

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

Nouvelle construction

Constructions efficientes



suisse énergie

Notre engagement : notre futur.



Conférence des directeurs
cantonaux de l'énergie



Contenu

| | | | |
|---|-----------|---|------------|
| 1. Énergie et bâtiment | 5 | 4. Installations techniques du bâtiment | 103 |
| 1.1 Énergie dans le bâtiment et le parc immobilier suisse | 5 | 4.1 Prescriptions légales | 103 |
| 1.2 Maison, lotissement, site, quartier, ville | 11 | 4.2 Chauffage et ECS | 105 |
| 1.3 Concepts, stratégies, standards | 16 | 4.3 Ventilation, climatisation et refroidissement | 115 |
| 1.4 Réduction d'énergie et auto-production | 24 | 4.4 Appareils ménagers | 128 |
| 1.5 Bilan énergétique global | 26 | 4.5 Éclairage | 132 |
| 1.6 Standards énergétiques et labels de durabilité | 30 | 4.6 Photovoltaïque | 138 |
| 1.7 Énergie grise | 33 | 4.7 Installations techniques générales | 145 |
| 1.8 Confort | 38 | 4.8 Automatisation du bâtiment | 148 |
| 1.9 Sources | 41 | 4.9 Sources | 153 |
| 2. Bâtiment – Forme et enveloppe | 43 | 5. Annexe | 154 |
| 2.1 Corps du bâtiment | 43 | 5.1 Auteurs | 154 |
| 2.2 Enveloppe du bâtiment | 44 | 5.2 Normes et règlements | 155 |
| 2.3 Protection thermique | 45 | 5.3 Index des mots clés | 156 |
| 2.4 Éléments de construction opaques de l'enveloppe thermique du bâtiment | 49 | | |
| 2.5 Élimination des points faibles | 56 | | |
| 2.6 Vitres et fenêtres | 58 | | |
| 2.7 Façades-rideaux | 63 | | |
| 2.8 Protection thermique estivale | 65 | | |
| 2.9 Approvisionnement en lumière naturelle | 70 | | |
| 2.10 Sources | 73 | | |
| 3. Enveloppes de bâtiment hautement isolées | 75 | | |
| 3.1 Compréhension | 75 | | |
| 3.2 Considérations conceptuelles | 75 | | |
| 3.3 Éléments | 78 | | |
| 3.4 Éléments de construction transparents | 94 | | |
| 3.5 Ponts thermiques | 96 | | |

Impressum

Nouvelle construction – Constructions efficaces

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

Lectorat et mise en page:
Faktor Journalisten AG, Zurich;
Othmar Humm, Noemi Bösch

Traduction:
Messerknecht Traductions spécialisées,
Monthey; Ilsegret Messerknecht

Lectorat: Charles Weinmann, Lausanne

Photo de couverture: FHNW Campus
Muttens de Pool Architekten (Photo:
Andrea Helbling, Arazebra, Zurich)

Cette publication fait partie de la série
d'ouvrages spécialisés «Construction du-
rable et rénovation». Cette publication a
été financée par l'Office fédéral de l'éner-
gie OFEN/SuisseEnergie et la Conférence
des directeurs cantonaux de l'énergie
(EnDK).

Commande: À télécharger gratuitement
sous www.suisseenergie.ch

Janvier 2021

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. 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 (PAC ou enduits extérieurs), tandis que d'autres ont été rattrapées par l'évolution et ont disparu 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 PAC 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. Étant 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.

Énergie et bâtiment

Armin Binz 1.1 Énergie dans le bâtiment et le parc immobilier suisse

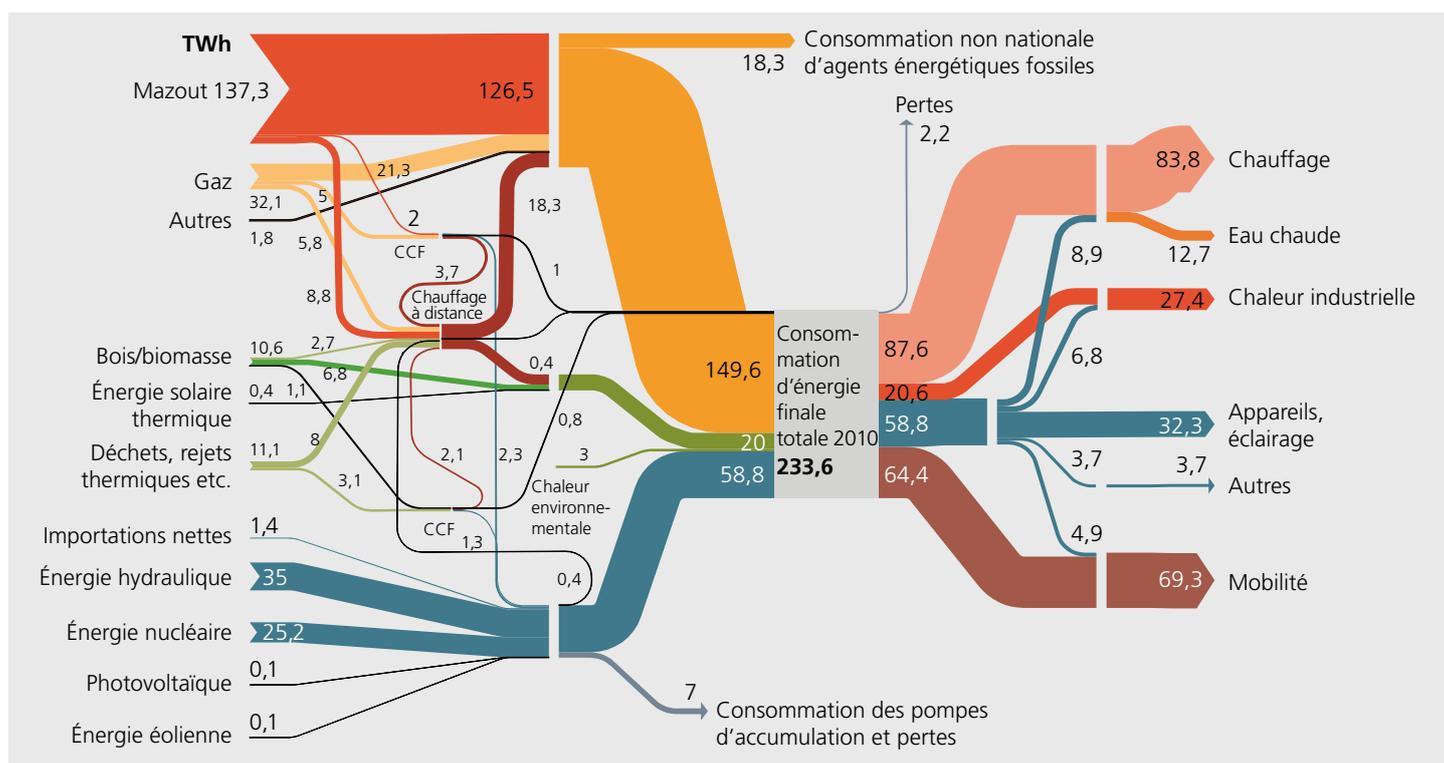
Plus de la moitié de la consommation d'énergie et env. la moitié de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre en Suisse est affectée à la réalisation, à l'entretien et à l'exploitation du parc immobilier (Illustr. 1.1). L'exploitation des bâtiments requiert de la chaleur utile, de l'eau chaude sanitaire (ECS) 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 1.3 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 1.3 mais est néanmoins impor-

tant). L'illustration 1.2 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 2016, les investissements dans l'immobilier s'élevaient en Suisse à 50 milliards de francs au total, deux tiers étant destinés à la construction, un tiers à la rénovation. Sur plus de 16 milliards de francs injectés dans la rénovation, env. un quart concernait des mesures pertinentes sur le plan énergétique. La moitié de cette somme était relative à des mesures constructives et 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 capables de mieux remplir leurs fonctions que les anciennes. Toutefois, un vitrage de protection thermique moderne apporte l'amélioration énergétique souhaitée.

Illustration 1.1: Consommation d'énergie finale 2010 en Suisse par utilisation en TWh/a. (Source: [1], Base de données: [2])



tée (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 normalement être du même ordre de grandeur que dans la rénovation (Illustr. 1.4). 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 1.2:
La surface de référence énergétique du parc immobilier suisse par utilisation (2004). 100 % représentent 665 millions de m². (Source [3])

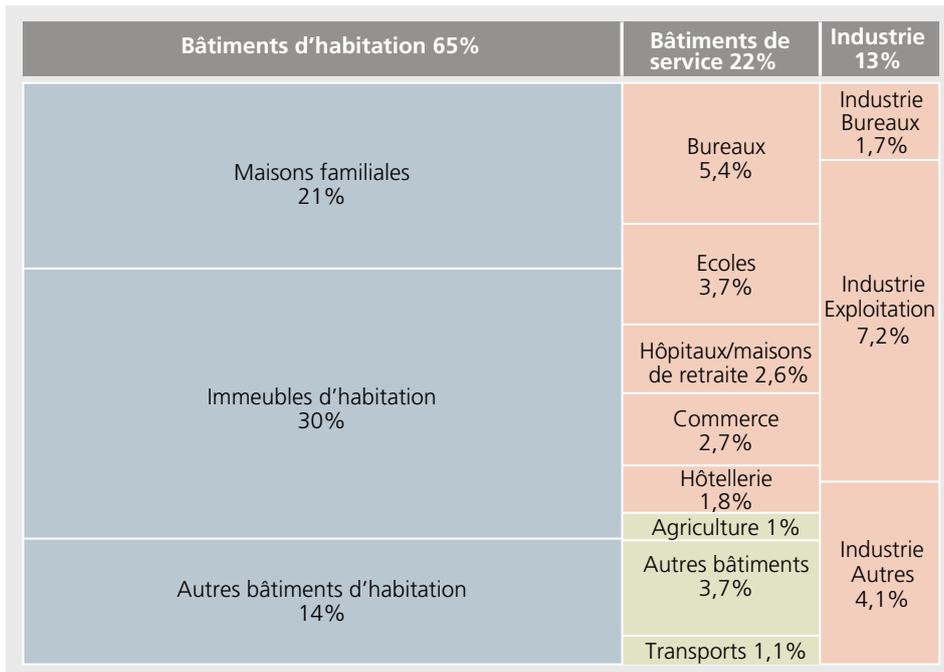
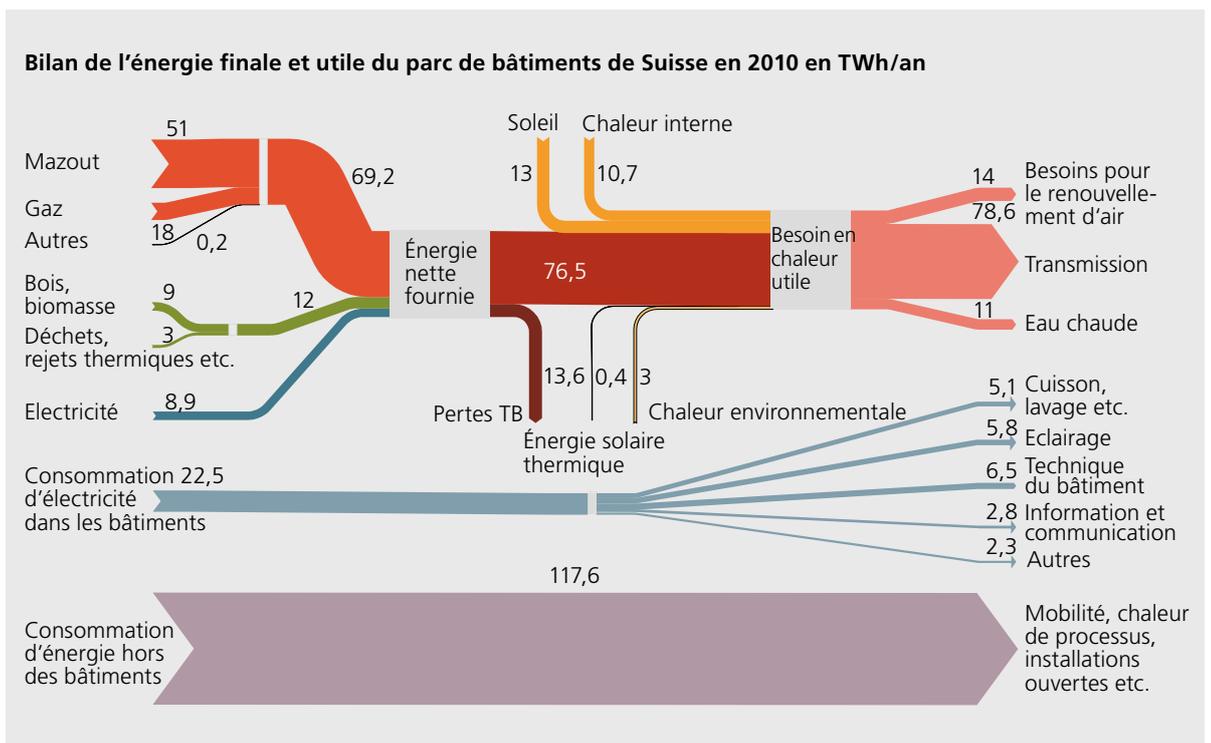


Illustration 1.3:
Consommation d'énergie finale 2010 en Suisse en TWh/a, réparti pour la part dédiée à l'exploitation et à l'utilisation du parc immobilier et consommation pour tous les autres usages (mobilité, chaleur industrielle etc.). Représenté selon les définitions de l'énergie de la SIA (énergie nette fournie au lieu d'énergie finale). (Source: [1], [5], [6], [7] et calculs 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 des locaux: Ce domaine ayant été traité en priorité par le passé, l'optimisation continue des constructions nouvelles est aujourd'hui intégrée dans la législation. Ce domaine conserve toutefois une importance cruciale car le chauffage des locaux 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 des locaux 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 du tertiaire 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.

