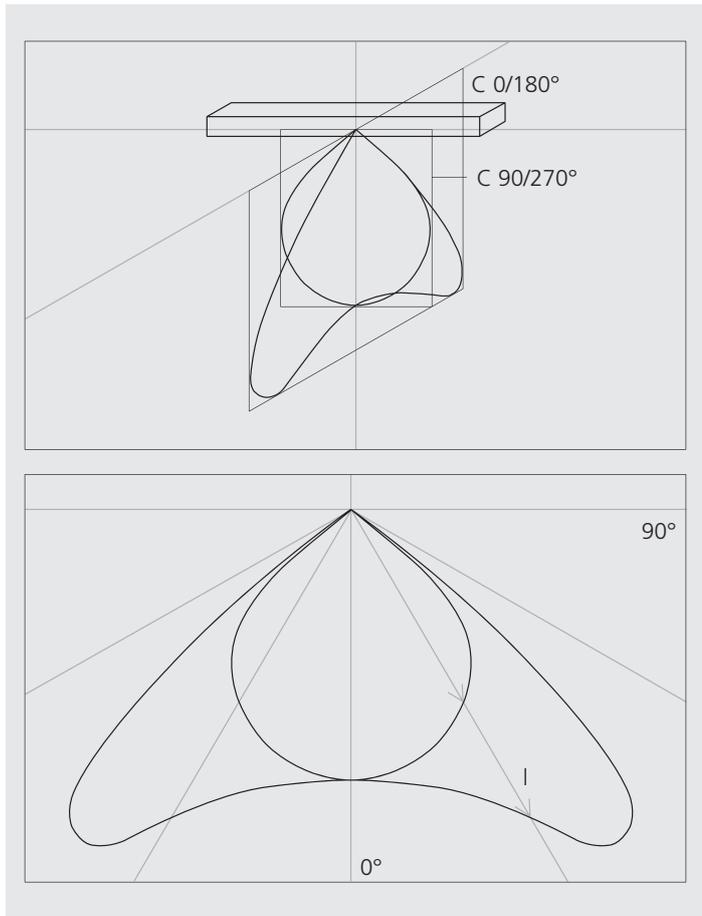


Illustration 96:  
Guide Erco.

indirecte, spot, luminaire linéaire, luminaire à rayonnement libre

Les grandeurs caractéristiques des luminaires sont le rendement du luminaire  $\eta_L$  et le rendement en service du luminaire  $\eta_{LB}$ . Le rendement du luminaire est le rapport du flux lumineux du luminaire et du flux lumineux de la lampe utilisée. Etant donné que le flux lumineux de certains moyens d'éclairage dépend de la température (p. ex. lampe fluorescente), c'est souvent le rendement en service qui est indiqué. Il s'agit du rapport du flux lumineux sortant de la lampe à la température ambiante  $t_U$  et du flux lumineux de la lampe à  $t_0$ .  $t_0$  est la température ambiante à laquelle se rapportent les données des fabricants pour une lampe ouverte. Celle-ci s'élève, sauf mention contraire, à  $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ . Ce rendement en service n'est pas réellement un rendement, car il peut également prendre une valeur supérieure à un. Certaines lampes T5 possèdent leur maximum à une température ambiante d'environ  $38^\circ\text{C}$ , comme le montre l'illustration 93. La courbe de distribution de l'intensité lumineuse d'un luminaire est également une

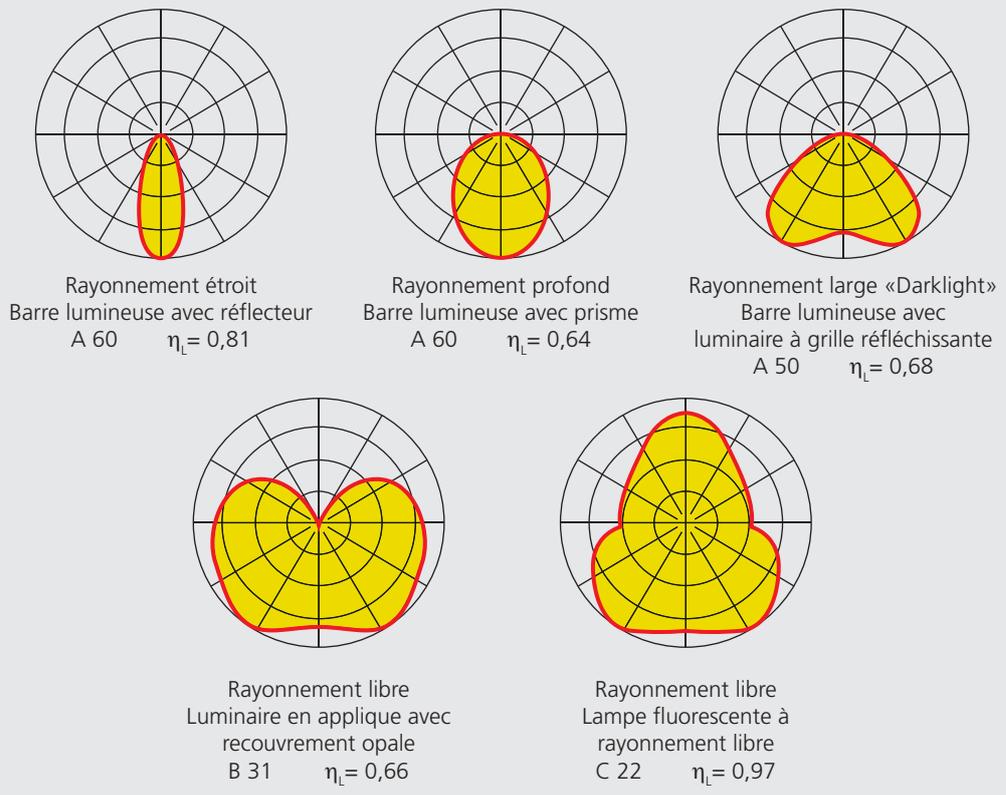


Illustration 97:  
Courbes de distribu-  
tion de l'intensité  
lumineuse de lumi-  
naires.

caractéristique des luminaires. Elle indique dans quelle direction la lampe émet quelle intensité lumineuse. Cette valeur est intégrée dans un système de coordonnées polaires.

### Conseils pour la planification d'éclairages efficaces

Bien entendu, il est préférable d'utiliser des sources lumineuses ayant une efficacité lumineuse élevée. Lors du choix de la source lumineuse, il faut toutefois prendre en considération son lieu d'utilisation. Les lampes fluorescentes T5 possèdent leur flux lumineux maximal à environ 38°C (illustr. 98). Ce moyen d'éclairage n'est donc pas approprié à une utilisation dans une halle ouverte ou à l'extérieur.

Dans les zones dans lesquelles la fréquence de commutation est élevée, telles que les WC ou les couloirs avec détecteurs de présence, il est intéressant d'utiliser des moyens d'éclairage qui atteignent immédiatement leur flux lumineux maximal et ne mettent pas plusieurs minutes à fournir leur puissance totale. Bien que sur ce plan, les lampes fluocompactes soient devenues bien meilleures, elles n'égalent toutefois jamais les avantages des LED. Celles-ci démarrent avec un flux lumineux maximal et peuvent, dans de brefs intervalles de temps, être allumées et éteintes. Cependant, même avec les LED, il est important de veiller à les utiliser de façon judicieuse. Par exemple, un tube de LED doté d'une puissance de système de 25 W est proposé

en remplacement d'une lampe fluorescente de 36 W (T8). Cette lampe fluorescente possède un flux lumineux de 3350 lm, mais la LED «de remplacement» n'atteint que 1850 lm.

Le choix des luminaires dépend également de leur lieu d'utilisation, mais l'objectif premier doit être l'orientation de la lumière vers l'endroit où elle est effectivement requise. Cela n'implique pas forcément de renoncer à des éléments de forme, de décoration et d'ambiance, tels que la lumière indirecte. Il faut parvenir à créer une harmonie en choisissant soigneusement la source lumineuse et le luminaire.

Le choix de la couleur ainsi que le degré de réflexion des murs et plafonds ont également une grande importance. La couleur des meubles doit également bien réfléchir la lumière.

### Sources

- [www.hea.de](http://www.hea.de) (version 2013)
- [www.topten.ch](http://www.topten.ch) (version 2013)
- [www.energieetikette.ch](http://www.energieetikette.ch) (version 2013)
- Handbuch für Beleuchtung; Editions Lange Ecomed

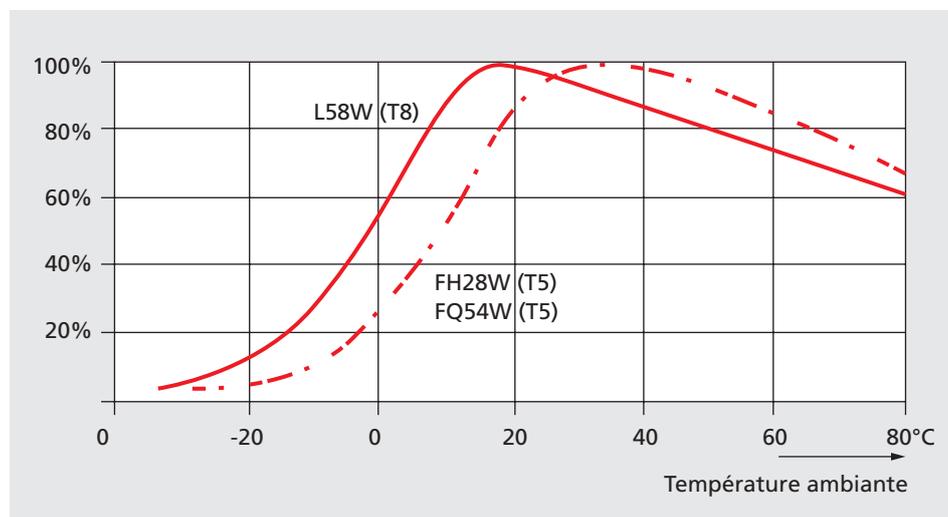


Illustration 98: Rapport à la température de lampes fluorescentes. Source: Osram.

## Armin Binz Photovoltaïque

### Le photovoltaïque en plein boom

Le photovoltaïque est en passe de devenir l'un des piliers de l'approvisionnement en électricité de demain, pour deux raisons principales:

1. La technologie a fait ses preuves. D'une part, les installations des années 80 fonctionnent encore sans problème. D'autre part, des solutions ont été apportées à un grand nombre de questions d'application, relatives par exemple à la sécurité d'exploitation, à la protection contre la foudre, aux risques d'incendie etc., solutions qui font aujourd'hui partie intégrante des éléments standards des installations.

2. Au cours des 30 dernières années, les prix des modules PV ont baissé de 20 % en moyenne à chaque doublement des installations photovoltaïques (illustr. 98). Etant donné que les coûts des modules représentent environ la moitié des coûts totaux d'une installation PV, cela s'est répercuté sur les coûts totaux des installations.

Cette tendance a déjà trouvé écho au niveau politique, dans les lignes directrices de la Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK) du printemps 2012, où il a été admis qu'à partir de 2020, les constructions nouvelles devraient «pouvoir au maximum à leur propre approvi-

sionnement en chaleur et à une part adéquate de leur électricité, sur toute l'année» et pour les rénovations de bâtiments, il conviendrait de tendre vers «un approvisionnement propre maximal en chaleur». La construction efficiente de demain implique par conséquent de faire des installations photovoltaïques sur les bâtiments une priorité.

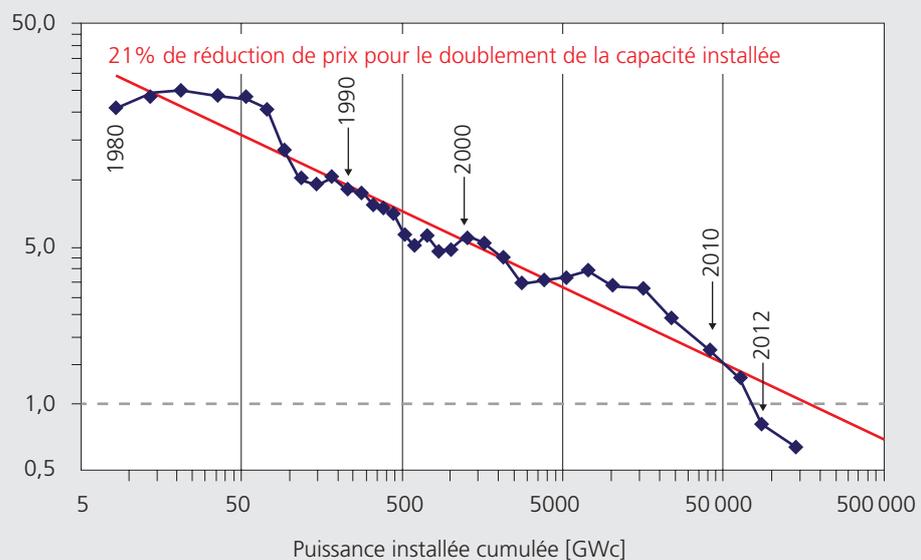
### La technologie

La multitude de cellules photovoltaïques permettant de transformer le rayonnement solaire en courant électrique continu peut être divisée grossièrement en deux groupes: les cellules à base de silicium cristallin avec des rendements (conversion du rayonnement solaire en électricité) de 12 à 23 % et les cellules amorphes ou à couche mince avec des rendements de 6 à 13 %. Les cellules cristallines représentent plus de 80 % du marché. Bien qu'elles soient légèrement plus coûteuses que les cellules à couche mince, leur baisse de prix et leur rendement plus élevé leur ont permis de dominer le marché.

Une installation photovoltaïque se compose de bien davantage que les cellules. Des groupes de cellules sont rassemblés en modules. Les modules sont l'unité de fabrication, de commercialisation et de montage de base des installations PV.

Illustration 99: Evolution des prix des modules PV (marché mondial) en euros par watt (estimation 2012). La droite montre la tendance de l'évolution des prix.  
Source: ISE 2014

Prix moyen des modules PV en Europe/Wc, 2012 [Euro par watt]



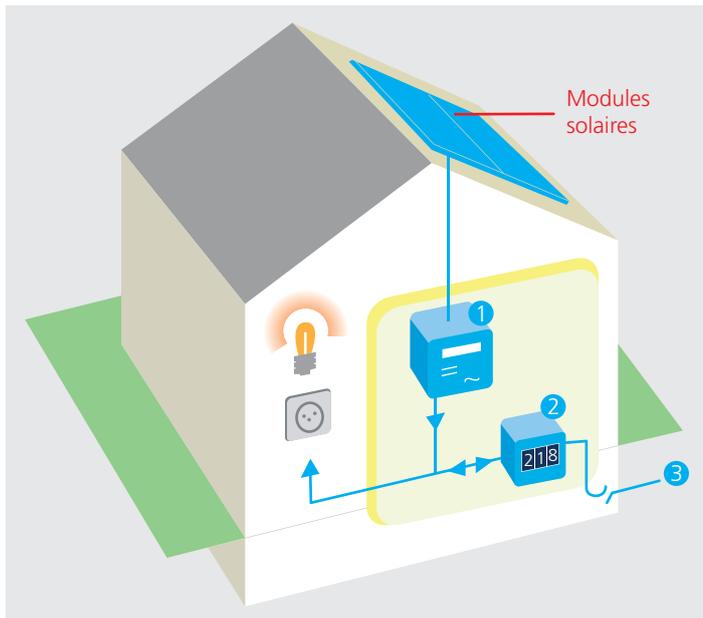


Illustration 100:  
L'installation PV typique raccordée au réseau sur le bâtiment.

Source: Swissolar.

1 = Onduleur

2 = Compteur d'électricité

3 = Injection d'électricité et achat d'électricité (réseau)

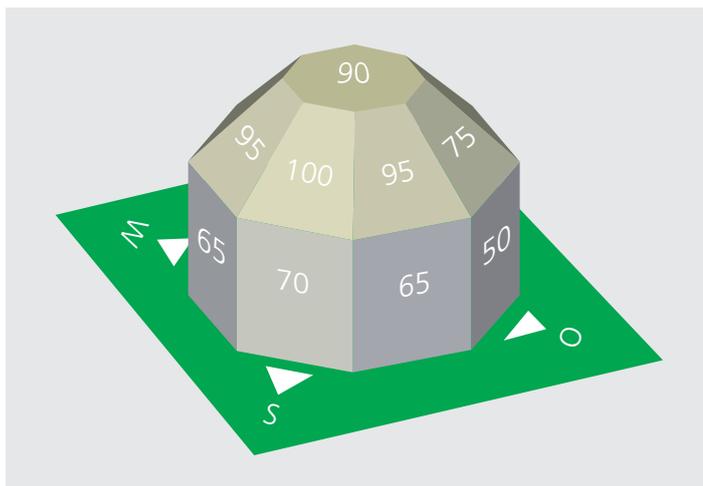


Illustration 101:  
Rapport entre la production d'électricité de modules PV et l'orientation.

Source: Swissolar.

Illustration 102: Projet vainqueur «Ca d'oro» du concours architectural pour la construction de l'Office de l'environnement et de l'énergie à Bâle. Panneaux de façade dotés de modules PV aux reflets dorés. Source: Architekturbüro Jessen + Vollenweider GmbH, Bâle



C'est pourquoi les rendements des modules sont plus significatifs et plus proches de la réalité que les rendements des cellules. Pour les modules dotés de cellules cristallines, ils sont de l'ordre de 14 à 21 % et pour les modules utilisant la technologie à couche mince, de l'ordre de 5 à 13 %. Les modules sont reliés électriquement pour former des chaînes, et des onduleurs convertissent le courant de manière à permettre un raccordement au réseau électrique. Les autres équipements requis sont le câblage résistant aux intempéries, les mesures de sécurité contre les risques d'incendie, la protection contre la foudre etc. ainsi qu'un dispositif de communication qui signale les données d'exploitation et les pannes. En outre, la totalité de l'installation doit être suffisamment résistante en termes de conception et de fixation au bâtiment (charges de vent).