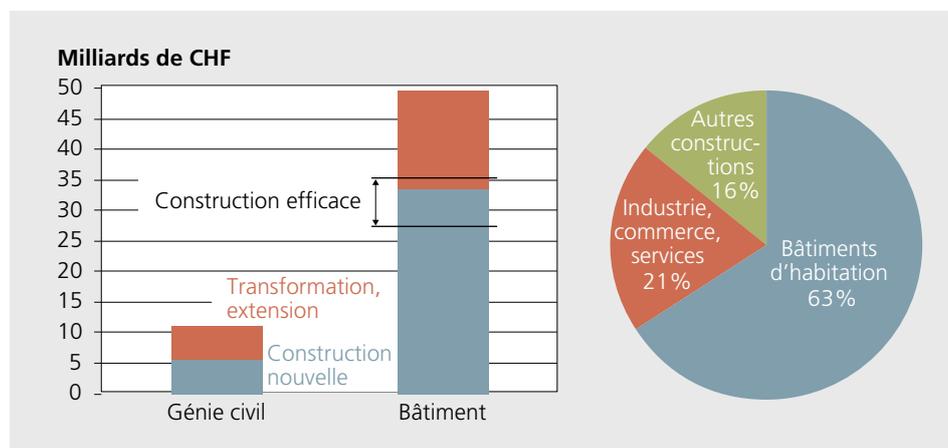
3. Eau chaude sanitaire: La marge de manœuvre, en ce qui concerne le besoin énergétique destiné à la production d'eau chaude sanitaire, se situe entre l'optimisation de la technique du bâtiment et la sobriété des utilisateurs. Ces deux approches présentent un grand potentiel.

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. Énergie 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 «Énergie 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 sanitaire, 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 1.4: Investissements dans le bâtiment en Suisse en 2016, 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.



associées ainsi que les sources d'apport d'énergies sont représentées latéralement. L'illustration 1.6 montre la situation actuelle de la construction efficace.

Chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire

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 sanitaire sont malgré tout sévères et requièrent un standard assez élevé en termes d'efficacité énergétique dans ces domaines. Le besoin en chaleur utile de 46 kWh/(m²an) est tout juste inférieur à la limite légale (base: Modèles de prescriptions énergétiques des cantons, MoPEC 2008). Les valeurs des déperditions de chaleur par la ventilation et des apports des rejets thermiques par les personnes et la consommation d'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 sanitaire peuvent être couverts par des énergies non renouvelables. Étant 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'isola-

tion. Le choix d'un chauffage à bois serait envisageable, mais engendrerait également des coûts nettement supérieurs. C'est une solution fréquemment utilisée qui a été choisie: une installation de capteurs solaires thermiques relativement modeste permet de produire env. 60 % de l'eau chaude sanitaire 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.

Électricité pour les appareils et l'éclairage

L'énergie finale va jusqu'aux compteurs à l'entrée des bâtiments. L'énergie utile est la prestation fournie. Il est inhabituel d'indiquer, pour la consommation d'électricité, les rendements de la transformation de l'énergie finale en énergie utile (c'est la chaleur utile fournie au four par kWh d'électricité consommé 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 (issue du réseau) a été produit (en moyenne) à partir de 2,52 kWh d'énergie primaire non renouvelable [4]. 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.

Énergie grise

De grandes quantités d'énergie, appelée énergie grise, se cachent dans la fabrication, 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. 1.6). 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 1.6 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 séquence.

Agents énergétiques primaires: ils n'ont pas encore été soumis à une transformation. Exemple: mazout (pétrole brut), gaz naturel, uranium, bois forestier, rayonnement solaire, chaleur terrestre et environnementale.

Énergie finale: énergie 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.

Énergie utile: énergie 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

1.2 Maison, lotissement, site, quartier, ville

La construction efficace 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 efficace de l'énergie.

L'illustration 1.7 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 efficace, 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 sanitaire efficaces 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 possible pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire.
- 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.
- La sobriété 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 besoins: 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

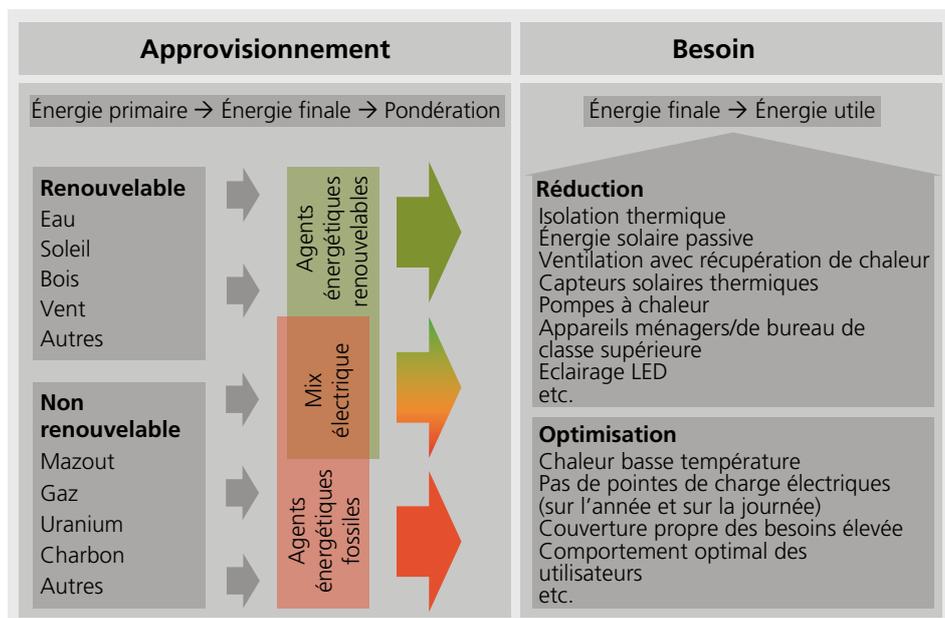


Illustration 1.7: Besoins et approvisionnement de l'énergie des bâtiments. Représentation schématique des domaines d'optimisation directs du bâtiment et de l'apport d'énergie nécessaire depuis l'extérieur du bâtiment.

maîtres d'ouvrage et des planificateurs du bâtiment, côté approvisionnement. L'illustration 1.8 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 à distance atteignant une taille suffisante pour permettre l'utilisation de types supplémentaires de production de chaleur, par exemple chauffages à plaquettes ou couplages chaleur-force

- Selon l'utilisation et la taille du site, des réseaux d'énergie, par exemple des réseaux à basse température, peuvent également être envisagés. L'illustration 1.9 montre une représentation tirée de l'Aide à l'utilisation de Minergie, qui comprend la définition suivante: «Un réseau d'énergie est un ré-

Illustration 1.8:
Approvisionnement en énergie à partir de l'environnement proche et lointain.
Représentation schématique des achats d'énergie du bâtiment.

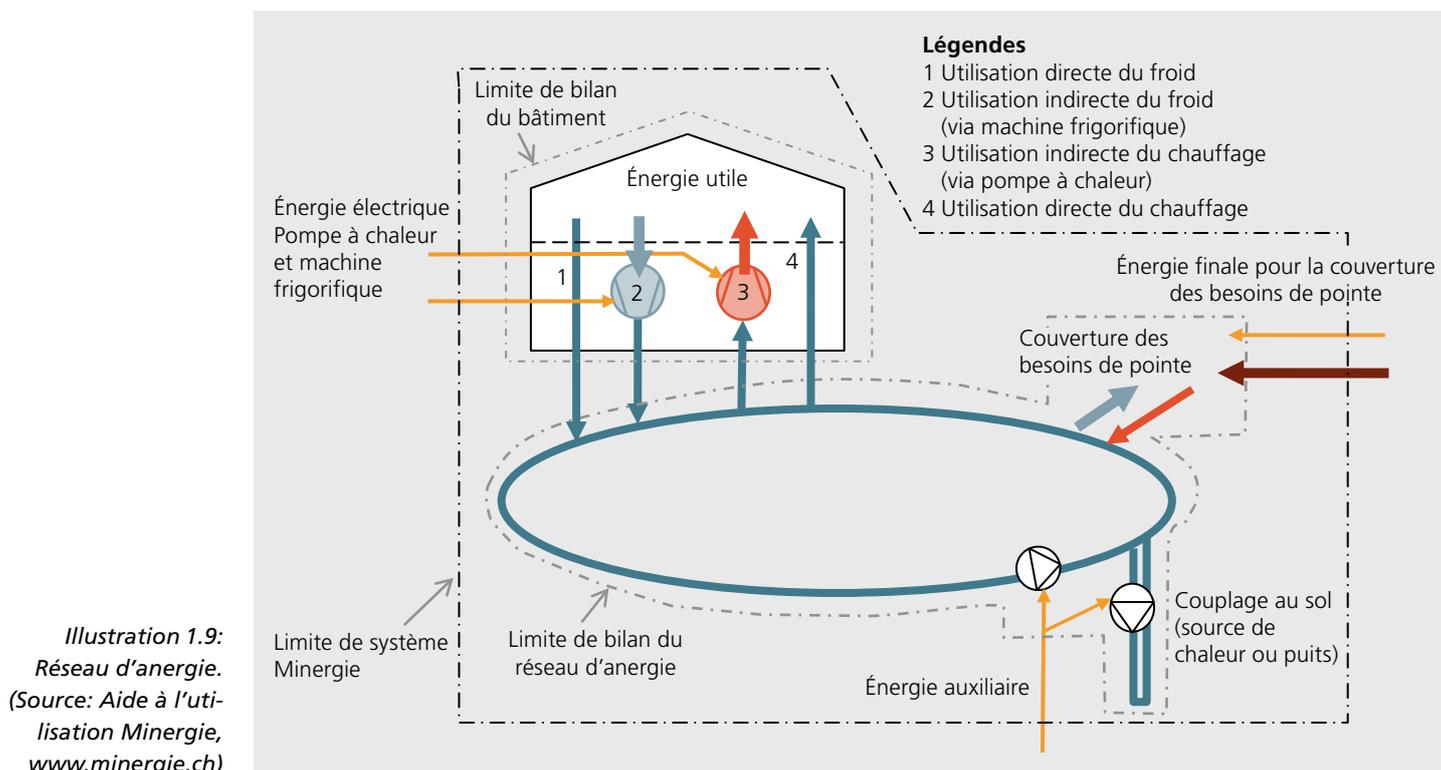
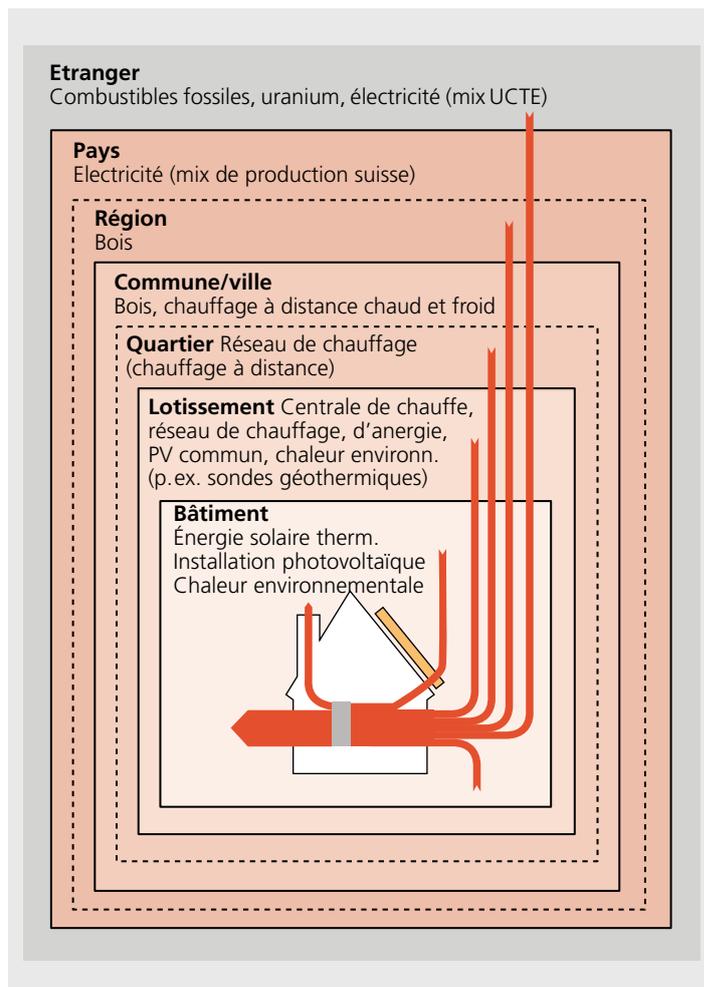


Illustration 1.9:
Réseau d'énergie.
(Source: Aide à l'utilisation Minergie, www.minergie.ch)

seau 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

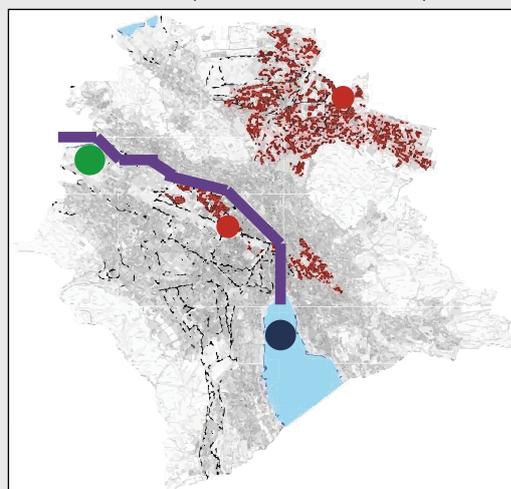
Lorsque l'on dépasse la limite entre le lotissement et le quartier, la commune ou même la ville, la situation change fondamentalement. D'un côté, les maîtres d'ouvrage et les planificateurs utilisent les offres d'approvisionnement, tandis que d'un autre côté, les fournisseurs d'énergie professionnels et les planificateurs communaux et les 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.

À 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 1.10 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 les 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 avec 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.

Illustration 1.10: Aperçu des ressources d'énergie renouvelables dans l'exemple de la ville de Zurich. (Source: Ville de Zurich, Département des services industriels)

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

Plus la zone de planification est grande, plus le cadre est politique

Le contexte régional et national est particulièrement important pour le mix énergétique et l'éventail des autres sources d'énergie comme le bois. Le niveau international est similaire pour la fourniture de sources d'énergie conventionnelles (fossiles et uranium), mais aussi pour l'électricité provenant de sources renouvelables (éolienne et photovoltaïque). Les planificateurs et les maîtres d'ouvrage doivent encore décider pour eux-mêmes s'ils veulent considérer la proximité comme un facteur positif et la distance comme un inconvénient en ce qui concerne l'origine de l'énergie. Dans le débat officiel, les opinions à ce sujet sont encore controversées. Minergie exige que l'autoproduction du bâtiment éligible au standard de construction soit également réalisée sur le bâtiment lui-même. L'électricité verte peut être achetée pour atteindre les objectifs de la voie SIA vers l'efficacité énergétique. Elle doit être au moins de qualité «naturemade star» et impliquer la conclusion d'un contrat de fourniture à long terme.

Les sites, les lotissements ou même les villes sont beaucoup plus complexes que les bâtiments. Les processus décisionnels

y sont complexes et les questions énergétiques sont étroitement liées à d'autres domaines politiques. Il va de soi que la planification de la densification dans les communes est très importante sur le plan énergétique, et l'instrument politique de la prime d'utilisation (p. ex. dans le cadre des

Instruments d'évaluation et de planification des zones bâties

Site 2000 watts: Le certificat Site 2000 watts propose une assurance de qualité globale pour les sites durables. Développée dans le cadre du programme SuisseEnergie de l'Office fédéral de l'énergie, la certification est documentée de façon détaillée. Le «Manuel relatif au certificat pour les Sites 2000 watts» et d'autres documents sont téléchargeables sur le site www.2000watt.swiss

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**.

*Illustration 1.11:
Site Hunziker à
Zurich Nord – Les
utilisations mixtes
animent le quartier.
(Source:
Site 2000 watts,
SuisseEnergie)*



prescriptions spéciales de construction pour les superstructures de sites) est extrêmement efficace. Pour les planificateurs de bâtiments, le contexte va changer de manière significative suite à l'intensification des activités de planification énergétique des communes. Il faudra tenir compte de nouvelles réglementations spécifiques aux sites et de nouvelles offres d'approvisionnement en énergie. À ce niveau, cependant, les planificateurs de bâtiments auront tendance à passer de l'action à la réaction. C'est également à ce niveau que des mesures véritablement efficaces peuvent être prises, par exemple en améliorant l'accès aux transports publics. En effet, la consommation d'énergie pour la mobilité selon la localisation du bâtiment doit être prise en compte selon le Cahier SIA 2039 «Mobilité».

1.3 Concepts, stratégies, standards

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 sanitaire 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 1.12 montre les éléments aujourd'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 prise en considération, et les potentiels d'exergie 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 1.13 représente une sélection des principaux instruments actuels.

Le Programme Bâtiments met à disposition des outils complets avec une continuité sur le long terme pour la promotion de l'efficacité énergétique dans la construction (www.dasgebaeudeprogramm.ch). Avec la prochaine génération de prescriptions

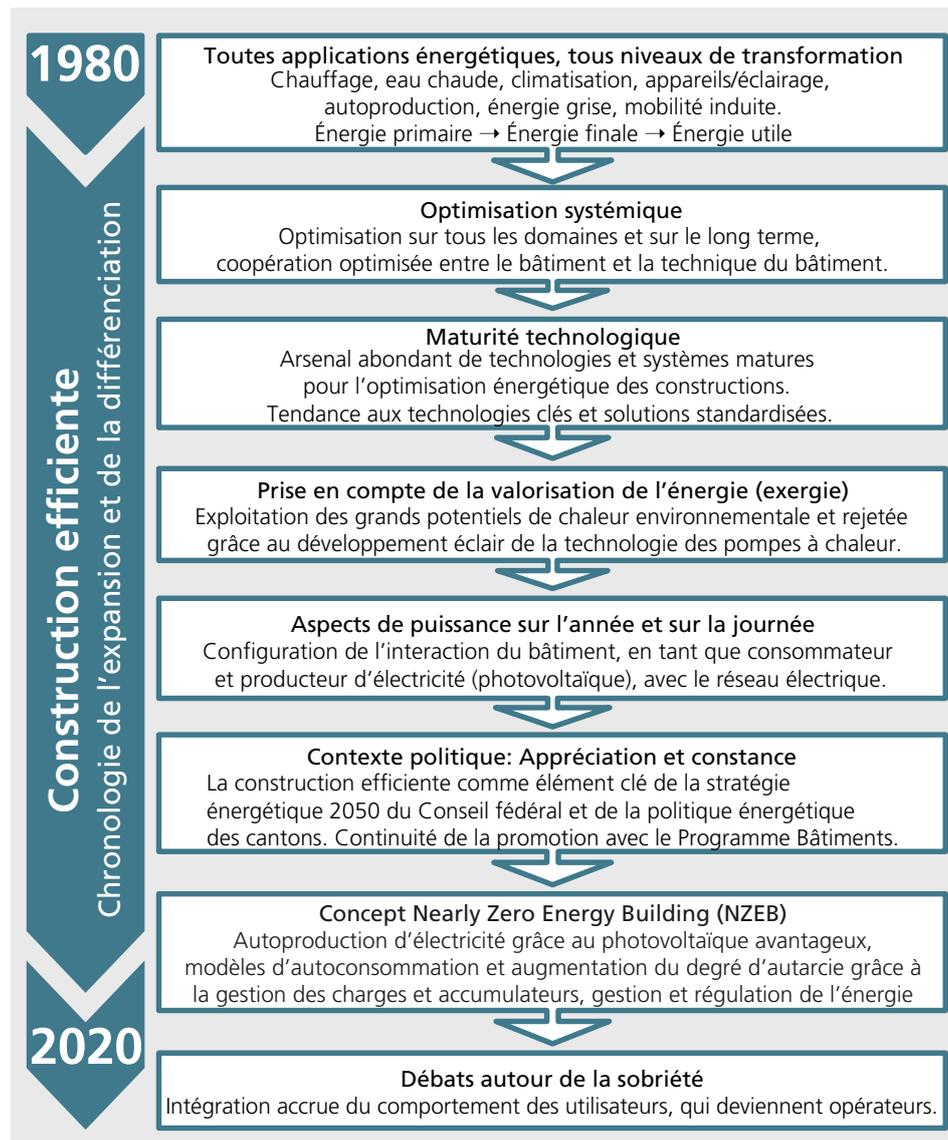


Illustration 1.12:
Thématiques,
contexte et condi-
tions de la construc-
tion efficiente.

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 efficace 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 atteindre le tournant énergétique dans lequel s'est engagé l'État. 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 1.6. Cet exemple permet d'illustrer et de commenter différents niveaux d'optimisation énergétique.

L'illustration 1.14 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 avec sondes géothermiques sont devenues une technologie clé pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. Avec des coefficients de performance annuels supérieurs à 4, elles remplissent de façon optimale l'exigence d'utilisation de l'exergie des agents énergétiques. 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

| Concepts | Méthodes et instruments | Standards et label |
|--|--|---------------------------------|
| | | MoPEC |
| | Minergie, Minergie-P, Minergie-A | |
| | Minergie-Eco | |
| | Certificat énergétique cantonal des bâtiments (CECB, CECB Plus) | |
| | | Étiquettes énerg. des appareils |
| Société à 2000 watts | Sites 2000 watts | |
| Voie SIA vers l'efficacité énergétique, SIA 2040 | Normes SIA relatives à l'énergie 380/1, 380/4, 382, 384, 385, 387/4... | |
| | Énergie grise, SIA 2032 | |
| Recomm. SIA Construction durable 112/1 | SMEO | |
| | Cité de l'énergie | |
| | Recommandations KBOB | |
| | Eco-Devis | |
| | Standard de Construction Durable Suisse, SNBS | |
| Mobilité induite, SIA 2039 | | |
| Utilisation suffisante de l'énergie | | |

Illustration 1.13: Aperçu des principaux instruments de la construction durable (sélection).