### Photovoltaïque sur le bâtiment

Lorsque des bâtiments doivent être utilisés comme supports de panneaux photovoltaïques, il faut tout d'abord déterminer où les panneaux doivent être placés et comment ils doivent être orientés. L'illustration 101 montre la relation approximative entre les rendements des installations PV, l'inclinaison et l'orientation. Pour évaluer ces valeurs, il faut en outre prendre en compte le fait que l'électricité produite est en majeure partie injectée dans le réseau et doit ainsi correspondre à la demande d'autres utilisateurs ou à la demande respective du réseau. Aujourd'hui, sur le marché international de l'électricité, on note déjà des conséquences importantes de la production solaire d'électricité de pointe des installations photovoltaïques. Un rendement légèrement réduit en raison d'une orientation à l'est ou à l'ouest des modules permet de tomber pendant des périodes en dehors de la pointe de midi. Les façades sud fournissent certes 30 % de rendement annuel en moins que des cellules orientées de façon optimale, mais utilisées pour fournir de l'électricité hivernale particulièrement bienvenue, elles présentent un bilan néanmoins intéressant (dans les régions ensoleillées en hiver!). Cependant,



En ce qui concerne la problématique des variations selon les saisons, l'illustration 103 montre ce qu'il en est dans l'exemple d'une maison familiale Minergie A sur le Plateau suisse. Le standard Minergie A exige que le besoin en énergie pour le chauffage et la production d'eau chaude soit couvert par l'autoproduction d'énergie, dans le bilan annuel. La maison familiale présente un faible besoin en chaleur de chauffage. La période de chauffage est ainsi réduite à 5 mois d'hiver vraiment froids. Dans cette période, l'installation photovoltaïque ne contribue en réalité pas énormément à la couverture du besoin. Toutefois, étant donné qu'on dispose sur toute l'année d'une contribution de base au besoin en électricité pour la production d'eau chaude, l'éclairage et les appareils, on ne dégage malgré tout aucun excédent, même en période estivale. Si l'on regarde de plus près la courbe journalière en été, on peut observer qu'une injection dans le réseau est malgré tout nécessaire, car le besoin ne coïncide jamais avec la

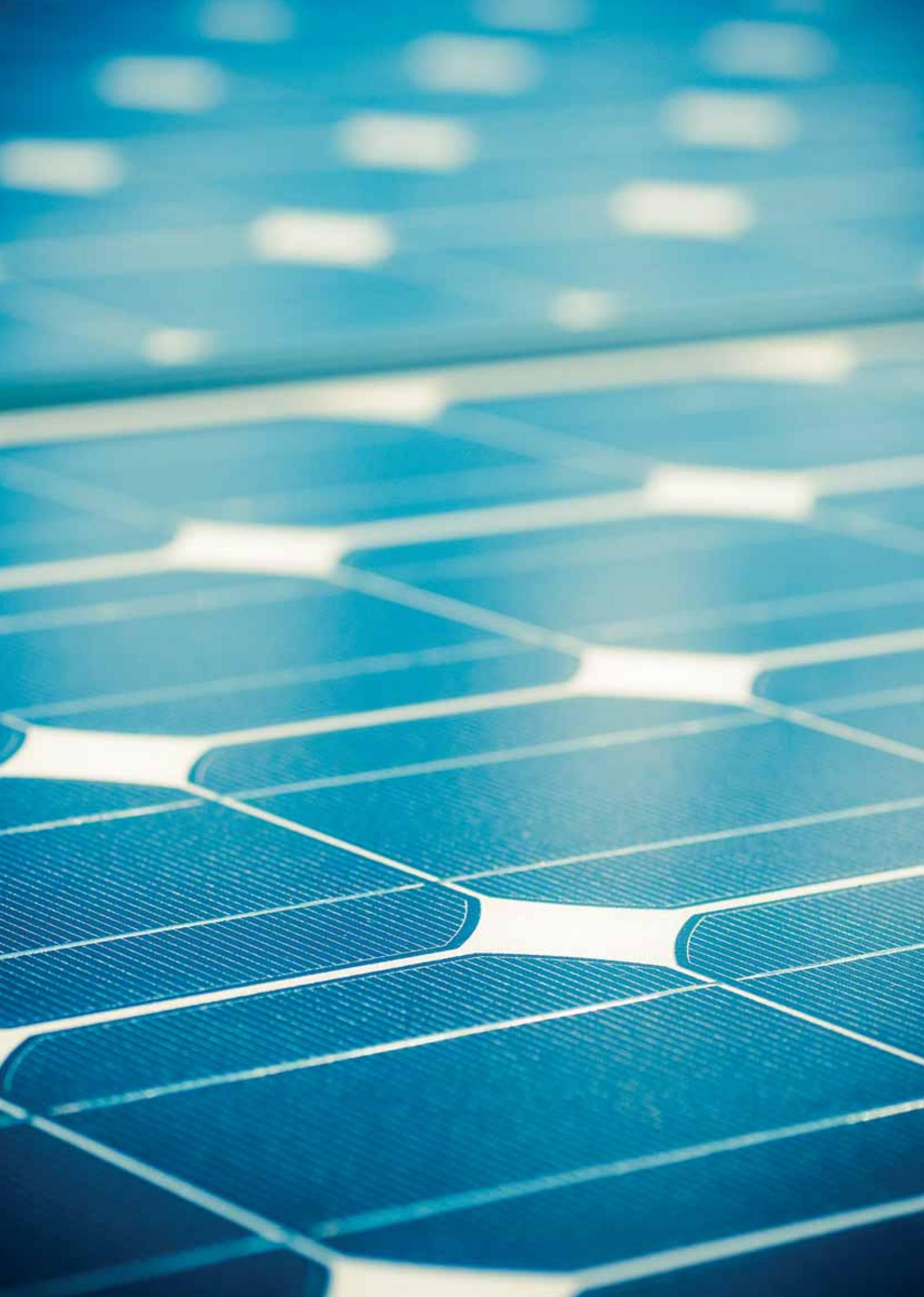
demande dans la maison. Le stockage et la régulation des différences journalières peuvent être assurés par des solutions beaucoup plus simples que la compensation des différences saisonnières. Le décalage des consommateurs dans la période de production de pointe (p.ex. lavage du linge et de la vaisselle à midi) et à l'avenir éventuellement également le stockage décentralisé d'électricité dans des batteries ou la charge de voitures électriques, doivent permettre de relever ces défis.

*Illustration 104:*  
Ombrage d'un parvis à l'aide de modules PV, centre communautaire de Ludesch, Autriche.  
Source: *Ertext Solar, Amstetten, Autriche.*



*Illustration 105:*  
Ecole professionnelle de Wolfhagen (Allemagne), abri avec des modules ASI-THRU (Schott) avec protection solaire intégrée. Prix solaire allemand 2011. Source: *HHS Planer + Architekten AG.*





# Energie grise

## Monika Hall Données

L'énergie intervient non seulement lors de l'exploitation d'un bâtiment, mais également dans les processus de fabrication, de transport et d'élimination des matériaux de construction qui le composent. Cette énergie est appelée énergie grise (embodied energy) ou encore dépense d'énergie cumulée. Pour comparer l'énergie grise de différents bâtiments, une base commune doit être trouvée. Les données disponibles dépendent de

- la base de données utilisée
- l'âge des données
- la durée d'amortissement utilisée des matériaux et composants
- les éléments de construction et composants pris en compte (tabl. 27)
- la manière dont les éléments de construction et composants sont pris en compte (tabl. 27)
- la période considérée
- le type de cycle de vie considéré (p.ex. cradle to grave, cradle to gate), voir encadré
- la pondération de l'agent énergétique (énergie primaire totale ou non renouvelable, unités de charge écologique, émissions de gaz à effet de serre etc.)

### Définition de l'«énergie grise»

L'énergie grise comprend, selon le cahier technique SIA 2032 «Energie grise», la dépense énergétique pour

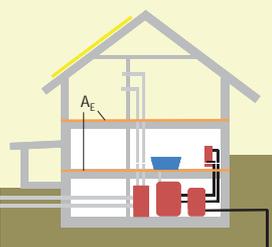
- l'extraction des matières premières
- la fabrication des différents matériaux, éléments de construction et composants
- le transport et le stockage et
- l'élimination des matériaux.

L'approche «cradle to grave» prend en compte le cycle de vie total des différents matériaux de construction. L'énergie grise est exprimée en énergie primaire non renouvelable (EP<sub>ren</sub>) et donne ainsi la mesure de la dépense de ressources non renouvelables au cours du cycle de vie d'un matériau de construction. Pour chaque matériau ou chaque composant, on se base sur une durée d'amortissement définie.

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• extraction de matières premières</li> <li>• Production et fabrication</li> <li>• Transport et stockage</li> </ul> <p style="text-align: center;">«cradle to gate»</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimination et recyclage</li> </ul> <p style="text-align: center;">«cradle to grave»</p>  |

Tableau 27: Bilan selon le cahier technique SIA 2032 «Energie grise».

Remarque: L'enveloppe de bâtiment se compose en principe d'éléments de construction ayant une teneur relative élevée en énergie grise. Lorsqu'elle présente de nombreux raccords, angles et arêtes, cela est encore renforcé. Une construction simple et compacte est donc préférable sur le plan de l'énergie grise. La structure porteuse ainsi que l'étendue et le type des sous-sols contribuent fortement à l'énergie grise.

Périmètre de bilan	Sont négligés	Calcul
<p>Le périmètre de bilan comprend l'ensemble du bâtiment (zones chauffées et non chauffées) y c. les installations extérieures associées:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Cave</li> <li>■ Enveloppe du bâtiment</li> <li>■ Eléments de construct. intérieurs</li> <li>■ Technique du bâtiment + distribution</li> <li>■ Balcon, jardin d'hiver</li> <li>■ Eléments de construct. extérieurs</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Installations de transport et de sécurité</li> <li>■ Mobilier encastré</li> <li>■ Environnement et équipement du bâtiment</li> <li>■ Transports sur le chantier (exception p. ex. transport par hélicoptère)</li> <li>■ Consommation d'énergie sur le chantier</li> <li>■ Déchets de chantier, matériaux d'emballage</li> <li>■ Escaliers, portes, huisseries, petits éléments de construction, p.ex. saut-de-loup, protection solaire</li> <li>■ Eléments linéaires, p.ex. gouttières</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Murs extérieurs avec dimension extérieure</li> <li>■ Plafonds sans déductions pour les gaines et escaliers</li> <li>■ Murs intérieurs avec dimensions intérieures et sans déductions pour les portes, passages de conduites et de canalisations</li> </ul>

## Répartition sur le bâtiment

L'énergie grise des bâtiments se répartit entre la dépense énergétique pour le corps du bâtiment et celle pour la technique du bâtiment utilisée. Selon le genre de technique du bâtiment, sa part sur le total de l'énergie grise peut s'élever à 17 – 52 % (illustr. 106). Une analyse d'environ 230 bâtiments d'habitation provisoirement et définitivement certifiés Minergie-A fournit des informations détaillées sur la répartition de l'énergie grise dans la pratique. Ces objets sont parfaitement appropriés à une analyse, car le justificatif de l'énergie grise a été fourni pour tous les bâtiments dans une période de 2 ans, que le calcul de Minergie est prédéterminé et qu'il a en outre été réalisé en majeure partie avec le même outil. On peut donc s'appuyer sur une base

de données uniforme. La valeur moyenne de l'énergie grise totale des bâtiments Minergie-A s'élève à  $42 \pm 6 \text{ kWh}_{\text{EPnren}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ . Cela correspond à environ 84 % de l'exigence relative à l'énergie grise pour les constructions nouvelles Minergie-A ( $50 \text{ kWh}_{\text{EPnren}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , illustr. 107). Environ deux tiers de l'énergie grise reviennent au corps du bâtiment, 20 % à la technique de bâtiment standard (chauffage, eau chaude, ventilation, installations électriques, sanitaire) et environ 17 % à des installations solaires thermiques et photovoltaïques.

Illustration 106: Energie grise de différents standards de la technique du bâtiment par rapport au corps du bâtiment.

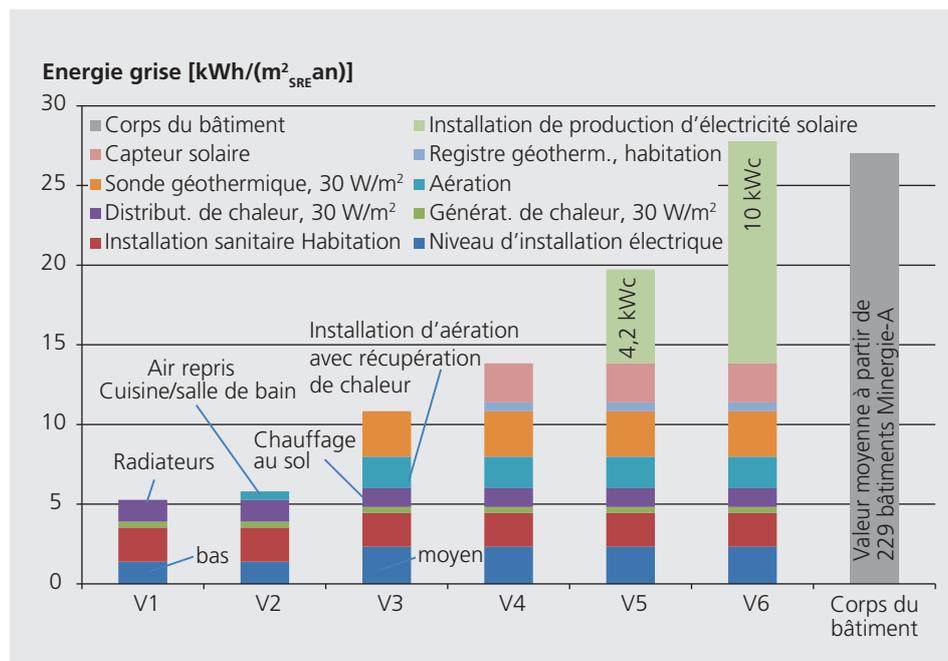
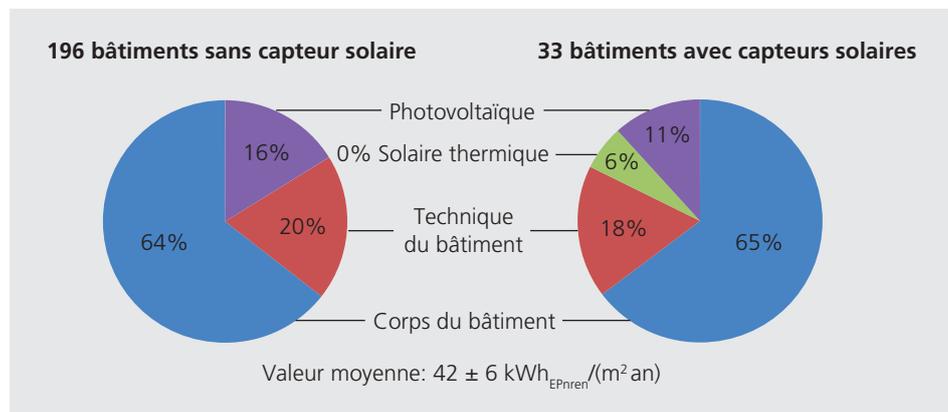


Illustration 107: Part des différents domaines dans l'énergie grise de 229 bâtiments Minergie-A avec et sans solaire thermique.

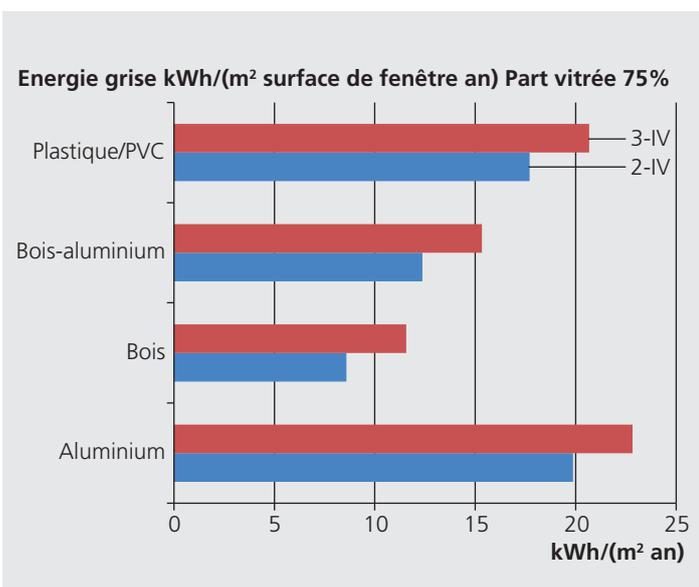


## Choix des matériaux

L'énergie grise est indiquée par kg ou par m<sup>2</sup> des différents matériaux ou éléments de construction utilisés, ou par pièce, mètre courant, surface de référence énergétique, puissance ou m<sup>2</sup> pour les composants de la technique du bâtiment. Dans le cas d'un élément de construction constitué de plusieurs matériaux, on calcule une valeur totale par m<sup>2</sup> de surface d'élément de construction, qui dépend de l'épaisseur des matériaux, de leur densité ainsi que de la durée d'utilisation des différents matériaux. Conformément au cahier technique SIA 2032, l'énergie grise est indiquée sous forme de valeur annuelle, ce qui signifie que la valeur totale est divisée par la durée d'amortissement. On obtient ainsi une valeur pour l'énergie grise par année, constante sur toute la durée d'utilisation d'un élément de construction.

L'énergie grise de différents matériaux ayant la même fonctionnalité est très variable. L'énergie grise de différents matériaux isolants est représentée dans l'illustration 18 p. 23. La comparaison de l'énergie grise des isolants doit toujours s'effectuer en fonction de la valeur U requise. Un isolant présentant une valeur d'énergie grise élevée par kg de matériau peut, grâce à une épaisseur de couche plus fine due à une conductivité thermique plus faible, s'avérer optimal. L'illustration 108 montre l'influence du matériau du châssis et du vitrage

**Illustration 108:**  
Energie grise de fenêtres à double et à triple vitrage avec différents matériaux de châssis (Données des écobilans KBOB 2012).



sur l'énergie grise d'une fenêtre. Le choix du matériau du châssis influe davantage sur l'énergie grise que le changement d'un double vitrage pour un triple vitrage.

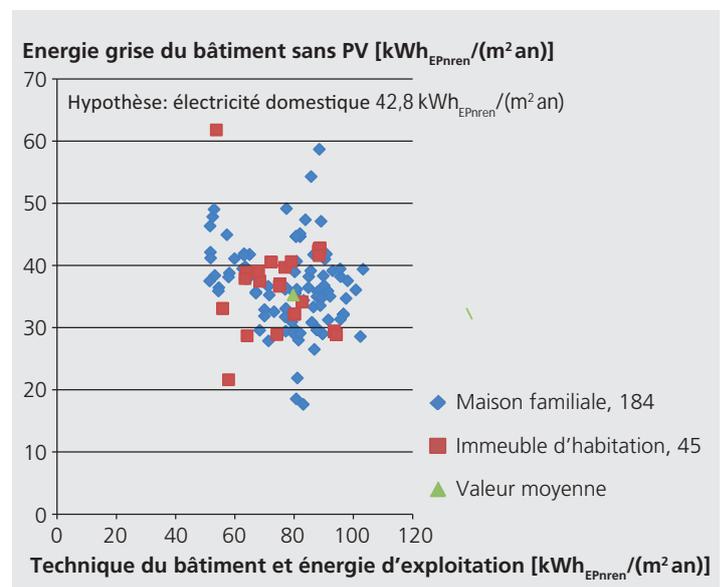
En principe, les matériaux utilisés influent fortement sur la valeur totale. Lors du choix des matériaux, il faut prendre en compte les quantités effectivement requises, car le poids et la dimension déterminent la valeur effective de l'énergie grise.