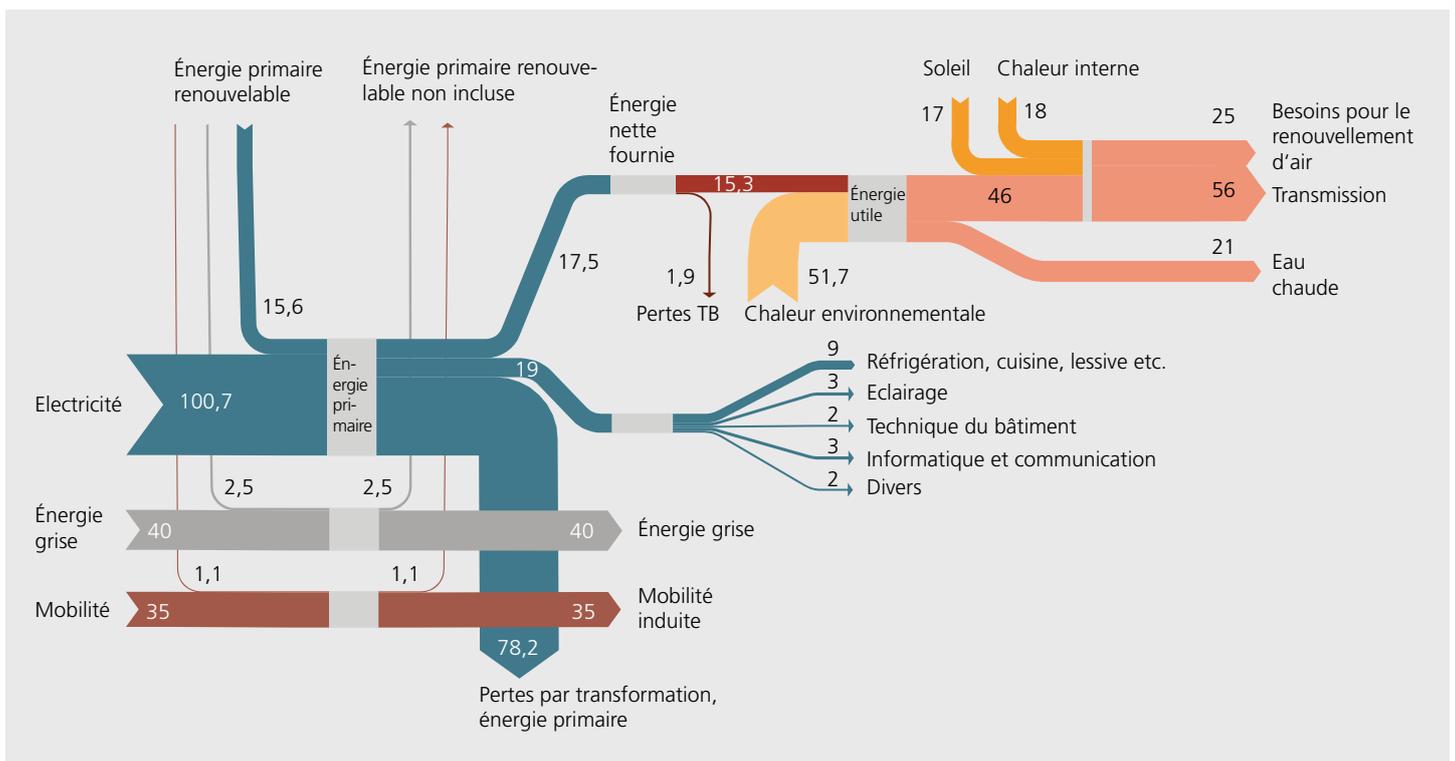
besoin en électricité important, car en Suisse, la production de 1 kWh d'électricité requiert en moyenne l'utilisation de 2,6 kWh d'énergie primaire non renouvelable. La Société à 2000 watts se base sur l'énergie primaire. Grâce au coefficient de performance annuel élevé des installations de pompes à chaleur, le facteur d'énergie primaire (non renouvelable) de l'électricité peut être plus que compensé. La Voie SIA vers l'efficacité énergétique, qui est un instrument du concept de la Société à 2000 watts, fixe également ses objectifs de valeurs cibles et ses valeurs indicatives au niveau de 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: 30 (création) + 60 (exploitation) + 30 (mobilité) = 120 kWh/(m²an). Avec 175 kWh/(m²an), l'exemple de l'illustration 1.14 est toutefois éloigné de plus de 40 % de cette valeur cible. Une exigence souvent oubliée de la Voie SIA 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 77 kWh/(m²a). 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 fournie). En outre, seule la part chaleur de la valeur limite Minergie est concernée. Avec une pondération de 2 du besoin en électricité pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, de 17,5 kWh/(m²an), le projet atteint tout juste la valeur limite de Minergie de 38 kWh/(m²an). Toutefois, d'autres exigences de Minergie ne sont pas respectées ou justifiées, notamment la ventilation automatique.

Dans l'illustration 1.15, 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

Illustration 1.14:
Flux d'énergie spécifiques en kWh par m² 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.

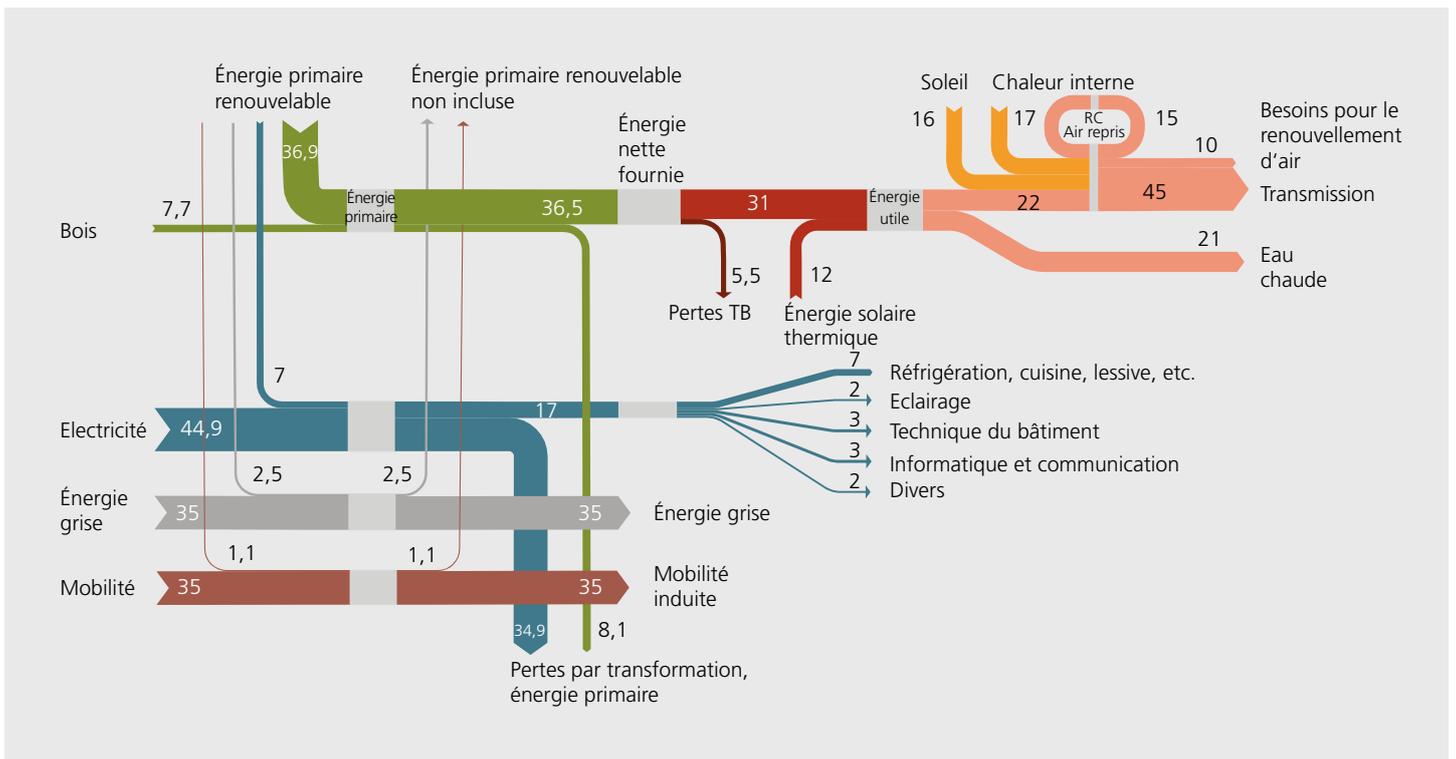


chaleur et d'autre part une protection thermique améliorée de l'enveloppe du bâtiment. En raison des déperditions plus faibles, la capacité du bâtiment à utiliser le rayonnement solaire et la chaleur interne (rejets thermiques de l'éclairage, des appareils et des personnes) est moins importante et les rendements correspondants baissent légèrement. Pour l'approvisionnement en chaleur, on utilise une énergie renouvelable locale. 60% de la production d'eau chaude sanitaire sont couverts par une installation de capteurs solaires thermiques. Pour le chauffage et le reste de la production d'eau chaude sanitaire, on utilise un chauffage à bois avec foyer automatique à granulés. Étant donné que le pouvoir calorifique du bois est renouvelable, la part d'énergie primaire non renouvelable se limite aux coupes de 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. Pour la consommation d'électricité restante, on considère que l'on utilise des appareils et des 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 10% 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 SIA vers l'efficacité énergétique, le choix de ce matériau permettant ainsi de gommer toutes les faiblesses d'un concept de bâtiment.

Dans le standard Minergie, il en va tout autrement. Le facteur de pondération pour le bois est de 0,5, de sorte que dans le cas considéré, le besoin en bois pondéré s'élève à 16,4 kWh/(m²an). S'y ajoute en outre le besoin en électricité pour la ventilation, d'environ 2 kWh/(m²an), ce qui amène l'indice Minergie pour la chaleur à 18,4 kWh/(m²an). Ceci reste donc nettement inférieur à la valeur limite Minergie de 55 kWh/(m²an) pour le besoin total en énergie, respectivement 35 kWh/(m²an) pour le besoin en énergie pour le chauffage et l'eau chaude.

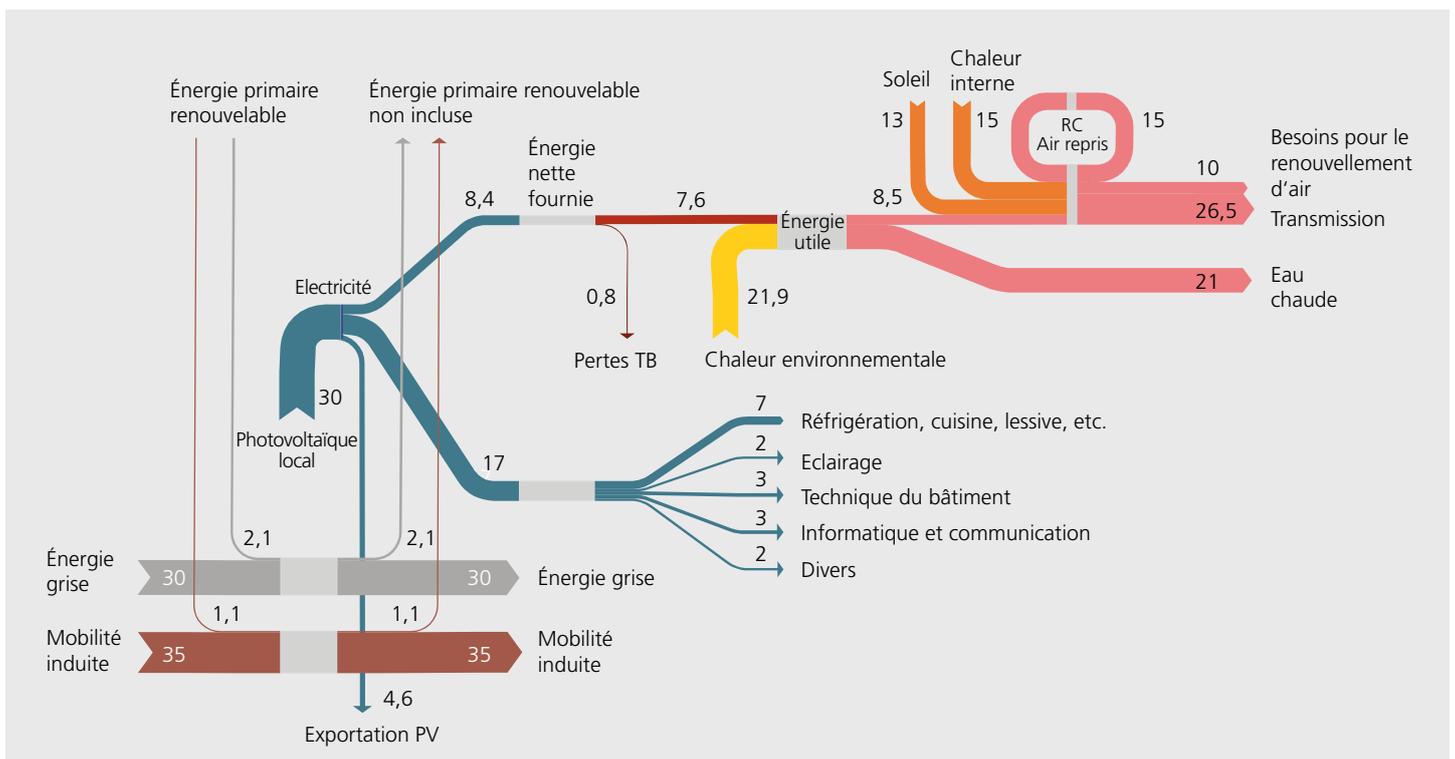
Illustration 1.15: Flux d'énergie spécifiques en kWh par m² SRE par an dans un immeuble d'habitation Minergie neuf selon le standard Minergie.



L'illustration 1.16 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'électricité 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 m² 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 m²) ou de trois étages au maximum (pour

0,3 m²). Dans tous les cas, la totalité de l'installation photovoltaïque doit être placée sur le toit, qui doit y être entièrement consacré.

Illustration 1.16:
Flux d'énergie spécifiques en kWh par m² SRE par an dans l'immeuble d'habitation neuf répondant aux standards Minergie-P et Minergie-A.



Planifier et construire avec Minergie

Minergie est un label de qualité pour les nouvelles constructions et les rénovations efficaces et comprend toutes les catégories de bâtiments. L'attention est portée sur une enveloppe de bâtiment de grande valeur, un renouvellement d'air contrôlé et un approvisionnement efficace avec des énergies renouvelables. Le label comprend les trois standards Minergie, Minergie-P et Minergie-A ainsi que le complément ECO. Minergie-P désigne les constructions à très basse consommation d'énergie et Minergie-A les bâtiments à énergie positive. Le complément ECO peut être combiné avec tous les standards et désigne les bâtiments pour lesquels les aspects en lien avec la santé et l'écologie de la construction sont également pris en compte.

Minergie s'adresse tant aux maîtres d'ouvrage qu'aux planificateurs et architectes. Les standards Minergie sont définis de façon précise et documentés en détail par le justificatif requis. En commandant un stan-

dard Minergie – un terme unique dans un contrat d'architecte –, les maîtres d'ouvrage peuvent donc construire un bâtiment conformément aux règles de construction actuellement reconnues dans le monde professionnel, de façon efficace sur le plan de l'énergie, avec un confort thermique élevé. Avec Minergie, les architectes et les planificateurs trouveront une multitude d'aides et d'outils leur permettant de réaliser des bâtiments économes en énergie selon des méthodes éprouvées. En 2017 – juste à temps pour les 20 ans de Minergie – les normes et les outils ont été mis à jour en fonction de l'état actuel des connaissances. Minergie est donc également un référentiel complet de connaissances et d'expériences en matière de construction à faible consommation d'énergie. La suite vise donc à montrer comment Minergie peut être utilisé pour appliquer le savoir-faire compilé dans cette publication et le transformer en bâtiments efficaces sur le plan énergétique.

*Illustration 1.17:
Les principales exigences posées à un bâtiment Minergie.
(Source: Minergie)*

Le standard de construction Minergie pour les nouvelles constructions

Indice Minergie

Besoin total pondéré en énergie pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation, la climatisation, l'éclairage, les appareils et la technique de construction générale moins l'autoproduction d'électricité pouvant être prise en compte

Enveloppe du bâtiment

Besoin en chaleur de chauffage selon MoPEC 2014

Minergie-P: 30 % plus bas

Étanchéité à l'air

L'enveloppe du bâtiment est vérifiée

Minergie: sans mesure

Autoproduction d'électricité

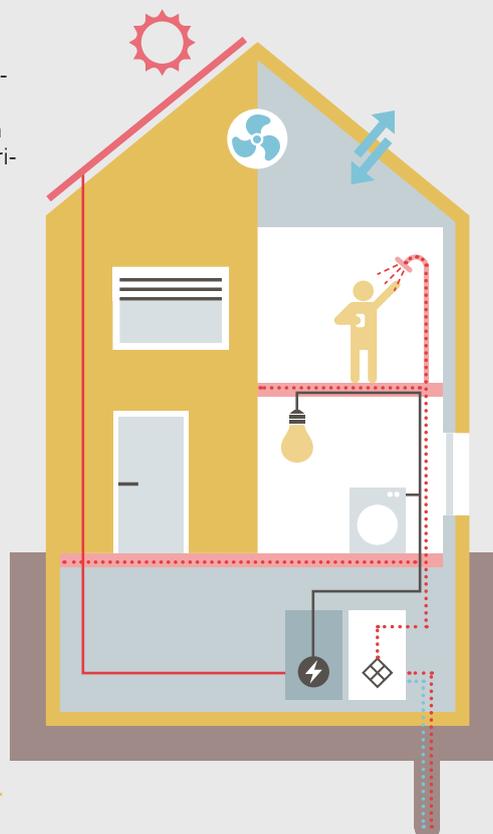
Construction nouvelle: au moins 10 W/m² avec optimisation des besoins propres

Minergie-A: Production annuelle couvrant le besoin

Monitoring de l'énergie

pour les grands bâtiments (SRE > 2000 m²)

Minergie-A: aussi pour les petits bâtiments, sans mesure de la chaleur



Ventilation

Ventilation d'air contrôlée requise

Eau chaude sanitaire

Minimisation du besoin en énergie

Protection solaire en été

Justificatif nécessaire

Éclairage, appareils

Incitations pour une efficacité élevée, justificatif d'éclairage selon la norme SIA 387/4 pour les bâtiments fonctionnels

Besoin en énergie finale pondéré pour la chaleur

selon MoPEC 2014

Énergie renouvelable à 100%

Pour la production de chaleur et de froid (à l'exception de la chaleur à distance et des charges de pointe) dans les nouvelles constructions

Bilan énergétique global

Avec les nouvelles prescriptions (MoPEC 2014), les cantons reprennent en grande partie les exigences de Minergie pour les nouvelles constructions, à savoir les valeurs limites pour le besoin en énergie final pondéré pour le chauffage et l'eau chaude (y c. la ventilation et la climatisation, si existantes). Minergie en conserve des plus strictes (p.ex. le renouvellement automatique de l'air) et va encore plus loin (p.ex. pour Minergie-P, avec l'interdiction des énergies fossiles dans les nouvelles constructions ou l'obligation d'utiliser l'énergie photovoltaïque). Par ailleurs, Minergie étend la limite du système: outre la consommation destinée au chauffage, à l'eau chaude, à la ventilation et à la climatisation, Minergie prend également en compte les besoins pour l'éclairage, les appareils et les installations techniques générales. Ce besoin total pondéré en énergie est calculé grâce à l'indice Minergie.

Minergie dans le contexte

■ **SNBS:** Le Standard de Construction Durable Suisse SNBS permet également d'exploiter des synergies. Une double certi-

fication des bâtiments peut être obtenue de manière simple et est financièrement intéressante pour les requérants. Le justificatif Minergie-Eco possède les mêmes critères que le SNBS en ce qui concerne l'énergie, l'écologie de la construction et la santé, ce qui simplifie également la certification.

■ **Site 2000 watts:** Les bâtiments Minergie et particulièrement Minergie-A et Minergie-P sont parfaits pour servir de base à un site 2000 watts. Ils garantissent le respect des exigences élevées en matière d'efficacité énergétique et simplifient la certification Site 2000 watts.

■ **Cité de l'énergie:** Le standard de construction 2019 du label Cité de l'énergie recommande les standards Minergie-A et Minergie-P pour les rénovations et les standards Minergie pour les constructions nouvelles.

Exigences Minergie

L'indice Minergie est la principale exigence pour l'évaluation de la qualité énergétique d'un bâtiment. Il fixe la limite pour le besoin total pondéré en énergie pour le chauffage, l'eau chaude, la ventilation, la climatisation, l'éclairage, les appareils et les

| Exigences Habitat individuel et collectif | | | |
|--|---|--------------------------------------|-----------------------|
| | Minergie | Minergie-P | Minergie-A |
| Indice Minergie* | | | |
| Construction nouvelle | 55 kWh/m ² | 50 kWh/m ² | 35 kWh/m ² |
| Rénovation | 90 kWh/m ² | 80 kWh/m ² | 35 kWh/m ² |
| Besoin de chaleur pour le chauffage** | | | |
| Construction nouvelle | MoPEC 2014 | 70 % MoPEC 2014 | MoPEC 2014 |
| Rénovation | pas de prescription | 90 % MoPEC 2014 | pas de prescription |
| Besoin en énergie finale Chaleur** | 35 kWh/m ² (MoPEC 2014) 60 kWh/m ² (exigence Minergie) | | |
| Construction nouvelle | 35 kWh/m ² (MoPEC 2014) 60 kWh/m ² (exigence Minergie) | | |
| Rénovation | | | |
| Autoproduction d'électricité | Construction nouvelle: au moins 10 W/m ² (MoPEC 2014) | | couvrant les besoins |
| Renouvellement d'air contrôlé | Oui | | |
| Protection thermique en été | Oui | | |
| Agent énergétique | Construction nouvelle: pas de combustibles fossiles | | |
| Étanchéité à l'air q_{a50} | | | |
| Construction nouvelle | 1,2 m ³ /h m ² | 0,8 m ³ /h m ² | |
| Rénovation | 1,6 m ³ /h m ² | 1,6 m ³ /h m ² | |
| Gestion de l'énergie | Oui, si SRE supérieure à 2000 m ² | | Oui*** |

Tableau 1.1:
Les exigences
Minergie pour les
bâtiments d'habitation (habitat collectif et individuel).

* Exigence principale

** Exigence supplémentaire

*** toutes les tailles de bâtiments, inférieur à 2000 m² sans mesure de la chaleur

installations techniques générales. L'électricité produite par la maison peut être prise en compte. Minergie exige donc une vision globale de toutes les énergies nécessaires à l'exploitation et sensibilise à l'importance des différentes consommations d'énergie. L'indice Minergie dépend de la catégorie du bâtiment. Des exigences supplémentaires relatives aux besoins de chaleur pour le chauffage et aux besoins en énergie finale conformément au MoPEC 2014 garantissent que les exigences ne soient pas satisfaites par une seule mesure, p. ex. une très grande installation PV, mais que tous les composants soient de grande qualité.

Protection thermique estivale – urgence accrue

Avec la progression du changement climatique, le confort thermique pendant les mois d'été devient un problème sérieux, également dans nos contrées. Il s'agit avant tout de mesures structurelles visant à éviter ou à réduire le nombre d'heures de surchauffe dans le bâtiment. Les processus physiques y menant ont lieu au cours de la journée et sont donc très rapides par rapport à la situation de chauffage en hiver. Leur calcul n'est possible qu'avec des simulations fastidieuses. Minergie impose des exigences en matière d'isolation thermique en été. Or, Minergie fournit également aux équipes de planification des outils simples permettant de prévoir et de mettre en œuvre de manière appropriée les éléments les plus importants de l'isolation thermique en été (rayonnement solaire à travers les fenêtres et masse thermique). Une bonne isolation thermique en été devrait permettre aux bâtiments résidentiels de continuer à offrir un bon confort thermique à l'avenir, sans refroidissement actif ou, au mieux, avec freecooling, et en pouvant renoncer au refroidissement mécanique.

Bâtiments du tertiaire

Les règles de la construction efficace se basent sur les bâtiments d'habitation. Les grands bâtiments complexes et les utilisations spéciales telles que les halles de gymnastique, les piscines couvertes ou les bâti-

ments 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 exerce 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 du tertiaire (constructions nouvelles comme les 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 du tertiaire, 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.

1.4 Réduction d'énergie et autoproduction

Ce qui a commencé il y a de nombreuses années comme «bâtiment à économie d'énergie de chauffage» a finalement abouti au terme de bâtiment à énergie nette zéro (NZEB, généralement déclassé en Nearly ZEB). La vision est que le bâtiment doit produire autant d'énergie qu'il en a besoin. En fait, il y a deux directions dans lesquelles l'équipe de planification d'un projet de construction peut tirer profit de l'énorme potentiel d'optimisation. Il s'agit de la combinaison de mesures visant à réduire les besoins énergétiques (mesures d'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment et appareils efficaces) et la production interne d'électricité (rendue possible par le photovoltaïque, devenu moins cher).