## Bilan global

L'énergie nécessaire à la couverture du besoin en chaleur de chauffage peut être réduite grâce à une enveloppe de bâtiment améliorée sur le plan thermique. Cela implique en général une augmentation de l'épaisseur d'isolation, ce qui entraîne une utilisation supplémentaire d'énergie grise. L'augmentation de l'énergie grise qui accompagne une utilisation accrue de matériaux réduit l'économie réalisée au niveau du besoin en chaleur de chauffage. Avec une bonne isolation thermique, l'économie d'énergie d'exploitation est toutefois supérieure à l'augmentation de l'énergie grise supplémentaire.

Pour pouvoir réaliser un bilan global, le besoin en chaleur de chauffage, tout comme l'énergie grise, doit être exprimé en énergie primaire non renouvelable. En fonction du système de chauffage et de l'agent énergétique, le besoin en énergie primaire non renouvelable pour la chaleur

**Illustration 109:**  
Energie d'exploitation en fonction de l'énergie grise du bâtiment sans prise en compte d'une installation photovoltaïque et de son rendement pour 229 bâtiments d'habitation Minergie-A.



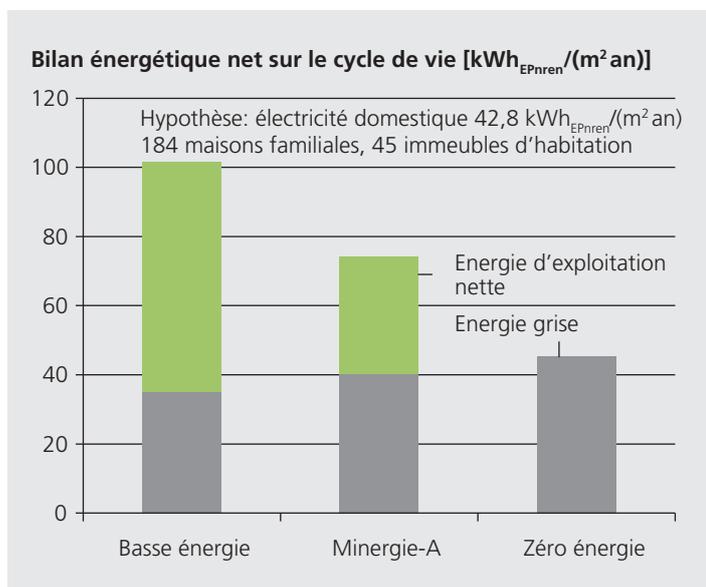
de chauffage varie. Selon le générateur de chaleur et l'agent énergétique, on obtient différentes valeurs optimales pour l'épaisseur d'isolant. L'illustration 109 montre l'énergie grise en fonction de l'énergie d'exploitation (technique du bâtiment et énergie d'exploitation) pour environ 230 bâtiments Minergie-A. Les bâtiments ayant un bilan énergétique global bas ne présentent pas nécessairement une quantité d'énergie grise plus élevée.

### Life Cycle Energy

Si l'on prend en compte l'autoproduction d'énergie dans le bilan, on obtient un bilan net pour l'ensemble de l'énergie d'exploitation. La somme de l'énergie d'exploitation nette et de l'énergie grise est appelée énergie de cycle de vie ou Life Cycle Energy, LCE. L'énergie du cycle de vie est représentée dans l'illustration 110 pour trois standards énergétiques. Si l'on considère les 320 bâtiments Minergie-A environ, la part d'installations photovoltaïques (PV) sur les bâtiments varie de telle sorte que

- le standard 1 ne présente aucune installation PV (bâtiment basse énergie)
  - dans le standard 2, le besoin en énergie pour le chauffage est couvert par le PV (standard Minergie-A) et
  - dans le standard 3, l'énergie d'exploitation totale est couverte par le PV (bâtiment zéro énergie).
- On remarquera que l'énergie grise aug-

Illustration 110: Bilan global de l'énergie d'exploitation nette et de l'énergie grise de différents standards de bâtiments.



mente entre le bâtiment basse énergie et le bâtiment zéro énergie, mais que dans le même temps, le bilan d'exploitation net tombe par définition à 0 kWh/(m<sup>2</sup>a). Ainsi, malgré l'énergie grise en augmentation, l'énergie de cycle de vie d'un bâtiment zéro énergie est inférieure d'environ 60 % à celle d'un bâtiment basse énergie. Le bâtiment zéro énergie présente le bilan total net le plus bas.

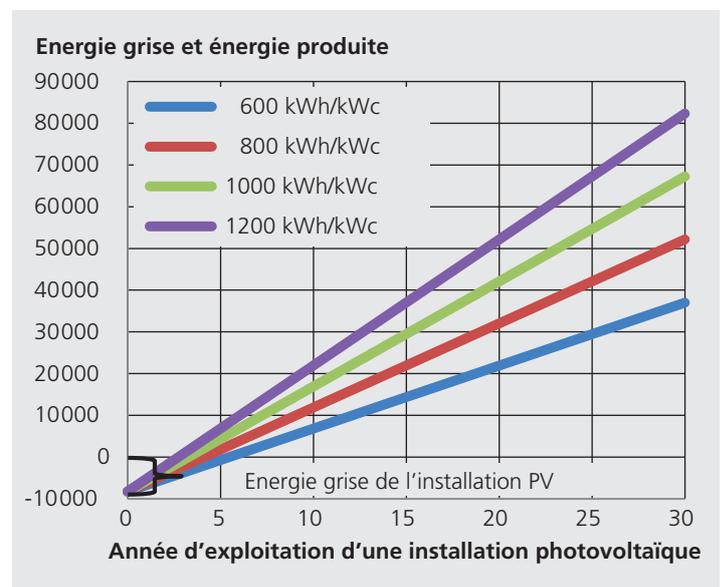
### Amortissement énergétique des installations photovoltaïques

L'illustration 111 montre la durée d'amortissement énergétique d'une installation photovoltaïque. Après 2 à 5 ans, même sur le Plateau suisse qui ne dispose pas d'un ensoleillement particulièrement important, l'installation a produit autant d'électricité, donc économisé autant d'énergie primaire non renouvelable que la quantité d'énergie grise nécessaire à sa fabrication et à son élimination. Du point de vue de l'énergie primaire, une installation photovoltaïque est donc avantageuse.

Illustration 111: Durée d'amortissement d'installations photovoltaïques (énergie grise: 277 kWh/(kWp an) à partir de [www.bau-teilkatalog.ch](http://www.bau-teilkatalog.ch), sur la base des données de KBOB-Öko-bilanzdatenbank 2012, durée d'utilisation de 30 ans, perte de rendement de 10 % sur cette durée).

### Rénovations de bâtiments

Dans les rénovations de bâtiments, l'ampleur de l'intervention et les détails constructifs déterminent la dépense d'énergie grise. En principe, dans la rénovation, les éléments de construction ayant une dé-



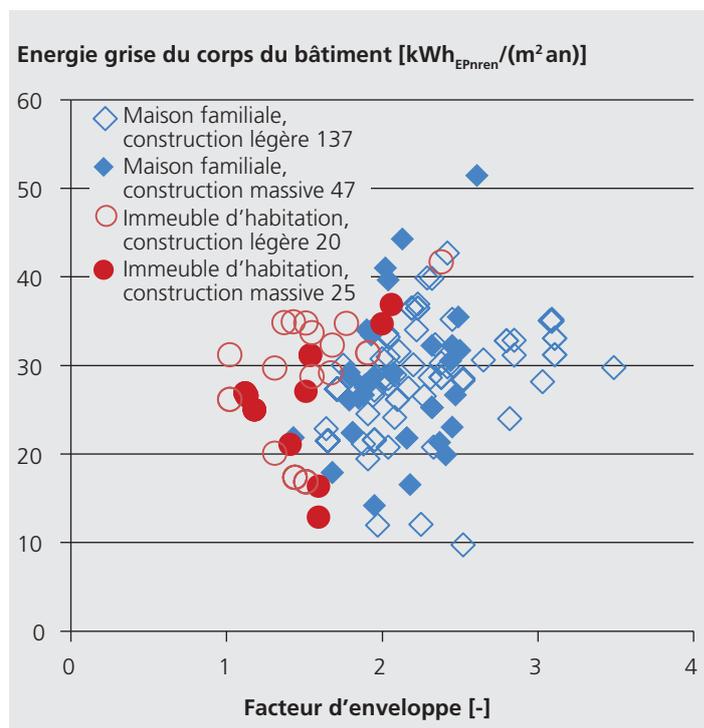
pense élevée en énergie grise, par exemple les pièces enterrées, le gros-œuvre et la dalle de sol, sont déjà présents. Dans le cas d'un remplacement de matériaux de un à un (p.ex. pour une façade ou une toiture), les matériaux utilisés sont déterminants. De nouveaux composants, tels que l'intégration d'une installation de ventilation, augmentent la part d'énergie grise. Pour déterminer la quantité d'énergie grise dans les rénovations de bâtiments, il convient de fixer un périmètre de bilan, car certains éléments de construction ou composants sont remplacés et d'autres non. En principe, tous les éléments de construction faisant l'objet d'une rénovation sont intégrés dans le bilan. Il en va de même pour les composants de la technique du bâtiment. Les éléments de construction et composants de nouveaux étages et annexes supplémentaires sont également pris en compte. Pour les rénovations de bâtiments axées sur les valeurs cibles de la société à 2000 watts, c'est-à-dire qui visent une rénovation conforme au cahier technique SIA 2040 «Voie SIA vers l'efficacité énergétique», l'énergie grise des bâtiments âgés de plus de 30 ans est considérée comme amortie. Pour les bâtiments moins anciens, l'énergie grise non encore amortie liée à leur réalisation doit être prise en compte de façon proportionnelle sur la durée de vie restante. Les valeurs cibles relatives à la transformation, indiquées dans le cahier technique SIA

2040, doivent être prises en compte. La même méthode de calcul est utilisée pour les émissions de gaz à effet de serre.

### Optimisation

L'analyse des quelque 230 bâtiments d'habitation Minergie-A montre que l'optimisation de l'énergie grise dépend principalement des matériaux effectivement utilisés. Avec la prescription d'une valeur limite fixe pour le standard Minergie-A, l'énergie grise devient indépendante de la compa-

*Illustration 112: Énergie grise de corps de bâtiments en fonction de la compacité et du mode de construction des bâtiments, pour 229 bâtiments d'habitation Minergie-A.*



Facteur d'influence	Conséquences
Niveau de matérialisation	Différents matériaux ayant la même fonctionnalisation possèdent différentes valeurs d'énergie grise. Les matériaux ayant une faible teneur en énergie grise sont à privilégier.
Durée de vie	Utiliser des éléments de construction et composants ayant de longues durées de vie. Pour les constructions existantes: réaliser une analyse de la durée de vie des éléments de construction et composants existants. Ne remplacer les éléments de construction et composants que si la fonctionnalité n'est plus assurée, que la durée de vie est pratiquement ou totalement écoulee ou que l'efficacité de nouveaux composants, p.ex. de pompes modernes, a nettement augmenté.
Séparabilité des matériaux et des éléments de construction	La séparabilité des matériaux et éléments de construction garantit qu'en cas de remplacement, il ne soit pas nécessaire de remplacer l'ensemble de l'élément.
Bilan global	L'étude du bilan global constitué de l'énergie d'exploitation et de l'énergie grise permet des épaisseurs d'isolant optimales en fonction du matériau isolant et de la production de chaleur. L'évaluation s'effectue en énergie primaire non renouvelable.

Tableau 28: Facteur d'influence sur l'énergie grise.

ité et du mode de construction (illustr. 112). Les facteurs d'influence sur l'énergie grise sont rassemblés dans le tableau 28. Les matériaux et composants ayant une faible valeur d'énergie grise et une longue durée de vie sont à privilégier.

### Sources

- Cahier technique SIA 2032: Energie grise (2010)
- Cahier technique SIA 2040: Voie SIA vers l'efficacité énergétique (2011)
- Ragonesi M.: Effizienzstrategie. Faktor Verlag, Heft 36 Wärmeschutz, 2012, pages 26 à 35.
- CSFC Liste des données des écobilans pour la construction
- [www.bauteilkatalog.ch](http://www.bauteilkatalog.ch), version 2012

# Concepts, stratégies, standards

## Armin Binz Construction efficiente – Objectifs et moyens

La construction efficiente ne cesse d'évoluer depuis plus de 40 ans. Plusieurs axes de développement se dégagent: l'objectif de la construction efficiente est devenu plus vaste et plus exhaustif. Du chauffage et de la production d'eau chaude jusqu'à l'énergie grise et la mobilité, en passant par les appareils, l'éclairage et l'autoproduction d'énergie, tous les aspects énergétiques du bâtiment sont pris en compte. L'illustration 113 montre les éléments au-

jourd'hui associés à ce thème: toutes les utilisations de l'énergie sont considérées, et non uniquement l'énergie finale. C'est le besoin en énergie primaire global que l'on cherche à optimiser. La valorisation de l'énergie utile et des agents énergétiques est estimée, et les potentiels exergétiques sont exploités. La palette de concepts, de normes, de standards et d'outils, mais également de technologies, de matériaux et d'appareils, s'est formidablement élargie. L'illustration 114 représente une sélection des principaux instruments actuels.

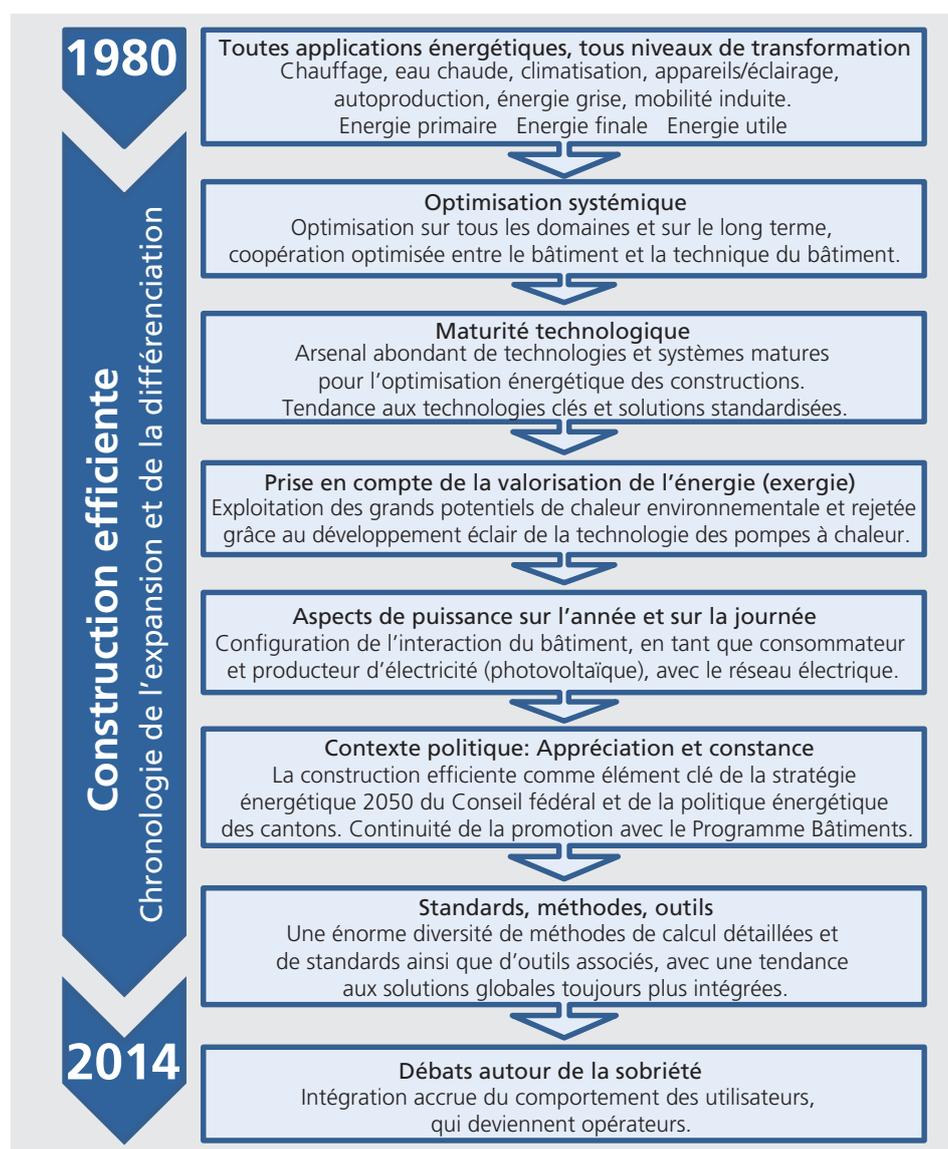


Illustration 113: Thématiques, contexte et conditions de la construction efficiente.

Le Programme Bâtiments, successeur du programme de subvention Centime climatique, met à disposition des outils complets avec une continuité sur le long terme pour la promotion de l'efficacité énergétique dans la construction. Avec la prochaine génération de prescriptions énergétiques dans le domaine du bâtiment, le Modèle de prescriptions énergétiques des cantons 2014 (MoPEC 2014), la décision de sortir du nucléaire et la Stratégie énergétique 2050 du Conseil fédéral, la construction efficiente a aujourd'hui le vent en poupe. De nouvelles thématiques sont abordées, par exemple dans les débats autour de la sobriété, dans lesquels le comportement et les besoins des utilisateurs sont étudiés. Dans le domaine technologique, le photovoltaïque continuera d'une part à affirmer sa domination et à offrir de nouvelles opportunités et d'autre part, on espère également beaucoup des technologies modernes d'automatisation du bâtiment.

## Concepts d'optimisation et technologies clés

Il n'existe pas de solution miracle pour achever le tournant énergétique dans lequel s'est engagé l'Etat. Tous les domaines de l'efficacité sont concernés, et tous les agents énergétiques renouvelables disponibles doivent être utilisés. Malgré tout, on peut dire qu'il existe quelques technologies clés qui marqueront de leur empreinte l'avenir de l'énergie. Cela est représenté dans le cas de l'immeuble d'habitation neuf typique de l'illustration 6 page <?>. Cet exemple permet d'illustrer et de commenter différents niveaux d'optimisation énergétique.