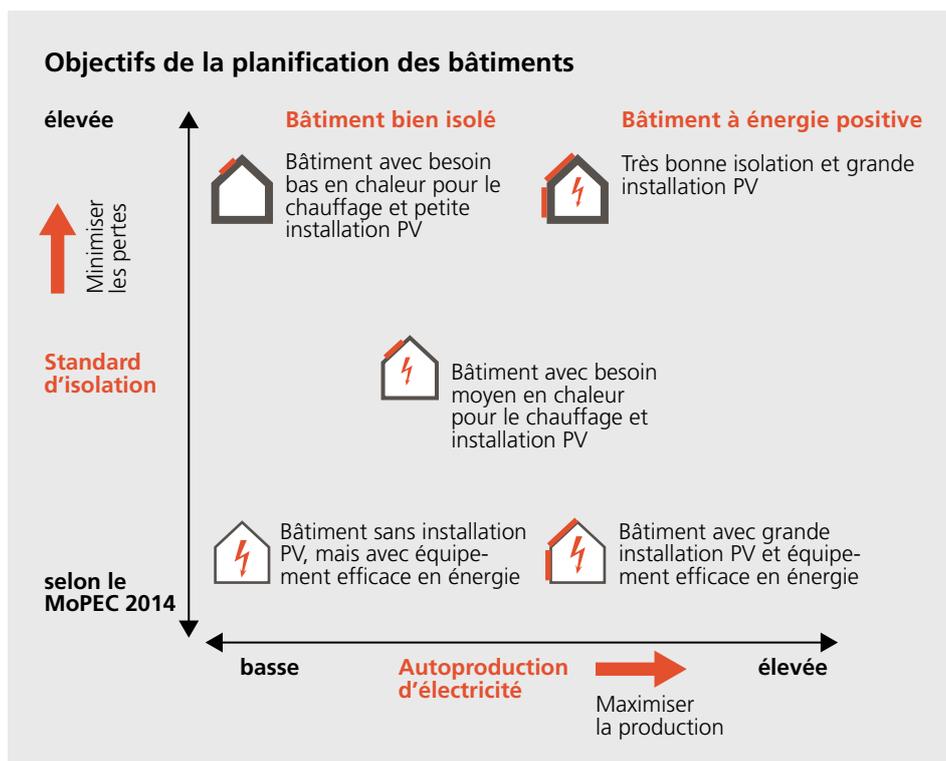
L'illustration 1.18 montre que pour optimiser le processus, l'accent peut être mis sur la réduction de la consommation ou sur la production d'énergie renouvelable. Plus ou moins d'isolation entraîne des valeurs très différentes dans la demande de chauffage d'un bâtiment, qui doit être couverte par plus ou moins de production d'électri-

ci afin d'atteindre une bonne efficacité énergétique. La norme Minergie-P est une caractéristique évidente d'une maison bien isolée. Minergie-A signifie que les besoins annuels sont entièrement couverts. Un grand système photovoltaïque est donc indispensable. Il est évident qu'en utilisant largement les deux stratégies ensemble, des objectifs très ambitieux peuvent être atteints et les bâtiments peuvent même devenir des fournisseurs nets d'énergie. Ce compromis entre la réduction de la consommation d'énergie et la production interne apporte une liberté architecturale et des avantages économiques, car il n'est pas nécessaire d'épuiser l'efficacité énergétique ni le placement des modules solaires dans les moindres détails. Cela signifie également que l'on peut utiliser davantage de produits disponibles dans le commerce.

Trois champs d'optimisation

Les équipes de planificateurs peuvent influencer le bilan énergétique global d'un bâtiment dans trois champs d'optimisation. L'illustration 1.18 présente une sélection des nombreuses mesures possibles. Bien entendu, la voie à suivre pour at-

Illustration 1.18: Un bâtiment peut être positionné dans le graphique, en fonction de son utilisation, de sa géométrie et de son emplacement, mais également selon les préférences individuelles des maîtres d'ouvrage. De nombreux bâtiments se situent au centre de ce carré, comprennent donc un mélange pondéré de bon standard d'isolation et de besoin de couverture par l'autoproduction d'électricité. Un bâtiment bien isolé permet de minimiser surtout les pertes. Un bâtiment à énergie positive permet en outre de maximiser l'autoproduction. (Source: Minergie)



teindre l'objectif dépend de l'objet. L'utilisation d'un bâtiment, sa géométrie, notamment la hauteur, l'emplacement et le fait qu'il s'agisse d'une nouvelle construction, d'une rénovation par étapes ou complète, modifient l'éventail des mesures.

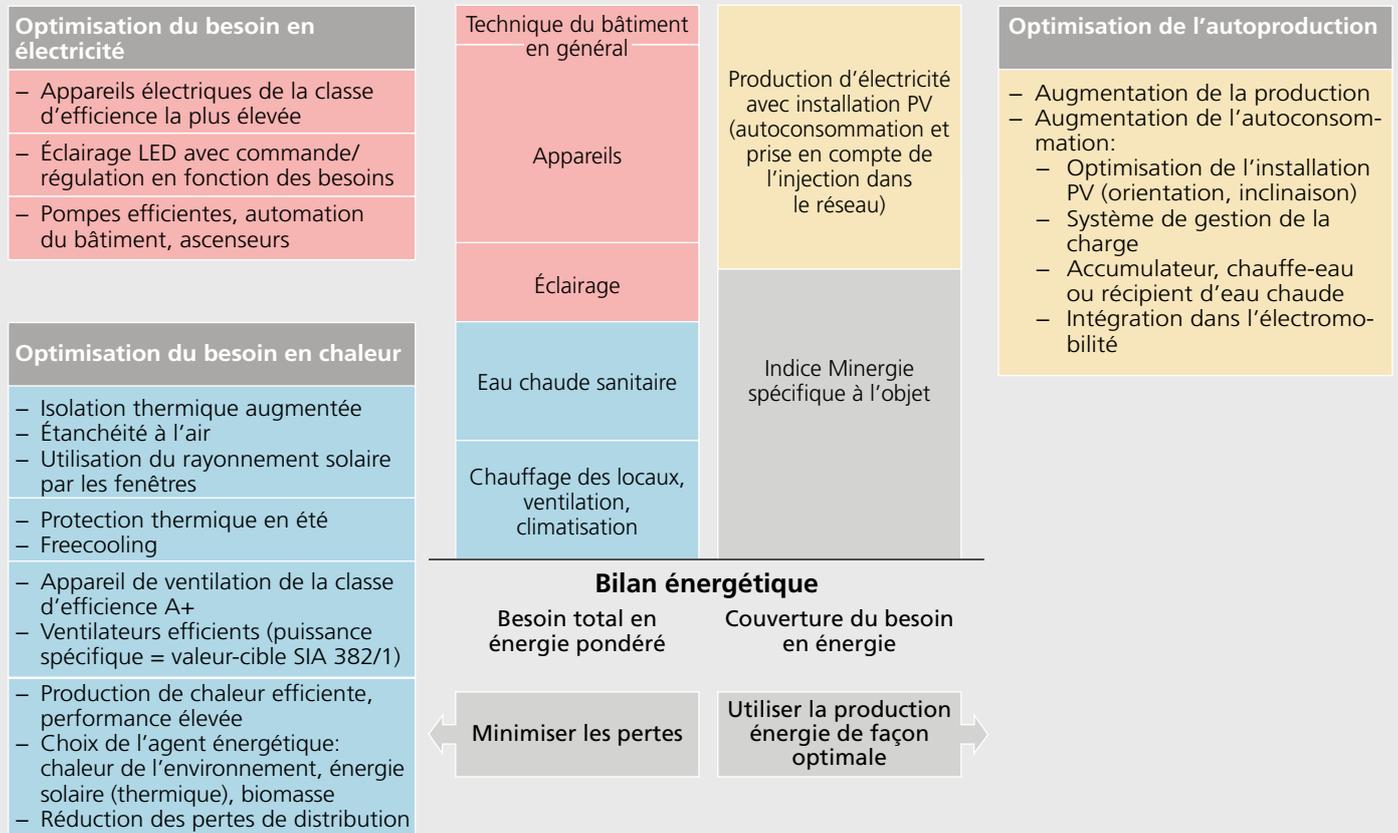
Cela offre aux planificateurs et aux maîtres d'ouvrage une grande liberté dans la coordination des mesures structurelles et techniques ainsi que dans la conception et la matérialisation des bâtiments.

Le marché de la construction offre également une large gamme dans le degré de mécanisation d'un bâtiment. Selon la pondération des domaines d'optimisation, il en résulte des bâtiments peu technologiques («low-tech») ou des objets dotés d'une large gamme d'équipements techniques («high-tech»).

Cependant, les domaines d'optimisation «besoin en chaleur», «besoin en électricité» et «autoproduction d'électricité» sont tous directement liés.

Illustration 1.19: Trois champs d'optimisation: Minimiser les pertes techniques, optimiser le besoin en électricité ou maximiser l'auto-production en énergie? (Source: Minergie)

Trois champs d'optimisation des bâtiments Minergie



Monika Hall 1.5 Bilan énergétique global

Base du bilan énergétique

Outre les besoins en chauffage, il est aujourd'hui utile de connaître les besoins en chaleur (chauffage, eau chaude, ventilation, refroidissement/climatisation [8]) ou même un bilan global du bâtiment [9]. Selon les besoins, le bilan global comprend non seulement l'énergie de fonctionnement, mais aussi l'énergie grise du bâtiment et l'énergie pour la mobilité quotidienne [10]. En raison du débat sur le climat et du passage aux énergies renouvelables y relatif, le nombre de systèmes photovoltaïques sur les bâtiments est en augmentation. La Confédération et les cantons soutiennent ce projet depuis des années par des subventions et, avec le MoPEC 2014, par l'obligation d'installer un système photovoltaïque dans les nouveaux bâtiments. Le rendement de la production locale d'électricité est également inclus dans le bilan énergétique. Dans certains cas, même l'électricité consommée

directement dans le bâtiment, appelée autoconsommation, et l'alimentation du réseau sont prises en compte séparément dans le bilan [9], [11]. Toutefois, le bilan habituel sur les totaux annuels n'est plus praticable à cette fin. Dans les totaux annuels, l'excédent de rendement en été compense le déficit en hiver, ce qui conduit à un taux d'autoconsommation trop élevé. La prise en considération des mois ou des jours élimine la compensation saisonnière, ce qui entraîne une réduction du taux d'autoconsommation. Un bilan sur des tranches horaires ou plus courts prend en compte l'évolution quotidienne du rendement solaire et du profil de la demande et conduit ainsi aux taux d'autoconsommation les plus faibles mais réalistes (Illustr. 1.20).

Les intervalles de temps courants pour les profils et les données climatiques sont des valeurs de 15 et 60 minutes. En principe, des intervalles de temps plus courts seraient souhaitables. La différence de 15 minutes à 1 minute comme intervalle signifie une réduction du taux d'autoconsommation d'environ 5 % [12]. Les données présentant des intervalles inférieurs à 15 minutes sont rarement disponibles et génèrent de grandes quantités de données, ce qui rend également leur traitement difficile. Comme l'erreur n'est pas trop importante, il suffit de baser les calculs sur les données habituellement dis-

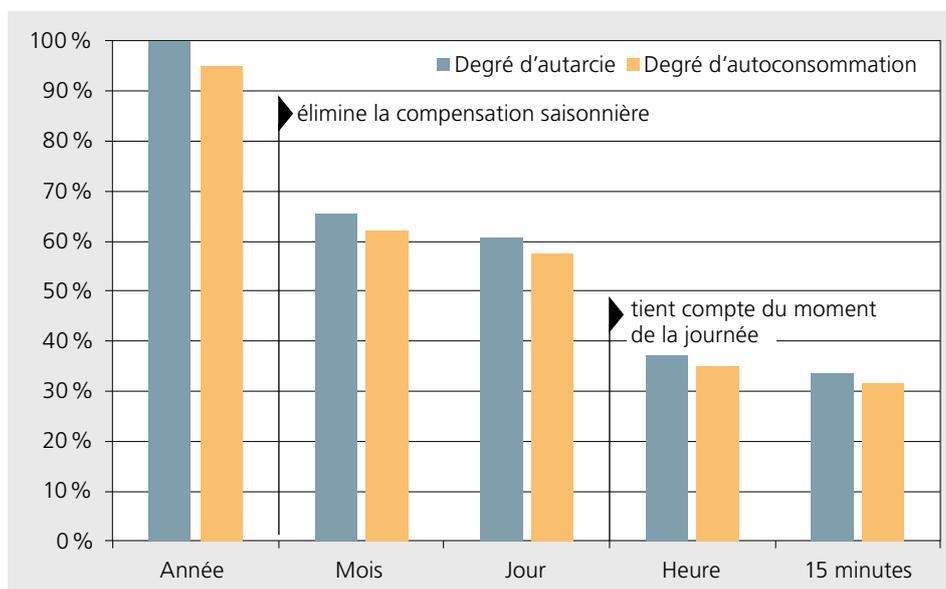
Taux de consommation propre

Consommation propre (= part de l'énergie PV autoconsommée) par rapport à la production PV annuelle

Degré d'autarcie

Consommation propre par rapport aux besoins annuels du bâtiment

Illustration 1.20: Degré d'autarcie et degré d'autoconsommation en fonction de la résolution temporelle, sur la base de valeurs par 15 minutes. Performance: 11 200 kWh/a, consommation 10 600 kWh/a. (Source: [12])



ponibles. Si une batterie est installée, la résolution de 60, 15 ou 1 minute n'est plus importante [12]. En principe, le bilan énergétique global dépend de divers paramètres (Tabl. 1.2).