L'illustration 115 montre le diagramme des flux d'énergie du même immeuble d'habitation neuf, avec une autre solution technique également fréquente, dans laquelle on a renoncé à l'utilisation d'un agent énergétique fossile (gaz naturel). Les pompes à chaleur à sondes géothermiques sont devenues une technologie clé pour le chauffage et la production d'eau chaude. Avec des coefficients de performance annuels nettement supérieurs à 3, elles remplissent de façon optimale l'exigence d'utilisation de l'exergie des agents énergé-

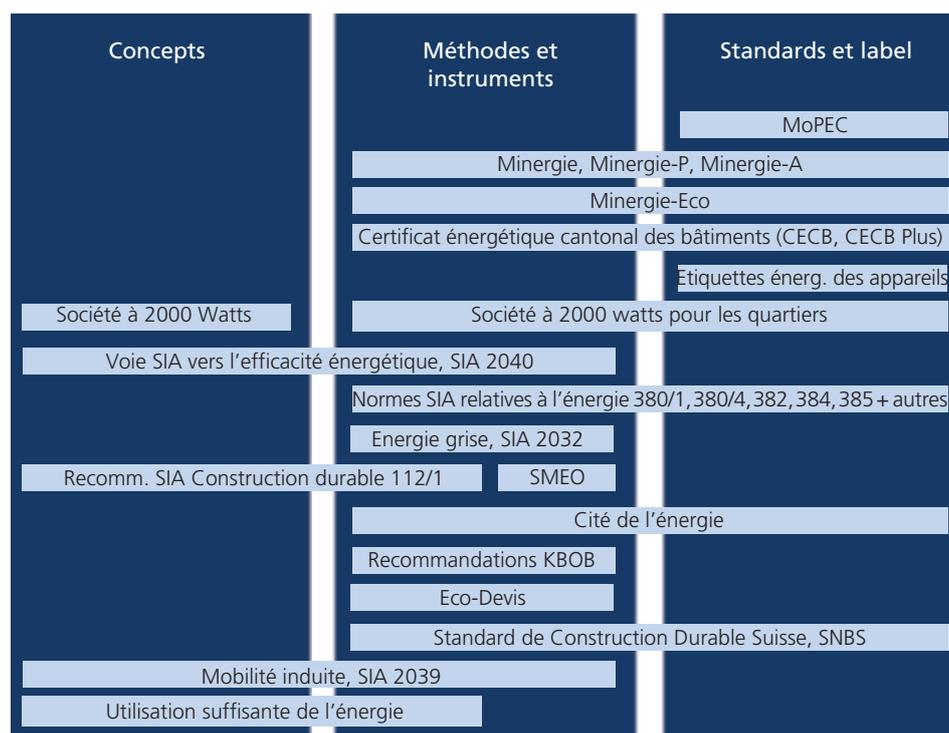
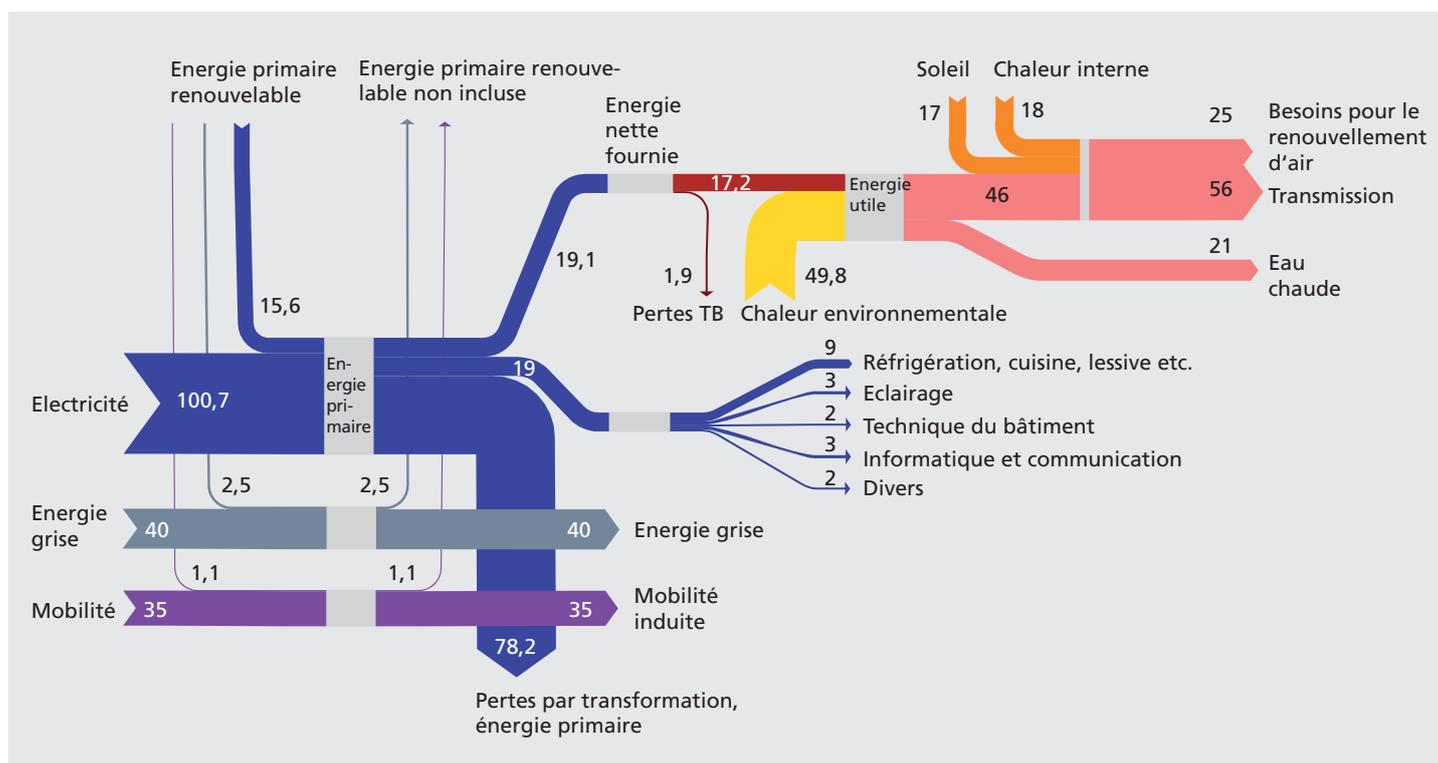


Illustration 114:  
Aperçu des principaux instruments de la construction durable (sélection).

tiques. Le bilan énergétique dépend de la quantité de chaleur environnementale pouvant être utilisée. Le schéma de base de ce concept devrait devenir très fréquent, et illustre la tendance à «l'électrification totale» des bâtiments. Si le domaine de la mobilité montre une forte tendance à l'«électromobilité», le parc de bâtiments va lui aussi vers une exploitation toujours plus axée sur l'électricité. Il en ressort la problématique suivante: un besoin en énergie primaire non renouvelable élevé en raison du besoin en électricité important, car en Suisse, la production de 1 kWh d'électricité requiert en moyenne l'utilisation de 2,6 kWh d'énergie primaire non renouvelable. La Société à 2000 watts se base sur l'énergie primaire. Grâce au coefficient de performance annuel élevé des installations de pompes à chaleur, le facteur d'énergie primaire (non renouvelable) de l'électricité peut être plus que compensé. La Voie vers l'efficacité énergétique de la SIA, qui est un instrument du concept de la Société à 2000 watts, fixe également des valeurs cibles et des valeurs indicatives pour l'énergie primaire. La somme des valeurs indicatives pour la réalisation, l'exploitation et la mobilité donne la valeur

cible pour la compatibilité d'un projet de construction avec la Société à 2000 watts. Dans les nouveaux bâtiments d'habitation, cette équation se lit de la façon suivante:  $110 + 200 + 130 = 440 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ an})$  ou en kWh, arrondi:  $31 + 55 + 36 = 122 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ an})$ . Avec  $175 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ an})$ , l'exemple de l'illustration 115 est toutefois éloigné de plus de 40 % de cette valeur cible. Une exigence souvent oubliée de la Voie vers l'efficacité énergétique est le respect de la valeur limite pour le besoin en chaleur de chauffage selon la norme SIA 380/1. Si l'immeuble d'habitation considéré était une rénovation, le besoin en chaleur de chauffage devrait alors être inférieur à  $276 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \text{ an})$  (soit  $77 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ an})$ ). Cela permet de garantir que la valeur cible de la Voie vers l'efficacité énergétique n'est pas respectée en compensant une enveloppe de bâtiment misérable sur le plan thermique par un agent énergétique renouvelable ou par l'achat de courant écologique. Dans le standard Minergie, la situation est légèrement différente car l'énergie primaire non renouvelable est remplacée par l'énergie finale pondérée (ou énergie délivrée). En outre, seule la part chaleur de la valeur limite Minergie est concernée. Avec

**Illustration 115:**  
Flux d'énergie spécifiques en kWh par m<sup>2</sup> SRE par an dans un immeuble d'habitation neuf moyen avec une installation de pompe à chaleur à sondes géothermiques pour le chauffage et la production d'eau chaude.

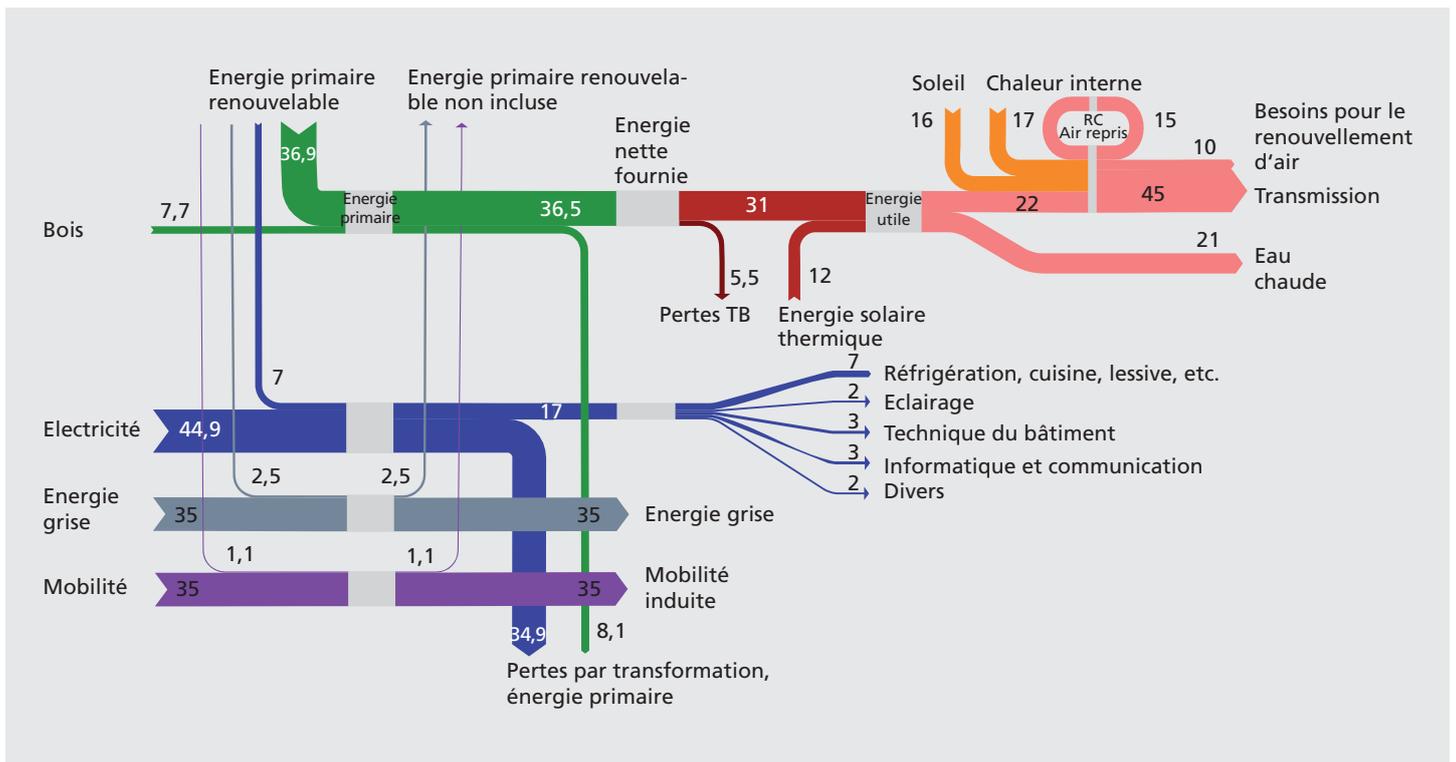


une pondération de 2 du besoin en électricité pour le chauffage et la production d'eau chaude, de 19 kWh/(m<sup>2</sup> an), le projet atteint la valeur limite de Minergie de 38 kWh/(m<sup>2</sup> an). Toutefois, d'autres exigences de Minergie ne sont pas respectées ou justifiées, notamment la ventilation automatique ainsi que le respect de 90 % de la valeur limite du besoin en chaleur de chauffage selon SIA 380/1.

Dans l'illustration 116, l'étape vers le standard Minergie a été franchie. Le besoin en chaleur utile est nettement réduit grâce à plusieurs mesures, d'une part l'intégration d'une aération douce avec récupération de chaleur et d'autre part une protection thermique améliorée de l'enveloppe du bâtiment. En raison des déperditions plus faibles, la capacité du bâtiment à utiliser le rayonnement solaire et la chaleur interne (rejets thermiques de l'éclairage, des appareils et des personnes) est moins importante et les rendements correspondants baissent légèrement. Pour l'approvisionnement en chaleur, on utilise une énergie renouvelable locale. 60 % de la production d'eau chaude sont couverts par une installation de capteurs solaires thermiques. Pour le chauffage et le reste de la produc-

tion d'eau chaude, on utilise un chauffage à bois avec foyer automatique à granulés. Etant donné que le pouvoir calorifique du bois est renouvelable, la part d'énergie primaire non renouvelable se limite à la coupe du bois, à la transformation en granulés et au transport, et est ainsi minimale. Bien entendu, l'objectif Minergie pourrait également être atteint avec une solution de pompe à chaleur, comme dans le cas mentionné. Pour la consommation d'électricité restante, on considère que l'on utilise des appareils et luminaires plus efficaces que la moyenne. Sur le plan de l'énergie grise également, on suppose que l'optimisation dans ce domaine est également une préoccupation. Résultat: on reste 5 % en dessous de la valeur indicative de la Voie vers l'efficacité énergétique pour l'exploitation du bâtiment (chaleur et électricité pour les appareils, l'éclairage etc.) et la valeur cible totale est tout juste atteinte, bien que la valeur indicative pour l'énergie grise ne soit pas totalement respectée. On entend souvent des critiques sur le fait que le besoin en énergie bois compte très peu dans la Voie vers l'efficacité énergétique, le choix de ce matériau permettant ainsi de gommer toutes les faiblesses d'un concept

**Illustration 116:** Flux d'énergie spécifiques en kWh par m<sup>2</sup> SRE par an dans un immeuble d'habitation Minergie neuf selon le standard Minergie.



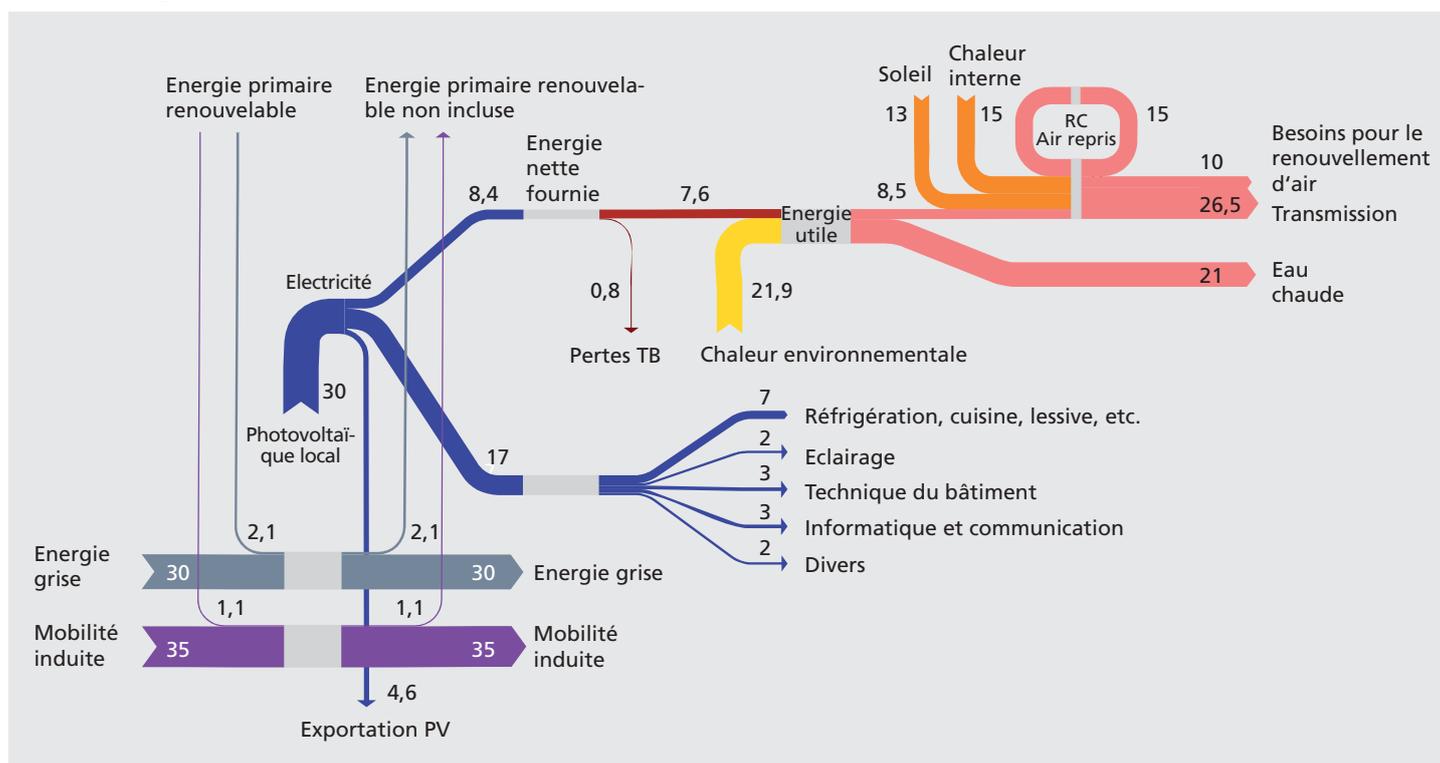
de bâtiment. Dans le standard Minergie, il en va tout autrement. Le facteur de pondération pour le bois est de 0,7, de sorte que dans le cas considéré, le besoin en bois pondéré s'élève à 23 kWh/(m<sup>2</sup> an). S'y ajoute en outre le besoin en électricité pour la ventilation, d'environ 2 kWh/(m<sup>2</sup> an), ce qui amène l'indice Minergie pour la chaleur à 25 kWh/(m<sup>2</sup> an) (ce qui reste néanmoins nettement inférieur à la valeur limite Minergie de 38 kWh/(m<sup>2</sup> an)).

L'illustration 117 montre la variante de projet Minergie-A, avec une solution qui permet également de répondre aux exigences du standard Minergie-P, c'est-à-dire disposant d'une protection thermique particulièrement performante. Les déperditions thermiques très fortement réduites entraînent une dégradation supplémentaire de l'exploitation de l'énergie solaire incidente et des rejets thermiques internes.