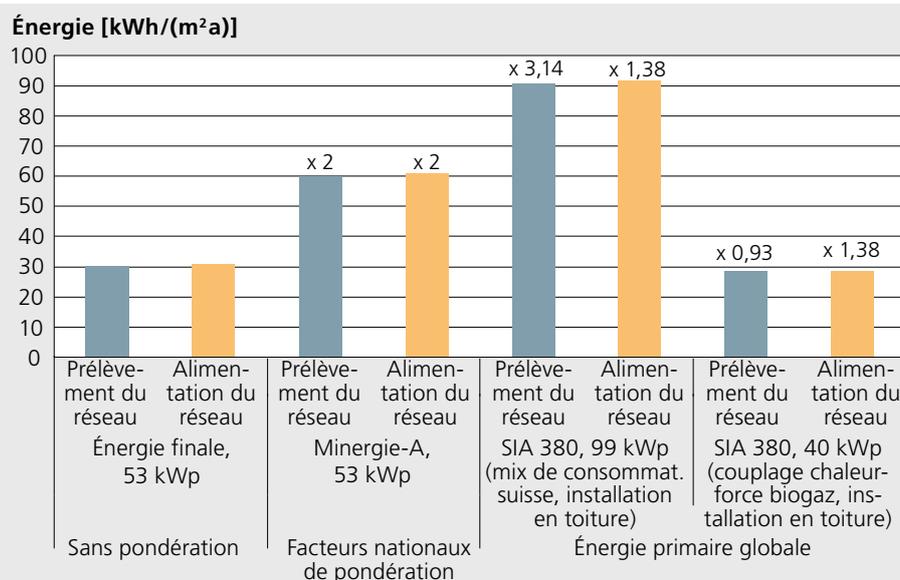
Pondération du bilan énergétique

Les bilans énergétiques sont généralement établis au niveau de l'énergie primaire, de l'énergie finale pondérée ou des émissions de gaz à effet de serre, et les sources

d'énergie utilisées sont donc prises en compte dans le bilan. Selon les facteurs de conversion, le bilan énergétique présente un résultat différent et peut avoir une influence sur la planification (Illustr. 1.21). Alors qu'avec des facteurs de pondération symétriques (mêmes facteurs pour l'approvisionnement et l'alimentation du réseau), la taille du système photovoltaïque nécessaire pour un bilan énergétique nul en énergie finale et pondéré est la même, elle

| Paramètres | Explication |
|--|---|
| Limite du bilan | Technique du bâtiment, énergie d'exploitation, énergie grise, mobilité |
| Base de données | Valeurs de planification (besoin), valeurs mesurées (consommation) |
| Période | Heures, jour, semaine, mois, année, cycle de vie |
| Type de bilan | Besoin, resp. production, exportation resp. importation |
| Offre resp. demande | Simultanéité entre production et besoin propre |
| Possibilité de prise de compte de l'autoproduction | Concept énergétique, plus-value écologique (négoce avec certificats d'origine pour l'énergie renouvelable) |
| Pondération des agents énergétiques | Énergie primaire totale, resp. non renouvelable, facteurs politiques, Minergie, émissions de gaz à effet de serre, unités de charge écologique, coûts |
| Facteurs de pondération des agents énergétiques | Valeurs symétriques ou asymétriques pouvant être saisonnières, mensuelles, horaires ou momentanées. |

Tableau 1.2: En principe, le bilan énergétique global d'un bâtiment dépend de différents paramètres (les paramètres usuels sont en gras).



Définition du bâtiment: Habitat collectif, surface de référence énergétique 1200 m², besoin en chaleur pour le chauffage 25 kWh/(m²a), valeurs standard Minergie pour les appareils, l'éclairage et les installations techniques, pompe à chaleur avec COPA chauffage/eau chaude sanitaire: 3,0/2,7, installation photovoltaïque en toiture: sud-ouest, 30° d'inclinaison, 950 kWh/kWp (calcul avec PVopti V2019.1 [15]). Le facteur d'énergie primaire (PEF) de 1,38 selon SIA 380 vaut pour les installations PV en toiture, jusqu'à la sortie du convertisseur de fréquence. L'injection doit donc être calculée avec un facteur d'énergie primaire de 1,38.

Illustration 1.21: Puissance photovoltaïque nécessaire afin d'atteindre le bilan énergie zéro avec différents facteurs de pondération. Facteurs de conversion pour l'électricité selon les facteurs nationaux de pondération [13] et la norme SIA 380 [14].

s'écarter vers le haut ou vers le bas du bilan en énergie finale dans un bilan avec des facteurs de pondération asymétriques. Par conséquent, une quantité physique supérieure ou inférieure à la demande annuelle requise est injectée dans le réseau.

Regroupement de consommation propre (RCP)

La production locale d'électricité a une influence sur le bilan énergétique d'une part et sur le réseau électrique public d'autre part. Les bâtiments ne se contentent pas de puiser de l'électricité du réseau comme auparavant, mais réinjectent également l'électricité excédentaire. Plus l'électricité produite localement est consommée directement dans le bâtiment, moins elle est réinjectée dans le réseau. Dans le meilleur des cas, les pics d'alimentation et d'approvisionnement peuvent ainsi être réduits et le profil du bâtiment quelque peu lissé, ce qui améliore la stabilité du réseau. Un niveau élevé d'autoconsommation est également intéressant sur le plan financier, car les coûts de revient de l'électricité solaire sont généralement inférieurs aux tarifs d'achat de la compagnie d'électricité.

Depuis le début de 2018, les regroupements de plusieurs consommateurs finaux pour la consommation propre (RCP) sont autorisées [15]. Les communautés d'autoconsommation (CA) d'avant 2018 peuvent être converties en RCP si elles remplissent les conditions requises. Un RCP n'a qu'une seule connexion au réseau du gestionnaire de réseau de distribution. Un RCP neces-

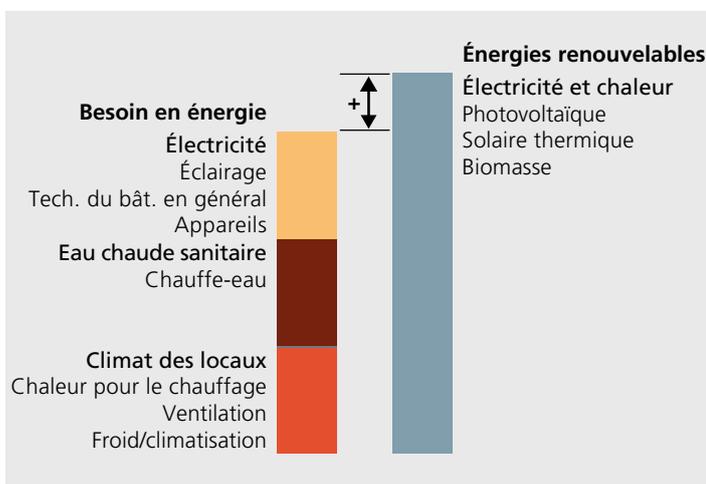
site une capacité de production de l'installation d'au moins 10 % de la capacité de raccordement du regroupement. La vente de l'électricité solaire dans le cadre du RCP à un prix supérieur au coût des produits électriques achetés à l'extérieur n'est pas autorisée. En règle générale, elle est vendue à un prix inférieur et le RCP entraîne une baisse des prix de l'électricité pour tous les consommateurs finaux participants. Les grands RCP dont la consommation totale d'électricité est supérieure à 100 MWh/a ont accès au marché libre de l'électricité, ce qui fait baisser encore plus son prix et rend un RCP encore plus attractif.

Optimisation de l'autoconsommation

Les accumulateurs sur batteries et la gestion de la charge peuvent servir à augmenter la consommation interne. Un accumulateur de jour est généralement suffisant pour permettre à la batterie d'être complètement déchargée pendant la nuit et d'être à nouveau disponible le lendemain matin pour un cycle de charge complet. Une batterie offre la plus grande flexibilité et entraîne généralement les taux de consommation interne les plus élevés. Les gros consommateurs tels que les pompes à chaleur et la mobilité électrique sont particulièrement adaptés à la gestion de la charge. Des régulateurs intelligents permettent d'adapter la puissance de la pompe à chaleur au rendement solaire. Pour interrompre les pics d'alimentation, les réservoirs d'eau chaude peuvent être rechargés aux heures de midi. La combinaison des pompes à chaleur avec un accumulateur technique augmente également l'autoconsommation. Si les pompes à chaleur air-eau fonctionnent principalement pendant la journée, non seulement l'autoconsommation mais aussi leur efficacité augmentent en raison de la température plus élevée de l'air extérieur.

Les véhicules électriques peuvent être rechargés directement pendant la journée. S'ils sont chargés pendant la nuit, il faut en tenir compte lors de la conception de l'unité de stockage des batteries. Il est recommandé de gérer la recharge.

Illustration 1.22: Représentation schématique du bilan à énergie positive.



Les lave-linge et les lave-vaisselle peuvent également fonctionner à l'énergie solaire pendant les heures de travail, mais leur influence sur l'augmentation de l'autoconsommation est plutôt faible [16].

Bâtiments à énergie positive

Si la production photovoltaïque annuelle totale est supérieure à la demande énergétique annuelle totale du bâtiment, on parle de bâtiment à énergie positive (Illustr. 1.22). La hauteur de la différence entre la production et la demande n'est pas importante tant que la différence est positive. Il est recommandé de ne pas concevoir l'installation photovoltaïque d'un bâtiment à énergie positive de manière trop serrée, afin que l'énergie positive soit obtenue même en cas de fluctuations annuelles de l'ensoleillement, de la température extérieure et de la sobriété des utilisateurs.

Il n'est pas précisé si le bilan doit être basé sur l'énergie finale, l'énergie finale pondérée ou l'énergie primaire. Par exemple, Minergie-A exige que le bilan en énergie finale pondérée soit au moins égal à zéro. Les bâtiments Minergie-A qui satisfont à peine à cette exigence sur papier ne la satisfont pas en réalité de manière fiable chaque année en raison des fluctuations mentionnées ci-dessus.

Les quartiers à énergie positive se situent dans la continuation des bâtiments à énergie positive. Ils ont l'avantage que tous les bâtiments ne doivent pas être à énergie positive en raison de la possibilité de compensation entre les bâtiments.

1.6 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 sanitaire 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 1.3. 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.

La structure de tous les standards ou labels est identique: elle comprend les trois do-

maines 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. 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. On donne aussi différents niveaux de certification en fonction du degré de remplissage des exigences selon des différents domaines.

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 do-

*Illustration 1.23:
L'habitat collectif à
énergie positive, ali-
menté uniquement
en photovoltaïque,
à Zurich-Höngg.
(Source: Kämpfen
für Architektur AG)*



maines. 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 les tableaux (Tabl. 1.3 et Tabl. 1.4).

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 international tel que LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) ou DGNB (Deutsches Gütesiegel Nachhaltiges Bauen). À titre d'exemple, la Prime Tower de Zurich dispose de trois labels de qualité (standard Minergie, greenproperty, LEED-

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). En revanche, il n'existe par exemple pour le BREEAM aucune adaptation aux conditions suisses.