Le standard Minergie-A est atteint à l'aide d'une installation photovoltaïque relativement imposante, qui couvre non seulement le besoin en chaleur, comme cela est requis pour le standard Minergie-A (y c. énergie des ventilateurs de la ventilation), mais également le besoin en électricité pour l'éclairage, les appareils etc., l'électri-

cité en excès pouvant même encore être réinjectée dans le réseau. Dans le cas d'un bâtiment situé sur le Plateau suisse, celui-ci nécessite pour la production de 30 kWh de courant photovoltaïque environ 0,25 à 0,3 m<sup>2</sup> de cellules photovoltaïques haute qualité. En d'autres termes, la représentation des flux d'énergie discutée ne peut s'appliquer qu'à un bâtiment doté de quatre étages au maximum (pour 0,25 m<sup>2</sup>) ou de trois étages au maximum (pour 0,3 m<sup>2</sup>). Dans tous les cas, la totalité de l'installation photovoltaïque doit être placée sur le toit, qui doit y être entièrement consacré.

**Illustration 117:**  
Flux d'énergie spécifiques en kWh par m<sup>2</sup> SRE par an dans l'immeuble d'habitation neuf répondant aux standards Minergie-P et Minergie-A.



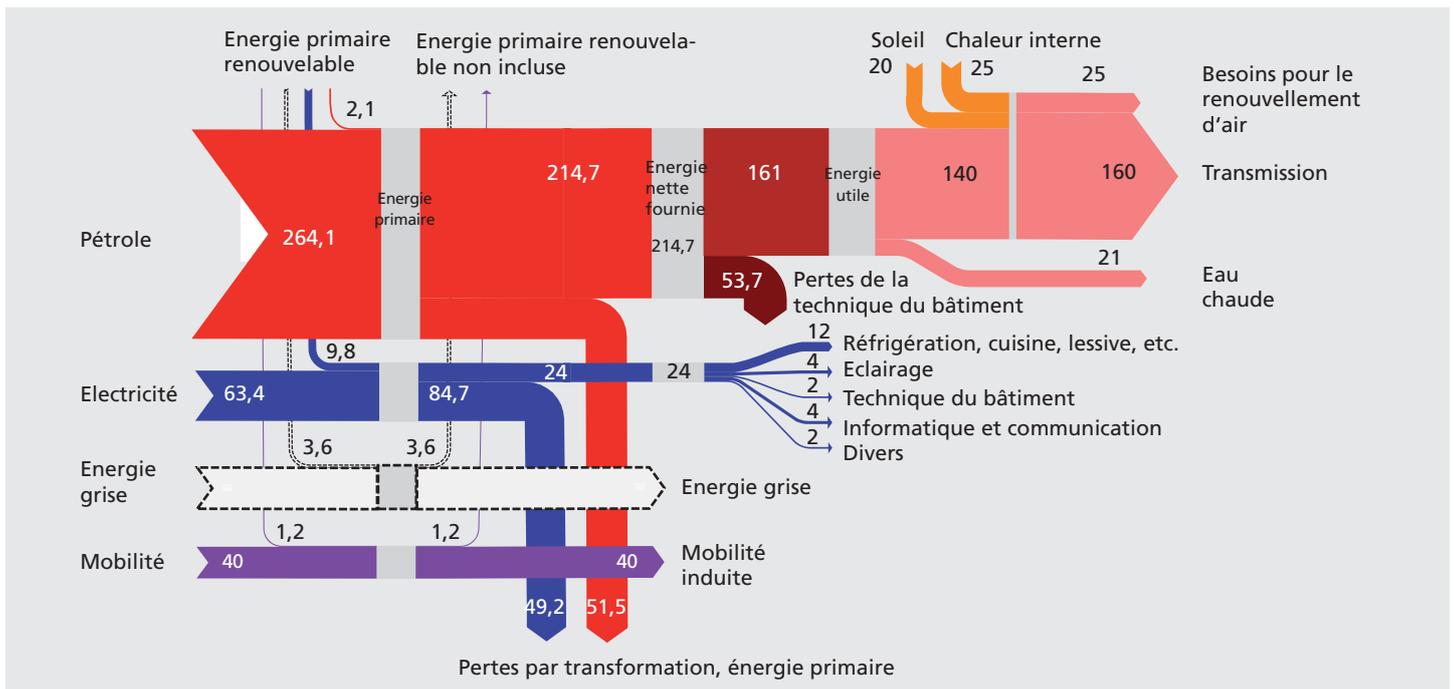
## Rénovation énergétique des bâtiments

Dans le cas des bâtiments existants, la situation est totalement différente de celle des constructions nouvelles. L'illustration 118 montre l'immeuble d'habitation, auparavant représenté sous forme de construction nouvelle dans différentes variantes, cette fois en tant que construction ancienne datant des années 1970. On remarque immédiatement que dans ce cas, l'approvisionnement en chaleur est encore le thème dominant. D'autre part, s'agissant d'un objet de rénovation, l'énergie grise du bâtiment existant ne présente plus d'intérêt. Seule l'énergie grise du projet de transformation et de rénovation est pertinente. Etant donné que dans les rénovations, la structure brute du bâtiment reste généralement préservée, l'énergie grise des projets de rénovation est en principe nettement plus faible que celle des constructions nouvelles. L'éventail de mesures est par principe le même que celui des constructions nouvelles, et concerne la protection thermique de l'enveloppe du bâtiment, la récupération des pertes de chaleur par la ventilation, la production efficiente de chaleur et l'utilisation d'un maximum de chaleur environnementale, de façon à ce que le besoin en énergie primaire

non renouvelable reste le plus faible possible. La mise en œuvre technique s'avère toutefois en général bien plus complexe (et souvent aussi nettement plus coûteuse) que dans les constructions nouvelles.

L'énergie grise qui a été consacrée il y a plusieurs décennies à la réalisation de l'immeuble d'habitation est mentionnée par souci d'exhaustivité. Dans les bâtiments existants, on s'intéresse toutefois uniquement à la dépense d'énergie grise consacrée à la rénovation énergétique (illustr. 119). Dans cet exemple, l'énergie grise destinée à la protection thermique et à la nouvelle pompe à chaleur à sondes géothermiques, ainsi qu'à toutes les autres mesures techniques énergétiques, s'élève à 18 kWh/(m<sup>2</sup> an). A la différence du standard des constructions nouvelles, celui des modernisations de Minergie ne pose aucune exigence en termes de protection thermique (ou de besoin en chaleur de chauffage selon SIA 380/1). Dans les bâtiments existants, les conditions diffèrent dans la mesure où chaque valeur limite, dans chaque cas particulier, serait trop élevée ou trop basse. La valeur limite Minergie pour la chaleur est fixée, pour les bâtiments d'habitation, à 60 kWh/(m<sup>2</sup> an); cela pousse indirectement à mettre également en œuvre des mesures raisonnablement réalisables sur l'enveloppe

**Illustration 118:**  
Flux d'énergie spécifiques en kWh par m<sup>2</sup> SRE par an dans un ancien immeuble d'habitation typique non rénové des années 1950 à 1970.



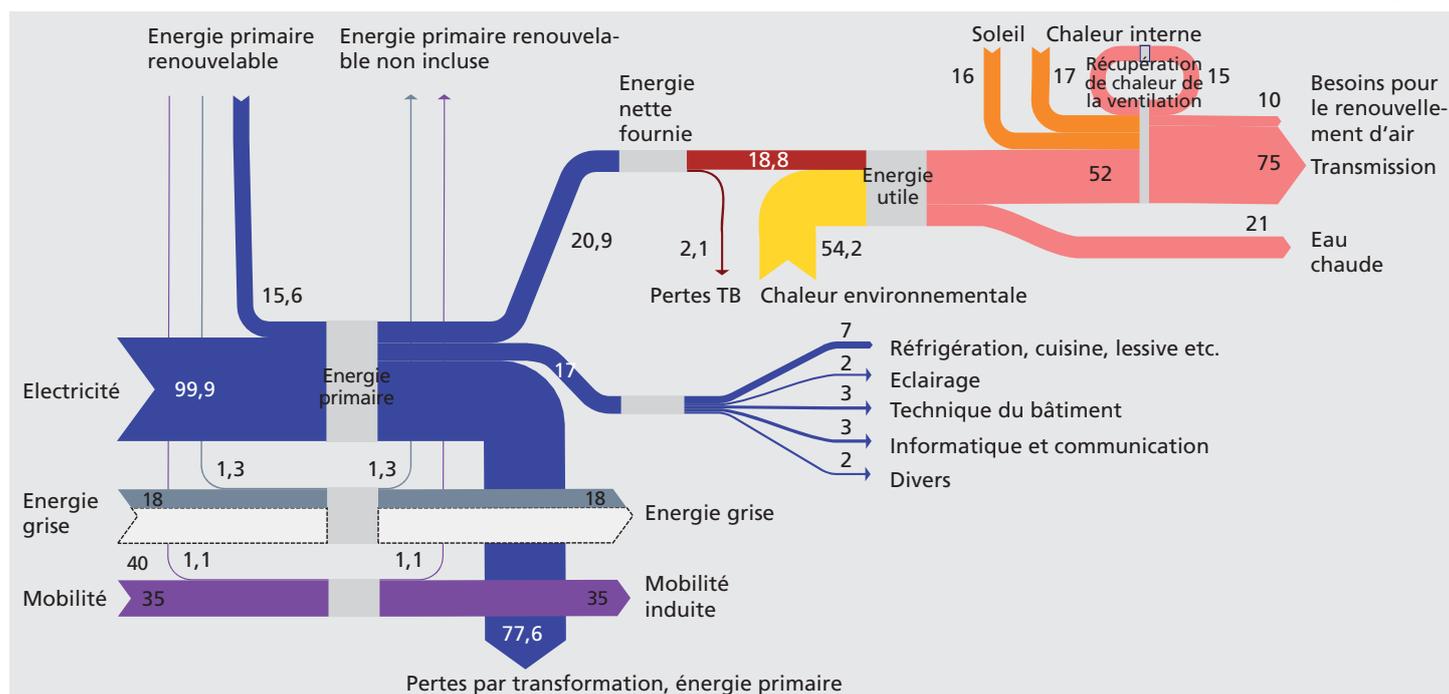
du bâtiment. Dans l'exemple de l'illustration 119, on remarque que les conditions d'une réduction nette des déperditions thermiques sont bonnes et que les déperditions thermiques par les murs, le toit, les fenêtres et le sol peuvent être divisées par deux. Le standard de modernisation Minergie serait même atteint si les déperditions thermiques initialement de 160 kWh/(m<sup>2</sup> an) pouvaient être réduites à seulement 100 kWh/(m<sup>2</sup> an) (au lieu de 75 kWh/(m<sup>2</sup> an)).

L'élaboration du paquet de mesures pour les bâtiments existants doit satisfaire de nombreuses conditions. En tout premier lieu, il convient de se baser sur une perspective à long terme pour le développement du bâtiment. Cela implique bien entendu de prendre en compte des questions de propriété ainsi que la situation de vie des propriétaires et habitants. Les propriétaires âgés se comportent par nature différemment d'une famille avec de jeunes enfants, dans l'habitation dont ils sont propriétaires. Du point de vue technique, les mesures doivent se compléter pour former un concept global cohérent. Deux lignes stratégiques pour le développement de paquets de mesures ont fait leurs preuves: d'une part, toujours rechercher et exploiter les valeurs ajoutées, qu'il s'agisse d'une exploitation plus importante du terrain

(p. ex. extension de toiture) ou d'une amélioration de la lumière naturelle par des fenêtres plus grandes ou d'autres mesures similaires. D'autre part, la rentabilité est primordiale. Avec la somme d'argent disponible, une valeur (énergétique) maximale doit être obtenue. Le classement par ordre de priorité des mesures selon leur rentabilité appartient ainsi au processus de planification, même si la mise en œuvre directe n'est généralement pas possible pour des raisons de cohérence de conception. Ainsi, dans le cas du remplacement d'une fenêtre, il convient toujours de se demander si une étanchéité plus élevée de l'enveloppe du bâtiment pourrait engendrer des risques de condensation plus élevés et quelles mesures sont nécessaires pour gérer ces risques.

L'ancienne règle selon laquelle dans la séquence des étapes d'assainissement, la réduction de la consommation, c'est-à-dire les mesures sur l'enveloppe du bâtiment, doit s'effectuer avant l'assainissement de la technique domestique (remplacement du chauffage), s'est assouplie. Dans de nombreux cas, cela est difficilement possible, voire impossible, ou trop coûteux. D'autant plus qu'un éventuel surdimensionnement du chauffage, lorsque l'enveloppe n'est isolée que plus tard, n'est plus que légèrement défavorable en termes de rendement de

*Illustration 119: Flux d'énergie spécifiques en kWh par m<sup>2</sup> SRE par an dans un ancien immeuble d'habitation typique des années 1950 à 1970 après une rénovation énergétique complète selon le standard de modernisation Minergie.*



l'installation. Les potentiels d'économie d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre par une nouvelle technique domestique peuvent donc être exploités même si l'assainissement de l'enveloppe ne peut pas encore être réalisé. Dans les débats autour de cette problématique au cours des dernières années, on a souvent jeté le bébé avec l'eau du bain. La valeur d'une bonne enveloppe de bâtiment a été à tort restreinte à l'aspect de l'économie d'énergie. La réduction des besoins (par l'isolation thermique et une exploitation passive optimisée de l'énergie solaire) prend le problème à la racine. La couverture des besoins est une approche end-of-pipe. Dans le cas d'une réduction très vaste notamment, des synergies et valeurs ajoutées importantes se dégagent:

- Les surfaces de distribution de chaleur (chauffage au sol ou corps de chauffe) deviennent plus petites et moins chères. Ou: pour une même surface de distribution de chaleur, la température de départ baisse.

- L'effet d'autorégulation (température de départ dans la plage supérieure des températures ambiantes) permet un concept de régulation pratique, simple et bon marché.

- La masse relative utilisable sur le plan thermique augmente, c'est-à-dire que les effets d'accumulation deviennent plus efficaces et le comportement thermique présente plus d'inertie. La constante de temps est plus élevée, la température est plus constante et le confort est meilleur (p.ex. uniquement faible refroidissement pendant les congés).

- Le besoin en puissance de chauffe est réduit, c.-à-d. que les installations de chauffage de secours et de remplacement deviennent plus petites et moins chères. Les pannes du chauffage ont des conséquences moins graves.

- La protection thermique fonctionne de façon plus fiable que n'importe quel système de chauffage.

### **Bâtiments à autres usages**

Les règles de la construction efficiente se basent sur les bâtiments d'habitation. Les grands bâtiments complexes et les utilisations spéciales telles que les halles de gym-

nastique, les piscines couvertes ou les bâtiments industriels sortent du cadre de cette publication. Les bâtiments simples utilisés en tant que bureaux, écoles et autres applications similaires sont traités dans ce qui suit. Ils forment, à côté des bâtiments d'habitation, la deuxième grande catégorie du parc de bâtiments suisse. En principe, on peut leur appliquer les mêmes mesures de rénovation énergétique que pour les bâtiments d'habitation. Deux différences sont toutefois à relever:

1. Le refroidissement mécanique et la climatisation sont de plus en plus d'actualité, notamment dans les constructions nouvelles et les bâtiments existants relativement neufs. La protection thermique estivale suit deux axes principaux: d'une part, la connaissance et le respect des règles de base de la protection thermique estivale pour les bâtiments d'habitation doivent permettre de renoncer au refroidissement mécanique et d'autre part, ces bâtiments doivent si possible également être refroidis au moyen du Freecooling ou les zones du bâtiment dans lesquelles un refroidissement actif est requis doivent être les plus petites possible afin que le besoin spécifique en froid reste faible.

2. Le besoin en électricité pour les éclairages et les équipements possède une influence nettement plus importante que dans le cas des bâtiments d'habitation (car les charges thermiques internes sont plus importantes).

L'optimisation des bâtiments à autres usages (constructions nouvelles comme rénovations) est en outre influencée par un mode d'utilisation et d'exploitation différent. Tandis que les bâtiments d'habitation sont utilisés 24 heures sur 24 et sont souvent occupés par des particuliers (parfois même par le propriétaire), dans les bâtiments à autres usages, le propriétaire et les utilisateurs sont plus nettement séparés, les utilisateurs sont peu impliqués dans l'exploitation du bâtiment et les bâtiments sont souvent inoccupés la nuit et le week-end. Il en résulte des opportunités importantes pour l'automatisation, la commande et la régulation de l'exploitation.

## Jürg Bichsel Optimisation énergétique et automatisation du bâtiment

### Qu'est-ce que l'automatisation du bâtiment?

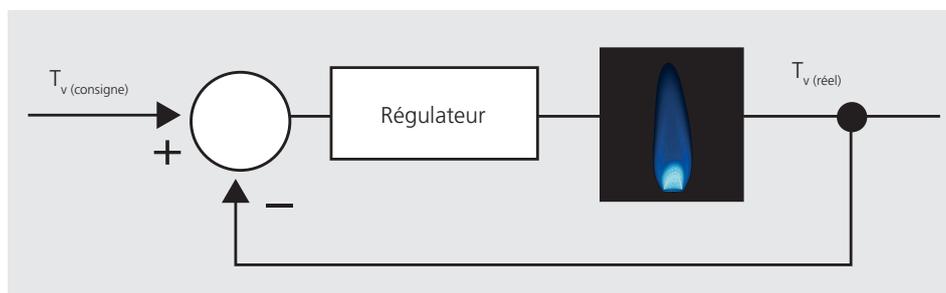
L'automatisation du bâtiment est en charge de la surveillance, de la commande, de la régulation (illustr. 120) et de l'optimisation de toutes les installations techniques dans les bâtiments. Cela commence par le contrôle d'accès jusqu'à la régulation intelligente du confort ambiant, en passant par la surveillance la protection incendie. Jusqu'à présent, dans de nombreux bâtiments, des aspects importants tels que la climatisation, l'éclairage et l'ombrage étaient traités séparément. Cette séparation n'est plus pertinente si l'on considère les éléments à la façon d'un réseau interconnecté. Par exemple, lorsqu'en été, le rayonnement solaire incident chauffe le bâtiment à travers les vitres, il ne suffit pas simplement d'activer automatiquement

l'installation de climatisation, il faut tout d'abord baisser les stores et éventuellement informer l'utilisateur. Ce n'est que lorsque la perte de confort est trop importante que la machine de production de froid est activée. Un bâtiment bien régulé considère tous les éléments importants avec leurs interconnexions et optimise le bâtiment comme un tout.

### L'optimisation énergétique aujourd'hui

Les systèmes de bâtiment sont conçus de manière à réguler le plus précisément possible, à une valeur prédéfinie et de façon individuelle, des valeurs cibles telles que la température ou les intensités d'éclairage. Pour ce faire, à l'heure actuelle, dans le cas d'une régulation de température par exemple, ni la quantité de chaleur requise, ni l'utilisation d'énergies renouvelables, ni les émissions de CO<sub>2</sub>, ni la pollution environnementale, ni l'énergie auxiliaire (entraînements, pompes, régulateurs) ne sont in-

*Illustration 120: Régulation de la température de départ dans un chauffage. La température de départ  $T_{v(\text{réel})}$  est mesurée à l'aide d'une sonde de température et comparée à une température de consigne  $T_{v(\text{consigne})}$ ; le régulateur contrôle la flamme du brûleur sur la base de cette différence de température.*



### Classe d'efficacité selon SIA 386.110

**A**  
Classe A

#### Système d'automatisation du bâtiment hautement efficace

- Automatisation des pièces en réseau avec relevé automatique des besoins
- Maintenance régulière
- Surveillance énergétique mensuelle
- Optimisation énergétique durable par des spécialistes

**B**  
Classe B

#### Système d'automatisation du bâtiment développé

- Automatisation des pièces en réseau sans relevé automatique des besoins
- Surveillance énergétique annuelle

**C**  
Classe C

#### Système d'automatisation du bâtiment standard

- Automatisation du bâtiment en réseau pour les installations primaires
- Pas d'automatisation électronique des pièces, p. ex. vannes thermostatiques sur les corps de chauffe
- Aucune surveillance énergétique

**D**  
Classe D

#### Système d'automatisation du bâtiment de faible efficacité

- Il est recommandé de moderniser les bâtiments dotés de tels systèmes.

*Illustration 121: Norme SIA 386.110 Classes d'efficacité de l'automatisation du bâtiment. Exemple: Les bâtiments actuels se trouvent typiquement dans la classe C; la classe A nécessite une optimisation énergétique durable.*

diqués et optimisés. En principe, un système d'automatisation du bâtiment serait capable de déterminer les points de fonctionnement optimums. Etant donné qu'il s'agit là de rapports physiques complexes avec des modélisations ardues, la mise en œuvre échoue généralement au niveau des coûts, en particulier pour les bâtiments d'habitation. C'est pourquoi les optimisations énergétiques sont généralement réalisées manuellement par le concierge, les économies réalisées dépendant directement de ses connaissances et de son expérience.

### Comment s'améliorer avec des moyens simples sans optimisation automatique?

Même sans nouveaux investissements, il est possible de réaliser des économies d'énergie de l'ordre de plusieurs pourcents dans les installations existantes dotées de pompes à chaleur et de chaudières à condensation. Et ce, simplement avec une température de départ du circuit de chauffage adaptée au bâtiment et à une température réduite de l'eau chaude (maximum 60°C). La norme SIA 386.110 (illustr. 121) décrit d'autres mesures permettant de réaliser des économies d'énergie importantes au prix de faibles investissements. Par exemple, l'utilisation d'une horloge programmable pour la température ambiante, intégrée aujourd'hui à tout régulateur de chauffage, réduit l'énergie thermique requise jusqu'à 20 % et l'énergie électrique jusqu'à 7 %. Outre les possibilités techniques, les habitants peu-

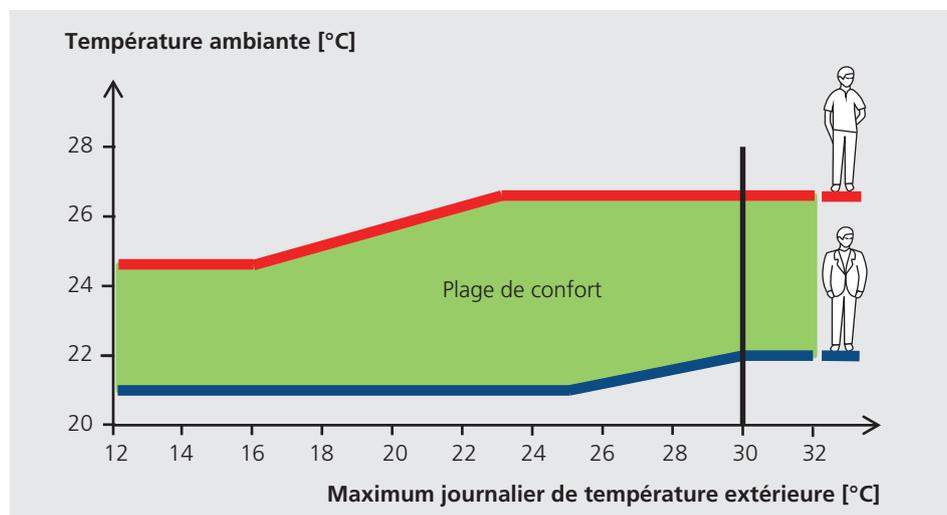
vent également apporter leur contribution en révisant leurs exigences de confort. La température ambiante doit-elle être régulée de façon fixe à une valeur de consigne (p. ex. 21°C +/- 0,1 K) ou une marge de variation doit-elle être autorisée en fonction de la température extérieure qui permet d'économiser de l'énergie sur le chauffage et le refroidissement? Ces réflexions figurent dans la norme SIA 382/1, qui autorise à laisser osciller les températures ambiantes, en fonction de la température extérieure, entre une limite supérieure et une limite inférieure. Ceci, à condition que les habitants aient la possibilité d'adapter leur tenue vestimentaire (illustr. 122). La régulation au sein de plages de température offre un potentiel d'économie considérable, car la règle empirique suivante s'applique toujours: en hiver, une température ambiante plus basse de 1 K permet d'économiser environ 6 % d'énergie de chauffage.

L'humain ne possède aucun organe sensoriel lui permettant de mesurer directement la consommation d'énergie. Il doit donc se référer à des représentations simples. Techniquement, tout est aujourd'hui possible, de l'affichage «rouge-vert» jusqu'aux interfaces graphiques avec accès à distance via Internet. Une représentation simple et compréhensible doit encourager l'utilisateur à utiliser de façon économe l'énergie non perceptible. Par exemple, les appareils d'ambiance (tels que définis dans le module Minergie Confort d'habitation) qui régulent la température dans les différentes pièces sont



Illustration 123: Vert désigne un faible besoin en énergie, rouge un besoin élevé; en tournant le bouton de la valeur de consigne, l'utilisateur peut agir directement.

Illustration 122: Norme SIA 382/1, Plages de confort (graphique: FHNW, J. Bichsel, et norme SIA 180). Exemple: Pour une température extérieure maximale de 30°C, la plage de confort de température se situe entre 22°C (tenue vestimentaire: Costume avec cravate) et 26,5°C (tenue vestimentaire: Pantalon long et chemise à manches courtes).



aujourd'hui équipés de témoins de couleur: s'ils s'éclairent en vert, la consommation d'énergie se situe dans une plage favorable, s'ils s'allument rouge, la quantité d'énergie consommée est trop importante. L'utilisateur peut lui-même amener le témoin de l'état «rouge» dans l'état «vert» en réglant le bouton de valeur de consigne de la température (illustr. 123). Les technologies actuelles permettent également la surveillance de la consommation d'énergie et la commande (activation et désactivation, modification des valeurs de consigne de température, messages d'erreur) de bâtiments entiers via Internet. Les maisons familiales sont commandées par les habitants, les immeubles d'habitation parfois par des sociétés indépendantes (technical facility management). Via Internet, le chauffage est surveillé à distance et les erreurs peuvent être rapidement détectées. Ainsi, par exemple, la température dans les résidences secondaires peut être délibérément maintenue basse en période de non-occupation, car l'activation à distance du chauffage permet d'élever en temps voulu la température. Conformément à l'article 5.1 du MoPEC, cela doit impérativement être prévu pour les nouveaux bâtiments d'habitation, de même pour des bâtiments rénovés, dont l'occupation n'est que temporaire. Néanmoins, ces possibilités techniques doivent être utilisées avec précaution car l'utilisateur peut être facilement dépassé ou désorienté en cas de succession rapide de messages.

### Activités de recherche

Dans l'avenir, les thèmes de l'automatisation du bâtiment seront étudiés pour déterminer la façon dont l'énergie stockée peut être mieux utilisée grâce à la connaissance des états de charge des accumulateurs. Grâce à un déplacement énergétique du stockage dans le bâtiment vers l'accumulateur d'eau chaude ou vers l'accumulateur géothermique, il sera possible d'optimiser la consommation d'énergie totale d'un bâtiment. Cela permettra également d'intégrer l'énergie solaire instantanée. Et ce, sans nuire au confort de l'utilisateur. Une pompe à chaleur air-eau devra charger toute la journée en énergie l'accumulateur

d'eau chaude et le bâtiment, car le photovoltaïque présent sur le bâtiment fournit du courant électrique nécessaire à l'exploitation pendant la journée, et que l'efficacité de la pompe à chaleur est plus importante en raison de la température ambiante plus élevée. Cela permettra d'atteindre une meilleure simultanéité de la consommation et de la production grâce à des accumulations intermédiaires, ce qui ne va pas de soi aujourd'hui. Cela pourra même être encore renforcé en intégrant les prédictions météorologiques, car l'accumulateur d'eau chaude et l'accumulation du bâtiment pourront être chargés au maximum en période de beau temps, avant une dégradation météorologique. Les systèmes actuels présents dans l'habitation utilisent très peu ces possibilités, car elles impliquent des investissements relativement élevés dans le logiciel, la connexion Internet et l'équipement des régulateurs.

L'objectif de l'automatisation du bâtiment n'est pas d'obtenir un bâtiment autonome en énergie, mais un bâtiment relié à son environnement, permettant ainsi un besoin en énergie minimal, voire un bilan énergétique positif. Le défi de demain sera l'optimisation globale des flux d'énergie. Dans les bâtiments actuels, on retrouve souvent un schéma dans lequel les pièces orientées au sud doivent être refroidies tandis que dans le même temps, les pièces positionnées au nord doivent être chauffées. Si les systèmes de chauffage et de refroidissements ne sont pas reliés, ni sur le plan énergétique, ni en termes de signaux, le bâtiment n'est pas exploité de façon optimale du point de vue de la consommation d'énergie.

Les systèmes à auto-apprentissage sont le rêve de tout utilisateur; sans qu'il soit nécessaire de se préoccuper des détails, l'installation de chauffage s'optimise automatiquement à chaque fois que les conditions changent, par exemple l'occupation des pièces, les températures extérieures et le rayonnement solaire incident. Ce rêve, bien qu'il soit réalisable sur le plan technique, se heurte dans la pratique au coût élevé ainsi qu'au manque de robustesse et de stabilité à long terme des systèmes installés.

## Monika Hall Bilan énergétique global

### Bases du bilan énergétique

Pendant la crise du pétrole de 1973, le sujet de la consommation d'énergie dédiée à la chaleur ambiante a pris de l'importance et depuis, les exigences en termes de besoins en énergie de chauffage ne cessent de croître. Par conséquent, la qualité énergétique de l'enveloppe du bâtiment ne cesse de s'améliorer, réduisant ainsi le besoin en énergie de chauffage. Cela fait d'une part baisser le besoin absolu en énergie du bâtiment et d'autre part, la part du besoin en énergie de chauffage sur le besoin énergétique global du bâtiment devient nettement plus faible. Pour les bâtiments modernes, cette part s'élève à environ 20 % du besoin énergétique global, tandis qu'elle peut représenter jusqu'à 70 à 80 % dans les constructions existantes. Avec cette évolution, l'énergie d'exploitation passe clairement à l'avant-plan et le bilan énergétique global prend de plus en plus d'importance.

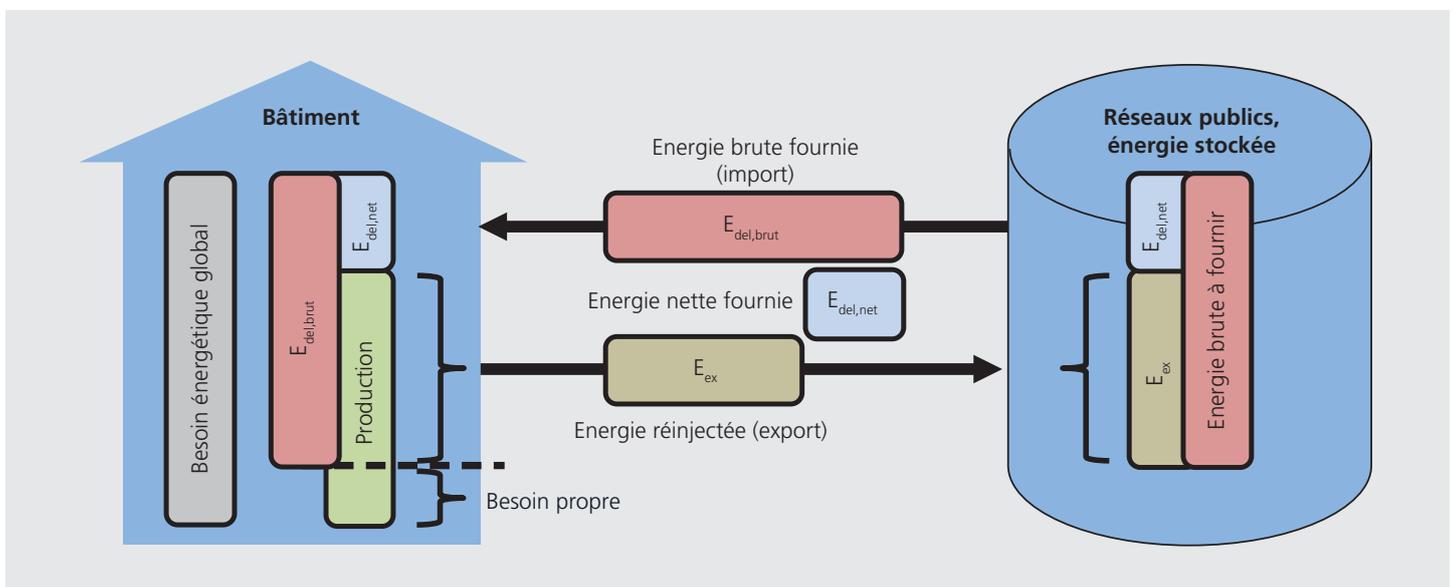
En outre, au cours des dernières années, la tendance était non seulement à une consommation d'énergie à différentes fins utiles, mais également de plus en plus souvent à la production d'énergie sur le bâtiment. De simple consommateur, le bâtiment devient un consommateur disposant de sa propre production locale d'énergie. Cette évolution influe également sur le

bilan énergétique (illustr. 124). Le besoin énergétique global est couvert par la production propre d'énergie ainsi que par l'énergie brute fournie. L'énergie nette fournie résulte de la différence entre l'énergie brute fournie (importation de l'énergie nécessaire) et l'énergie injectée dans le réseau public (exportation de la production excédentaire). Pour prendre en compte dans le bilan la technique de bâtiment et les agents énergétiques utilisés, le bilan annuel net est réalisé sur la base de l'énergie finale pondérée. En principe, le bilan énergétique global d'un bâtiment dépend de différents paramètres (tabl. 29). Ceux-ci varient considérablement d'un standard de bâtiment à l'autre. L'illustration 125 montre les limites de bilan et les pondérations des agents énergétiques ainsi que l'exigence en termes de bilan annuel net de différents standards de bâtiment.

### Bilan énergétique et écologique

L'utilisation d'installations photovoltaïques, notamment, se révèle très simple pour la production locale d'énergie renouvelable. Sur le plan physique, les kilowattheures produits sont injectés dans le réseau électrique public. De quelle manière, quand et où les kilowattheures injectés ont été produits, sont des éléments définis par un justificatif d'origine ou un certificat. Le certificat est négociable, et passe par exemple du

Illustration 124:  
Bilan énergétique  
global d'un bâti-  
ment.



**Tableau 29: En principe, le bilan énergétique global d'un bâtiment dépend de différents paramètres (les paramètres courants sont en gras).**

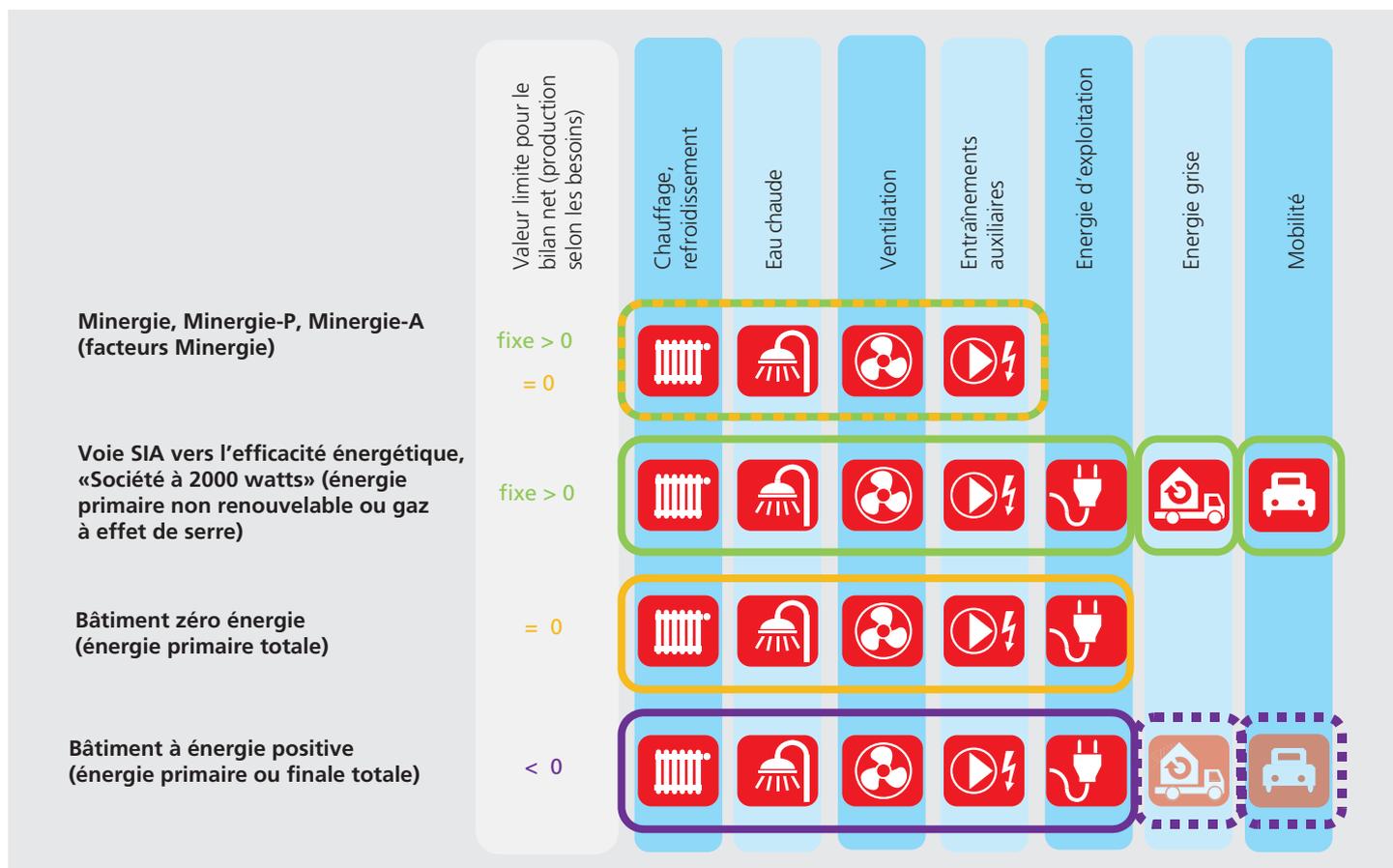
vendeur à l'acheteur sur la bourse de courant écologique. Grâce à cette possibilité de commercialisation, la comptabilité des certificats est indépendante de la provenance réelle de la composition instantanée de l'électricité dans le réseau. Cette comptabilité de l'électricité permet de garantir que les kilowattheures sont effectivement pro-

duits de façon écologique et ne sont consommés qu'une seule fois.

Outre le certificat ou le justificatif d'origine pour l'électricité produite de manière écologique, il existe également la notion de la valeur ajoutée écologique: «Valeur ajoutée que présente l'électricité produite de façon écologique par rapport à l'électricité

Paramètres	Explication
Limite de bilan	<b>Technique du bâtiment, énergie d'exploitation</b> , énergie grise, mobilité
Données	<b>Valeurs de planification (besoin)</b> , valeurs mesurées (consommation)
Période	Heures, jour, semaine, mois, <b>année</b> , cycle de vie
Type de bilan	<b>Besoin ou production</b> , export ou import
Offre ou demande	Simultanéité de la production et du besoin propre
Prise en compte de l'autoproduction	<b>Concept énergétique</b> , valeur ajoutée écologique (commerce avec les certificats d'origine pour l'énergie produite de façon renouvelable)
Pondération des agents énergétiques	<b>Energie primaire totale ou non renouvelable, facteurs politiques, Minergie, émissions de gaz à effet de serre</b> , points de pollution environnementale, coûts
Facteurs de pondération des agents énergétiques pour l'exportation ou l'importation	<b>Valeurs symétriques</b> ou asymétriques, qui peuvent être des valeurs <b>fixes</b> , saisonnières, mensuelles, horaires ou instantanées

*Illustration 125: Différentes limites de bilan, exigences en termes de bilan net et pondération des agents énergétiques de différents standards de bâtiment.*



produite de façon conventionnelle. Celle-ci est négociable par exemple via des certificats, séparément de l'«électricité grise physique.» (Office fédéral de l'énergie: Guide du marquage de l'électricité, version 4.1, janvier 2012).

Pour le bilan global, il faut donc différencier le bilan énergétique réalisé sur la base du simple concept énergétique et celui réalisé sur la base du concept écologique, car le bilan énergétique et la comptabilité de la valeur ajoutée écologique sont des grandeurs indépendantes. Le bilan net sur la base du simple concept énergétique est facile à mettre en œuvre dans la pratique; seuls le besoin et la production sur le bâtiment comptent. La mise en œuvre du bilan écologique est plus compliquée. Celle-ci dépend de contrats qui peuvent varier à tout moment. Cela s'applique non seulement à la vente de certificats pour l'auto-production, mais également à l'achat d'énergie produite de façon écologique, si aucune autoproduction n'est possible. Plus la part d'énergies renouvelables dans les réseaux publics d'électricité, de gaz et de chaleur est élevée, plus les bilans énergétiques et écologiques sont similaires.

## Standards énergétiques et labels de durabilité

On tend de plus en plus à prendre en compte non seulement l'efficacité énergétique pour le chauffage, le refroidissement et la climatisation ainsi que la production d'eau chaude d'un bâtiment, mais aussi l'énergie d'exploitation globale, l'énergie grise et la mobilité. En outre, on souhaite également avoir une vision la plus globale possible de la durabilité incluant, outre les aspects énergétiques et écologiques, également des critères économiques et sociaux. Les standards énergétiques et labels de durabilité nationaux et internationaux les plus souvent appliqués en Suisse sont répertoriés dans le tableau 30. Tandis que les standards énergétiques se concentrent principalement sur les thèmes de l'énergie d'exploitation, du confort et de l'écologie des matériaux de construction, les labels de durabilité incluent également d'autres thématiques telles que le lieu, l'infrastructure et les coûts d'exploitation. L'illustration 126 montre à titre d'exemple quelques critères des standards énergétiques et labels de durabilité les plus fréquents en Suisse.

La structure de tous les standards ou labels est identique: elle comprend les trois domaines de la durabilité que sont la société, l'environnement et l'économie. Ces domaines sont divisés en champs thématiques qui contiennent chacun un ou plusieurs critères. Pour chaque standard, le contenu et l'étendue des différentes thématiques varient, tout comme la définition, l'exigence et l'évaluation des critères individuels, ce qui rend toute comparaison difficile voire impossible. Les certificats sont octroyés en fonction du degré d'adéquation avec les thématiques (tabl. 31). Dans le cas des standards énergétiques, le niveau d'exigence demandé doit être respecté par toutes les thématiques et tous les critères individuels, tandis que dans le cas des standards de durabilité, une compensation par une prestation issue de différentes thématiques peut s'effectuer.

### L'avantage

L'avantage des standards énergétiques et labels de durabilité réside dans le fait qu'un bâtiment remplit des critères et exigences bien définis dans différents domaines. Cela permet de réaliser une construction véritablement efficace et durable, de documenter la qualité requise et de la rendre visible à l'extérieur. Les avantages et inconvénients des standards et labels sont représentés dans le tableau 32.

### Standards nationaux et internationaux

Dans les bâtiments d'habitation, c'est le standard énergétique Minergie qui domine en Suisse, avec ou sans complément Eco. Dans le domaine des bâtiments administratifs, on mise de plus en plus sur des labels internationaux car les entreprises étrangères sises en Suisse exigent un standard de durabilité international. La plupart du temps, l'évaluation s'effectue selon un standard énergétique Minergie national, complété par un label de durabilité inter-

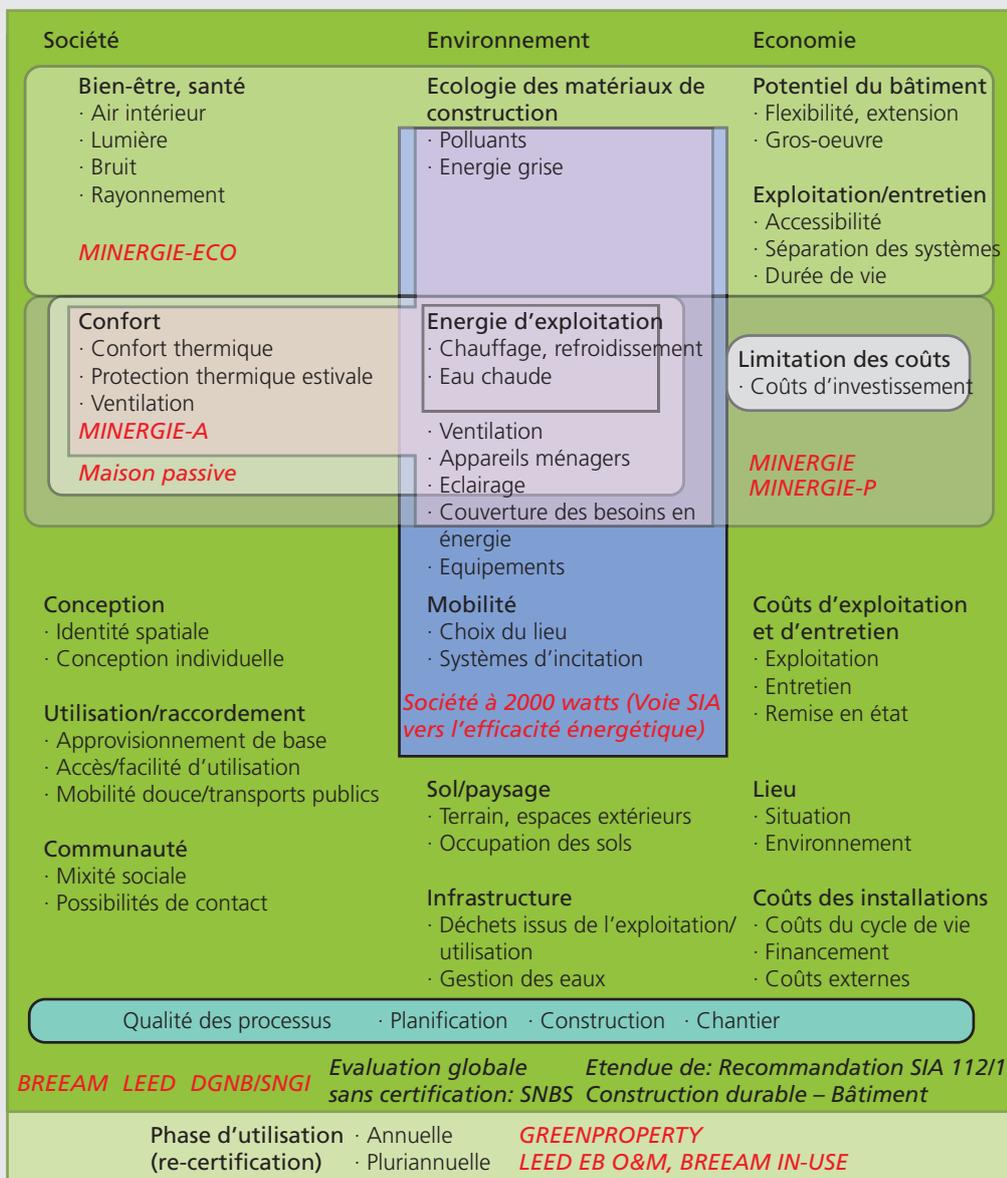


Illustration 126: Représentation schématique de thématiques et de critères des standards énergétiques et labels de durabilité les plus fréquents en Suisse.

Tableau 30: Principaux standards énergétiques, labels de durabilité et certificats énergétiques en Suisse.

Standards énergétiques (un niveau d'évaluation)	Labels de durabilité (différents niveaux d'évaluation)	Certificats énergétiques (étiquette énergie pour l'état réel)
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Minergie/-P/-A/-ECO</li> <li>■ Voie SIA vers l'efficacité énergétique (Société à 2000 watts)</li> <li>■ Maison passive (D)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ LEED (US), DGNB (D), BREEAM (UK)</li> <li>■ Cité de l'énergie</li> <li>■ Greenproperty</li> <li>■ Banque alternative suisse (Rating immobilier BAS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Certificat énergétique cantonal des bâtiments CECB</li> <li>■ Display</li> <li>■ Cahier technique SIA 2031</li> <li>■ ImmoGreen</li> </ul>

Tableau 31: Thématiques, pondération et évaluation de trois labels de durabilité.

DGNB/SNGI	LEED 2009 (New Construction)	BREEAM 2011
<b>Thématiques (pondération, nombre de critères individuels)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Qualité écologique (22,5 %, 12 critères)</li> <li>■ Qualité économique (22,5 %, 2 critères)</li> <li>■ Qualité fonctionnelle et socioculturelle (22,5 %, 15 critères)</li> <li>■ Qualité technique (22,5 %, 5 critères)</li> <li>■ Qualité des processus (10 %, 9 critères)</li> <li>■ Qualité du lieu (évaluation séparée)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Terrains durables (26 points, 15 critères)</li> <li>■ Efficacité de l'eau (10 points, 4 critères)</li> <li>■ Énergie et atmosphère (35 points, 9 critères)</li> <li>■ Matériaux et ressources (14 points, 9 critères)</li> <li>■ Climat intérieur (15 points, 17 critères)</li> <li>■ Innovation et design (6 points, 2 points de bonification)</li> <li>■ Atouts régionaux (4 points, 1 point de bonification)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Gestion (12 %, 5 critères)</li> <li>■ Santé et confort (15 %, 6 critères)</li> <li>■ Énergie (19 %, 9 critères)</li> <li>■ Eau (6 %, 4 critères)</li> <li>■ Matériaux (12,5 %, 5 critères)</li> <li>■ Déchets (7,5 %, 4 critères)</li> <li>■ Occupation des sols et écologie (10 %, 5 critères)</li> <li>■ Émissions (10 %, 7 critères)</li> <li>■ Transport (8 %, 5 critères)</li> <li>■ Innovation (10 points de bonification)</li> </ul>
<b>Évaluation (certificat)</b>		
Bronze (≥ 50 % total, ≥ 35 % par domaine) Argent (≥ 65 % total, ≥ 50 % par domaine) Or (≥ 80 % total, ≥ 65 % par domaine)	Certified (≥ 40 points) Silver (≥ 50 points) Gold (≥ 60 points) Platinum (≥ 80 points)	Pass (≥ 30 %) Good (≥ 45 %) Very Good (≥ 55 %) Excellent (≥ 70 %) Outstanding (≥ 85 %)

Tableau 32: Avantages et inconvénients des standards énergétiques et labels de durabilité.

Propriétés du bâtiment	Utilisateurs	Maître d'ouvrage ou propriétaire
<b>Avantages</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Haute efficacité énergétique</li> <li>■ Haute efficacité de l'eau</li> <li>■ Réduction des déchets</li> <li>■ Influences environnementales réduites</li> <li>■ Gros œuvre haute qualité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Faibles coûts d'exploitation</li> <li>■ Environnement d'habitation et de travail plus sain et plus confortable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Moins de vacance</li> <li>■ Loyers plus élevés</li> <li>■ Meilleur marketing</li> <li>■ Haute valeur ajoutée du bien-fonds</li> <li>■ Meilleure gestion des risques</li> <li>■ Garantie et visualisation d'une haute qualité de bâtiment</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>		
—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Loyers élevés</li> <li>■ Prix d'achat élevé</li> <li>■ Peu de mixité sociale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Coûts de planification et de construction accrus</li> <li>■ Coûts de la certification</li> </ul>

national tel que LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) ou DGNB (Deutsches Gütesiegel Nachhaltiges Bauen). A titre d'exemple, la Prime Tower de Zurich dispose de trois labels de qualité (standard Minergie, greenproperty, LEED-Gold) et la Europaallee, Baufeld H, à Zurich dispose de deux labels de qualité (objectif Minergie-A, pré-certification DGNB-Gold). Le standard national permet de couvrir les besoins du marché suisse, tandis que le label international permet de réaliser une comparaison au niveau mondial.

Dans le cas des standards internationaux, il convient de définir si et dans quelle mesure ceux-ci prennent en compte les normes et conditions nationales en Suisse. Le standard allemand DGNB a par exemple été adapté aux besoins suisses par la Société suisse pour un marché immobilier durable (SGNI). Par contre, il n'existe par exemple pour le BREEAM aucune adaptation aux conditions suisses.

A l'échelle nationale, des instruments existants et éprouvés, tels que Minergie, les normes et cahiers techniques SIA, la Société à 2000 watts, les Recommandations KBOB et l'Association eco-bau, offrent de bonnes conditions pour une construction durable. Sur la base de ces instruments, le label de durabilité Greenproperty (Credit Suisse) a été créé en 2009 et en 2013, le «Standard de Construction Durable Suisse SNBS» (association Réseau Construction durable Suisse) a été lancé dans une phase pilote. Le SNBS n'octroie aucun certificat mais donne des indications sur la qualité d'un bâtiment en termes de durabilité. La Banque suisse alternative a développé un système pour évaluer les constructions d'habitation nouvelles et existantes durables et pour déterminer les bonifications d'intérêts.

### Catégorie de bâtiment

Tous les standards et labels proposent des certificats pour différentes catégories de bâtiments nouveaux et existants. Le LEED propose en outre le certificat LEED gros œuvre (core and shell). En principe, les standards ou labels se basent sur des va-

leurs de planification et comprennent la phase de planification, la réalisation et la réception d'un bâtiment. Certains labels proposent pour la phase d'exploitation des certificats supplémentaires: Par exemple LEED EB O&M (Existing Building operation & maintenance) et BREEAM In-Use.

### Limite de bilan

En principe, les certificats ainsi que tous les standards énergétiques et labels de durabilité se réfèrent au bâtiment, c'est-à-dire que chaque bâtiment doit remplir les critères correspondants. Pour les petits et grands groupes de bâtiments, il existe toutefois également des certificats spéciaux:

- Minergie-A (p. ex. une zone de construction)
- DGNB für Stadtquartiere
- LEED for Neighborhood
- BREEAM for Communities
- Cité de l'énergie (commune, région, quartiers à 2000 watts)

### Certificat énergétique

Le certificat énergétique documente l'état réel d'un bâtiment en termes de qualité énergétique de l'enveloppe du bâtiment et d'énergie d'exploitation requise (tabl. 30). Le besoin ou la consommation d'énergie d'un bâtiment est déterminé et restitué dans une étiquette énergie. Le certificat énergétique des bâtiments est ainsi un composant important des standards énergétiques et labels de durabilité.

### Perspective

Les standards énergétiques et labels de durabilité sont utilisés en tant qu'outils de stratégie et de qualité pour les constructions nouvelles et existantes. A l'avenir, on exigera de plus en plus des bâtiments certifiés et en raison de l'internationalisation ou des diverses orientations des différents standards ou labels, les certifications doubles et multiples seront de plus en plus nombreuses. Une harmonisation des labels de durabilité serait souhaitable.

## Sources

- Wallbaum, H., Hardziewski, R.: Minergie und die anderen – Vergleich von vier Labels. TEC 47 (2011)
- Kron B.: Nachhaltig und national. Haus-tech Nr. 6 (2013)
- Cahier technique SIA 2031: Certificat énergétique des bâtiments, 2009
- Cahier technique SIA 2040: Voie SIA vers l'efficacité énergétique, 2011
- Recommandation SIA 112/1: Construction durable - Bâtiment
- [www.minergie.ch](http://www.minergie.ch), [www.breeam.org](http://www.breeam.org), [www.usgbc.org](http://www.usgbc.org), [www.dgnb.de](http://www.dgnb.de), [www.nnbs.ch](http://www.nnbs.ch), [www.sgni.ch](http://www.sgni.ch)
- [www.geak.ch](http://www.geak.ch), [www.energiestadt.ch](http://www.energiestadt.ch), [www.novartlantis.ch](http://www.novartlantis.ch), <http://www.bbl.admin.ch/kbob>
- [www.credit-suisse.com/ch/real\\_estate/doc/GreenProperty/greenproperty\\_imagebroschuere\\_d.pdf](http://www.credit-suisse.com/ch/real_estate/doc/GreenProperty/greenproperty_imagebroschuere_d.pdf) (12.06.2013)
- [www.abs.ch/de/produkte-dienstleistungen/finanzieren/eigenheim/immobilienrating/](http://www.abs.ch/de/produkte-dienstleistungen/finanzieren/eigenheim/immobilienrating/)(12.06.2013)
- [www.greenbuilding.ch](http://www.greenbuilding.ch)

# Annexe

## Auteurs

**Armin Binz**, Prof. architecte dipl. EPF/SIA; jusqu'à fin 2012 directeur de l'Institut Energie am Bau der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW). Directeur de l'Agence Minergie Bâtiment et membre de la Direction de Minergie de 2006 à fin 2012. Depuis, conseiller indépendant (Binz Energie am Bau GmbH).

**Jürg Bichsel**, Prof., Dr ès sc. techn. EPFZ, ing. électricien dipl. EPFZ. Directeur de l'Institut Energie am Bau an der FHNW. Auparavant, responsable du développement chez Sauter AG (automation du bâtiment).

**Achim Geissler**, Prof. Dr, ing. chimiste dipl., directeur du groupe Bau am Institut Energie am Bau de la haute-école d'architecture, de construction et de géomatique à FHNW. Chargé de cours pour la construction durable et l'efficacité énergétique, physique du bâtiment et simulation d'appareils à FHNW.

**Monika Hall**, Dr en physique du bâtiment, ing. chimiste dipl. ET. Collaboratrice scientifique et chargée de cours à FHNW, Institut Energie am Bau.

**Heinrich Huber**, Prof., ing. mécanicien dipl. et ing. CVC HES, MAS FHNW Construction durable. Chargé de cours en technique du bâtiment à FHNW, directeur de l'Agence Minergie Bâtiment.

**Gregor Steinke**, ing. dipl., architecte ET, études post-grade Energie HES, chargé de cours et collaborateur scientifique à FHNW dans le domaine de la construction durable.

**Beate Weickgenannt**, ing. en technique du bâtiment dipl. TU; collaboratrice scientifique à l'Institut Energie am Bau de FHNW.

## Répertoire des mots-clés

Société à 2000 watts 115

### A

Absorption 36, 41  
Aération automatique par les fenêtres 72  
Aération par les fenêtres 65  
Aération transversale 65  
Aérogels 24  
Agents énergétiques primaires 10  
Agriculture 6  
Air chaud 77  
Air de combustion 58  
Amortissement énergétique 100  
Angle d'incidence 38  
Angle solide 83  
Annexe 19  
Appareils de façade 72  
Appareils de pièces individuelles 73  
Appareils de ventilation des pièces individuelles 72  
Appareils ménagers 75  
Appareils split 64  
Apports thermiques 47  
Approvisionnement en lumière naturelle 42  
Aspirateur 82  
Automatisation du bâtiment 111  
Autonomie en lumière naturelle 45  
Autoproduction 7

### B

Balcon 19  
Bâtiment à énergie positive 115  
Bâtiment Minergie-A 100  
Bâtiments d'habitation 6  
Bâtiment zéro énergie 100, 115  
Besoin en puissance de chauffage 51  
Bilan écologique 114  
Biocides 26  
Blanc chaud 87  
Blanc lumière du jour 87  
BREEAM 119  
BREEAM In-Use 119  
Briques recuites 26  
Bruit 72  
Bureaux 6  
Buses à longue portée 69

### C

Capacité d'accumulation thermique 39  
Capteurs solaires 54  
Catégorie de bâtiment 119  
Cave 21  
Cellules cristallines 92  
Centrales de chauffage 16  
Chaîne hi-fi 82  
Chape en mortier de ciment 42  
Charbon actif 67  
Chauffage 7  
Chauffage à bois 59  
Chauffage au sol 21, 52  
Chauffage de plafond 52  
Chauffages à bois 50, 58  
Cheminées 58  
Coefficients de performance annuels 64  
Colonnes montantes 34  
Commerce 6  
Commune 17  
Compacité 19  
Complément Eco 117  
Concentration de CO<sub>2</sub> 68  
Concept à énergie positive 20  
Condenseur 81  
Conductivité thermique 22  
Confort acoustique 12  
Confort olfactif 12  
Confort thermique 11  
Confort visuel 11  
Congélateur 78  
Construction en bois 25  
Construction en bois massif 42  
Construction légère 42  
Construction massive 24  
Corps de chauffe 51  
Corps thermorayonnants 84  
Couverture élevée des besoins 15

### D

Débit d'air extérieur 62  
Degré d'éblouissement direct (UGR) 46  
Dérivation 74  
DGNB 119  
DGNB-Gold 119  
Diffuseurs 89  
Diffuseurs circulaires 69  
Distribution de chaleur 51  
Durée de vie 85

**E**

Eclairage 7, 9  
 Ecoles 6  
 Effet d'autorégulation 54  
 Efficacité lumineuse 85  
 Electroluminescence 88  
 Éléments semi-conducteurs 88  
 Emissions de gaz à effet de serre 5  
 Énergie auxiliaire 57  
 Énergie finale 10  
 Énergie grise 5, 7, 9, 97  
 Énergie primaire 105  
 Énergie utile 10  
 Entretoise 27  
 Entretoises entre les vitres 35  
 Enveloppe du bâtiment 19  
 Enveloppe thermique du bâtiment 20  
 EPS 23  
 Étage supplémentaire 19  
 Exergie 103  
 Extraction d'air de la table de cuisson dans les logements 67

**F**

Façade avec ventilation 28  
 Façade compacte 28  
 Façade-rideau 47  
 Facteur d'apports solaires 48  
 Facteur de lumière naturelle 42  
 Facteurs de pondération 115  
 Fenêtres en bandeau 47  
 Fibres de bois 23  
 Fibres de cellulose 23  
 Flux lumineux 83  
 Fours de cuisson 77  
 Freecooling 11

**G**

Gaz de remplissage 35  
 Générateurs de froid 64  
 Granulés d'aérogel 31  
 Granulés de verre soufflés 31

**H**

Hôpitaux/maisons de retraite 6  
 Hottes d'extraction d'air 67  
 Humidité de l'air ambiant 62  
 Hygiène 61

**I**

Indépendant de l'air ambiant 58  
 Indice de rendu des couleurs 84, 85  
 Industrie 6  
 Installation PV 49  
 Installations de climatisation 64  
 Installation solaire thermique 50  
 Intégration de loggias 19  
 Intégration hydraulique 54  
 Intensité d'éclairage 45  
 Intervalles entre vitres 35  
 Isolant 22  
 Isolant soufflé 31  
 Isolants thermiques haute performance 24  
 Isolation thermique intérieure 30

**J**

Justificatif par performances ponctuelles 21

**L**

Label de durabilité 117  
 Laine de verre 23  
 Laine minérale 23, 24  
 Lampe à décharge 84  
 Lampe à décharge basse pression 84  
 Lampe à décharge de gaz 86  
 Lampe à décharge haute pression 84  
 Lampe à économie d'énergie 84  
 Lampe à incandescence 85  
 Lampe à incandescence halogène 85  
 Lampe fluocompacte 84  
 Lampe fluorescente 84  
 Lampes aux halogénures métalliques 84  
 Lampes à vapeur de mercure 84  
 Lampes basses pression à vapeur de mercure 87  
 Lave-linge 80  
 Lecteur DVD 82  
 LED 84, 88  
 LEED 119  
 LEED EB O&M 119  
 Life Cycle Energy 100  
 Limite de bilan 115  
 Logements à l'étage 73  
 Loggias 19  
 Lotissement 17, 18  
 Lumière LED 88  
 Luminescence 84

**M**

Machine à café 82  
 Maçonnerie simple paroi 29  
 Matériaux 99  
 Mesure de l'étanchéité à l'air 34  
 Minergie 115  
 Minergie-A 115, 119  
 Minergie-P 115  
 Mobilité 8, 10  
 Module Minergie 59, 74  
 Module PV 92  
 Moteur EC 74  
 Mousse de résine phénolique 23  
 Mur enduit à double paroi 29

**N**

Nanomousses 24  
 Niveau de transformation 10

**O**

OLED 84  
 Ombrage 19  
 Ordinateur 82

**P**

Panneau de liège 23  
 Panneaux d'aérogel 31  
 Panneaux de perlite 31  
 Panneaux de silicate de calcium 31  
 Panneaux d'isolation sous vide 24  
 Parc immobilier 5  
 Pare-vapeur 24  
 Part de vitres 40  
 Part d'ossature des fenêtres 48  
 Part vitrée de la façade 43  
 Passages à travers la surface de la toiture 24  
 Performance d'essorage 80  
 Périmètre de bilan 97  
 Perte de charge 74  
 Pertes thermiques par transmission 23  
 Photovoltaïque 15, 20, 92  
 Placoplâtre 27  
 Planification de la lumière naturelle 44  
 Planification énergétique 17  
 Plaque de cuisson 75  
 Poêle à granulés 53  
 Poêles à bois 58  
 Pointes de puissance 49  
 Pompes à chaleur air-eau 50  
 Pompes à chaleur à sondes géo-thermiques 57  
 Pompes à chaleur eau glycolée-eau 50

Ponts thermiques 32, 47  
 Ponts thermiques linéaires 32  
 Probabilité d'éblouissement 46  
 Projecteur halogène 75  
 Protection contre la foudre 92  
 Protection contre les bruits d'impact 21  
 Protection solaire 39  
 Protection thermique 21  
 Protection thermique estivale 39, 41  
 PUR 23

**Q**

Quantité de lumière 83  
 Quartier 17

**R**

Rayonnement 36  
 Rayonnement diffus 36  
 Rayonnement direct 36  
 Rayonnement global 36  
 Rayonnement solaire 36  
 Recommandations KBOB 119  
 Réflecteurs 89  
 Réflexion 36  
 Refroidissement ambiant 64  
 Refroidissement de retour 64  
 Refroidissement nocturne 43  
 Régulateur de débit volumique variable 72  
 Régulation de puissance 57  
 Régulation selon les besoins 72  
 Résistance à la perméabilité thermique 42  
 Revêtement 35  
 Risque d'humidité 32

**S**

Satellite 59  
 Sèche-linge 80  
 Sèche-linge à condensation 81  
 Sèche-linge à évacuation 81  
 SGNI 119  
 SNBS 119  
 Société à 2000 watts 115  
 Solaire électrique 56  
 Solaire thermique 56  
 Sous-structure 27  
 Spectre solaire 37  
 Spirale chauffante 75  
 Standard de Construction Durable Suisse 119  
 Standard Minergie 106  
 Standards énergétiques 49  
 Stéradians 83

Surface de référence énergétique 6  
Surface vitrée 19  
Systèmes à auto-apprentissage 113  
Systèmes de réseau de chauffage 16

## **T**

Table à induction 76  
Table de cuisson 76  
Tables en vitrocéramique 75  
Technologie à couche mince 93  
Technologie d'absorbeur 54, 59  
Téléviseur 82  
Température de couleur 84  
Température de départ 52  
Toitures chaudes 24  
Transmission 36  
Transport de chaleur par convection 35  
Transports 6  
Treillis d'armature 26

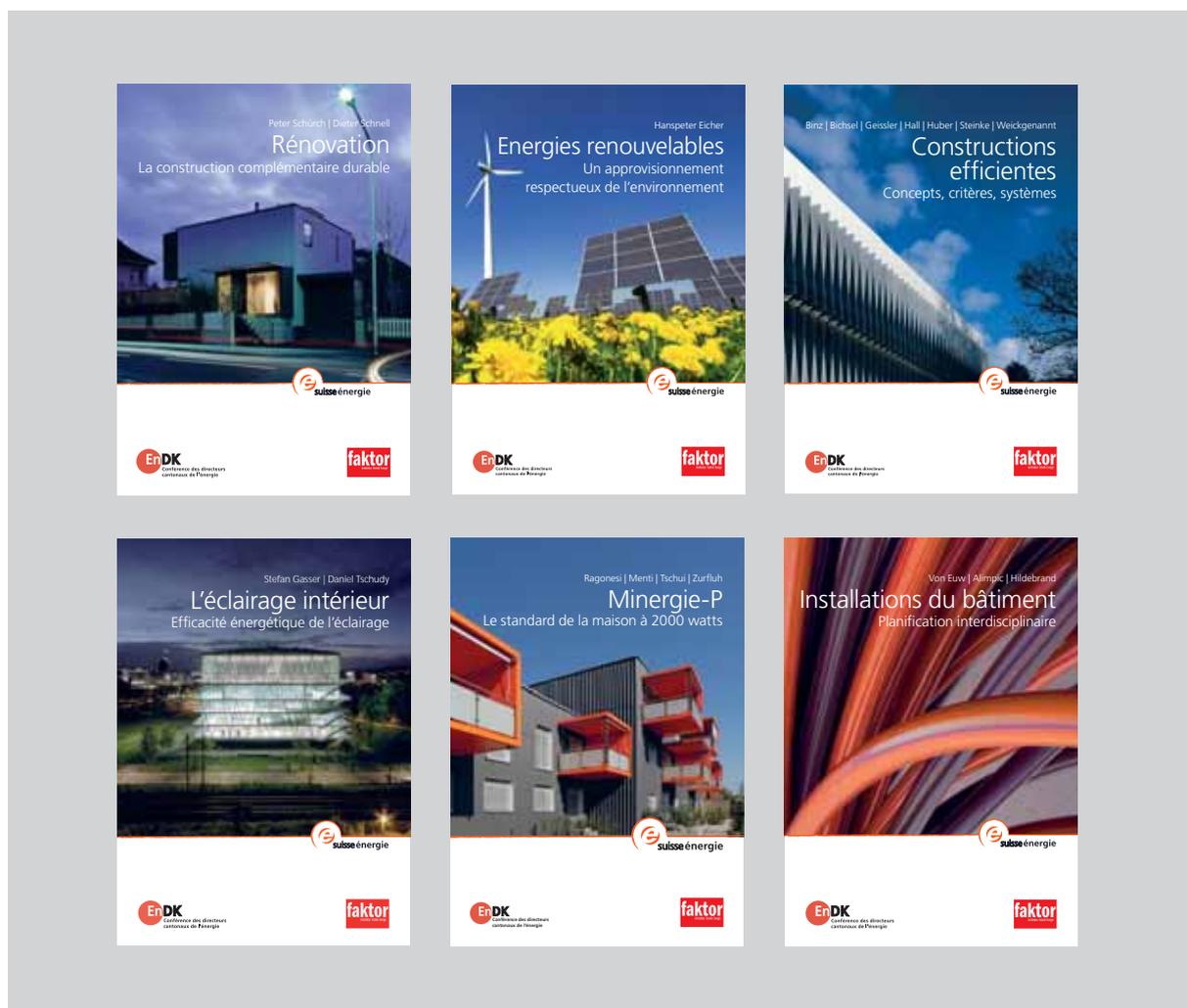
## **V**

Valeur g 38  
Valeur  $U_{cw}$  48  
Ventilation 40  
Ventilation par déplacement 69  
Ventilation par mélange 69  
Verre cellulaire 23  
Ville 17, 18  
Vitres 35  
Voie SIA vers l'efficacité énergétique 101  
Voie vers l'efficacité énergétique 106

## **Z**

Zones bâties 18

# La bibliothèque spécialisée



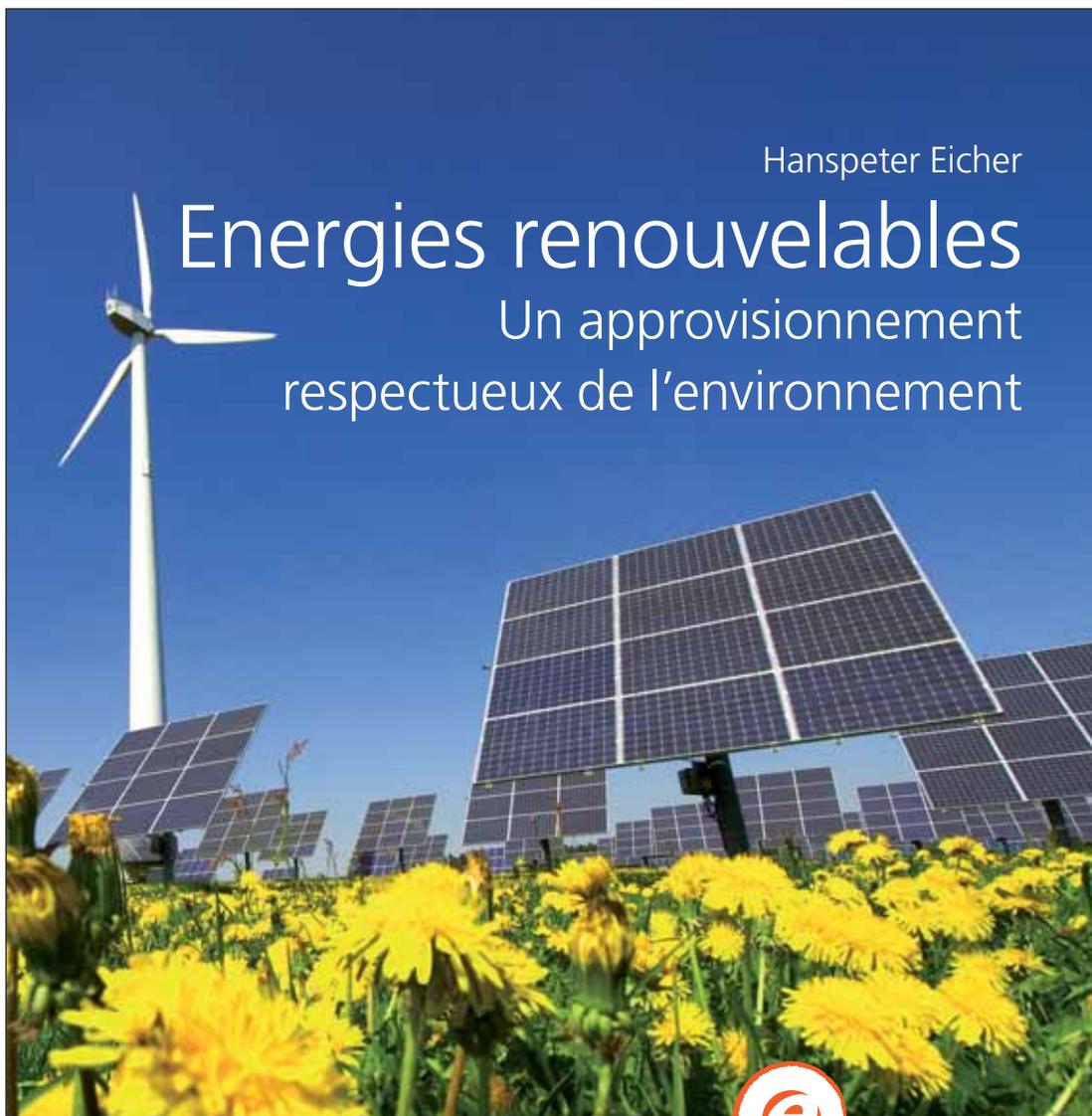
Version imprimée disponible à l'adresse: [www.faktor.ch](http://www.faktor.ch)

# sur des sujets d'actualité

Hanspeter Eicher

## Energies renouvelables

Un approvisionnement  
respectueux de l'environnement



suisse énergie



Conférence des directeurs  
cantonaux de l'énergie