À l'échelle nationale, des instruments existants et éprouvés, tels que Minergie, les normes et cahiers techniques SIA, les sites 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

Tableau 1.3: Domaines thématiques des standards énergétiques les plus fréquents et labels de durabilité en Suisse. Foncé: thèmes prioritaires, clair: thèmes partiellement couverts. (Source: Carte nationale et labels, Construction durable Suisse, www.nnbs.ch)

| | Énergie d'exploitation | Confort et atmosphère intérieure | Matérialisation et énergie grise | Coûts et efficacité économique | Société et affaires sociales | Mobilité | Environnement |
|---|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------|---------------|
| CECB/CECB Plus, Cahier technique SIA 2031 [18] | | | | | | | |
| Minergie(-P/-A) | | | | | | | |
| Minergie(-P/-A)-Eco | | | | | | | |
| Voie SIA vers l'efficacité énergétique, Cahier technique SIA 2040 | | | | | | | |
| Cité de l'énergie | | | | | | | |
| Sites 2000 watts | | | | | | | |
| LEED (US) | | | | | | | |
| Standard SNBS 2.0 Bâtiment, DGNB(D)/SGNI pour les bâtiments, greenproperty, BREEAM Construction nouvelle (UK) | | | | | | | |

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.

Perspectives

Les standards énergétiques et labels de durabilité sont utilisés en tant qu'outils de stratégie et de qualité pour les constructions nouvelles et existantes. La norme ou le label approprié peut être déterminé, par exemple, par des conventions d'objectifs conformément à la Recommandation SIA 112/1 «Construction durable – Bâtiment» [17]. Afin d'obtenir le certificat souhaité, il est important de prendre en compte les exigences correspondantes dès le début du processus de planification. À 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 est souhaitable.

*Tableau 1.4:
Avantages et inconvénients des standards énergétiques et des labels de durabilité.*

| Propriétés des bâtiments | Utilisateurs | Maître d'ouvrage, resp. propriétaire |
|---|--|--|
| Avantages | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Efficacité énergétique élevée • Efficacité hydrique élevée • Réduction des déchets • Influences environnementales faibles • Gros œuvre de grande valeur | <ul style="list-style-type: none"> • Frais d'exploitation faibles • Environnement d'habitation et de travail plus sain et plus confortable | <ul style="list-style-type: none"> • Taux de vacance réduit • Rendements plus élevés • Marketing amélioré • Bien immobilier de valeur élevée • Gestion des risques amélioré • Garantie et visualisation d'une qualité élevée du bâtiment |
| Inconvénients | | |
| – | <ul style="list-style-type: none"> • Loyers plus élevés • Prix d'achat plus élevé • Mixité sociale réduite | <ul style="list-style-type: none"> • Coûts de planification et de construction plus élevés • Coûts de la certification |

1.7 Énergie grise

L'énergie intervient non seulement lors de l'exploitation d'un bâtiment, mais également dans les processus de fabrication, de transport, d'élimination et de recyclage 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. 1.5)
- la manière dont les éléments de construction et composants sont pris en compte (Tabl. 1.5)
- la période considérée
- le type de cycle de vie considéré (p. ex. «cradle to grave, cradle to gate», de la source à la tombe, de la source à la sortie de l'usine), 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)

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 tech-

Définition de l'«Énergie grise»

L'énergie grise comprend, selon le cahier technique SIA 2032 «Énergie grise» [19], la dépense énergétique pour

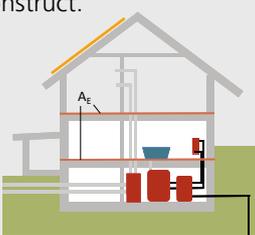
- l'extraction des matières premières et le recyclage,
- la fabrication des différents matériaux, éléments de construction et composants
- le transport et le stockage et
- la déconstruction et l'élimination des matériaux.

L'approche «cradle to grave» (de la source à la tombe) prend en compte le cycle de vie total des différents matériaux de construction. L'énergie grise est exprimée en énergie primaire non renouvelable (E_{Pnren}) et donne ainsi la mesure de la dépense des 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"> • Extraction des matières premières et recyclage • Production et fabrication • Transport et stockage <p style="text-align: right;">«cradle to gate»</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Déconstruction et élimination <p style="text-align: right;">«cradle to grave»</p> |

Tableau 1.5:
Bilan selon Cahier technique SIA 2032 «L'énergie grise des bâtiments».

Remarque: L'enveloppe du bâtiment se compose principalement d'éléments de construction avec une teneur relativement élevée en énergie grise. Ceci s'applique d'autant plus qu'elle comporte de nombreux raccords, angles et coins. Il est donc souhaitable, au niveau de l'énergie grise, de construire des bâtiments simples et compacts. La structure porteuse ainsi que la taille et le type des sous-sols contribuent beaucoup à l'énergie grise.

| Périmètre de bilan | Négligeables | Calcul |
|---|---|--|
| <p>Le périmètre de bilan comprend l'ensemble du bâtiment (zones chauffées et non chauffées) y c. les aménagements extérieurs y relatifs</p> <ul style="list-style-type: none"> • Excavation • Enveloppe du bâtiment • Eléments de construct. intérieurs • Technique du bâtiment + distribution • Balcon, jardin d'hiver • Eléments de construct. extérieurs  | <ul style="list-style-type: none"> • Escaliers, portes, cadres • Petits éléments de construction, p. ex. puits de lumière, protection solaire • Mobilier intégré • Environnement et équipement du bâtiment • Installations de sécurité et de transport • Transports jusqu'au chantier (exception p. ex. transport hélicopté) • Consommation d'énergie sur le chantier • Déchets de chantier, matériaux d'emballage • Éléments linéaires, p. ex. gouttières | <ul style="list-style-type: none"> • Murs extérieurs avec dimensions extérieures • Plafonds sans déductions pour les puits et les escaliers • Murs intérieurs avec dimensions intérieures et sans déductions pour les portes, les passages pour conduites et canaux |

nique du bâtiment, sa part sur le total de l'énergie grise peut s'élever à 17 – 52 % (Illustr. 1.24). Une analyse d'environ 230 bâtiments d'habitation provisoirement et définitivement certifiés Minergie-A en 2012 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. 1.2). 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.

Choix des matériaux

L'énergie grise est indiquée par kg ou par m^2 des différents matériaux ou éléments de construction utilisés, ou par pièce, mètre courant, surface de référence énergétique, puissance ou m^2 pour les composants de la technique du bâtiment. Dans le cas d'un élément de construction constitué de plusieurs matériaux, on calcule une

Illustration 1.24: Énergie grise provenant de différents degrés d'extension des installations techniques en comparaison avec le corps du bâtiment (Base Données des écobilans dans la construction, KBOB 2012).

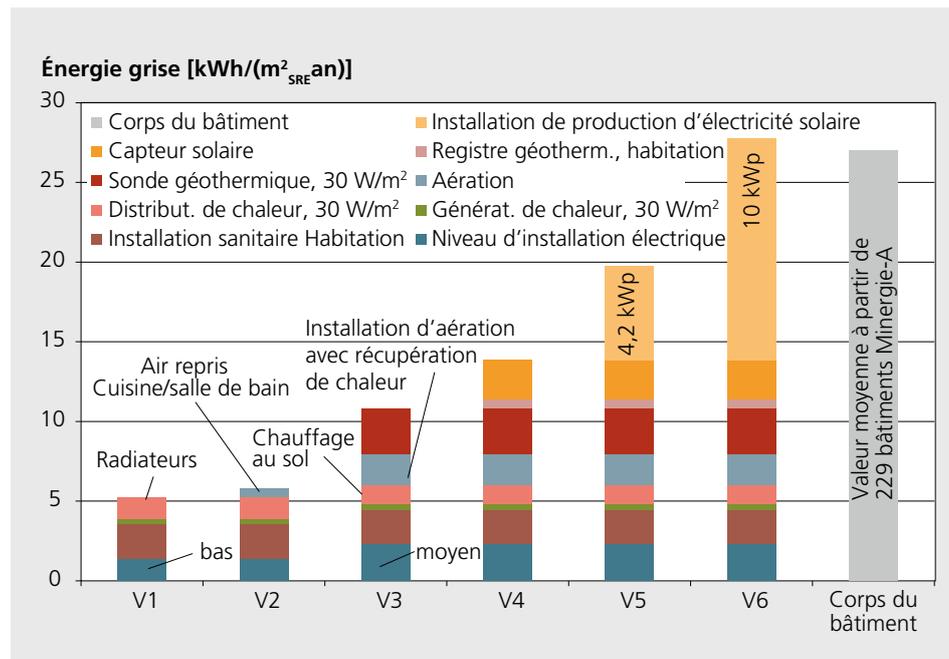
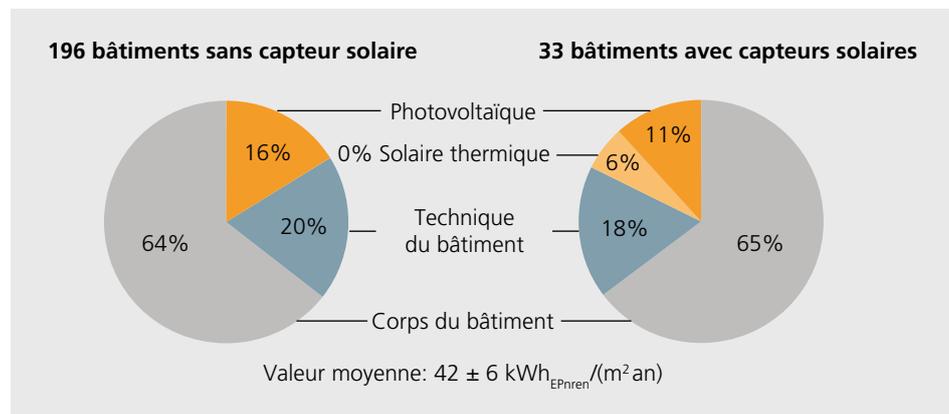


Illustration 1.25: Des différents domaines dans l'énergie grise de 229 bâtiments Minergie-A avec et sans solaire thermique (État 2012).



valeur totale par m² 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 2.6 p. 47. 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 1.26 montre l'influence du matériau du châssis et du vitrage sur l'énergie grise d'une fenêtre. Le choix de ce matériau 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 de chauffage varie. Selon le générateur de chaleur et l'agent énergétique, on obtient différentes valeurs optimales pour l'épaisseur d'isolant. L'illustration 1.27 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.

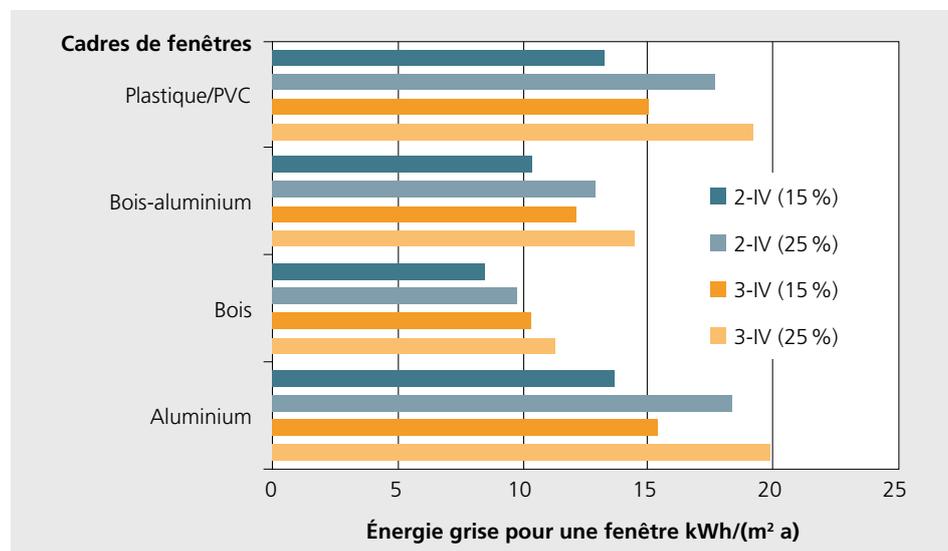


Illustration 1.26: Énergie grise des fenêtres à double et triple vitrage avec différents matériaux et proportions de cadre, période d'amortissement de 30 ans (base de données ACV KBOB 2016, énergie primaire non renouvelable, 2-IV: $U_g = 1,1 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, épaisseur 18 mm, 3-IV: $U_g = 0,6 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, épaisseur 40 mm).

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 du cycle de vie ou Life Cycle Energy, LCE. L'énergie du cycle de vie est représentée dans l'illustration 1.28 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 jusqu'en 2017) et
- dans le standard 3, l'énergie d'exploitation totale est couverte par le PV (bâtiment zéro énergie, p. ex. Minergie-A dès 2017).

Illustration 1.27:
Énergie d'exploitation selon l'énergie grise du bâtiment sans prise en compte d'une installation photovoltaïque et de son rendement pour 229 bâtiments d'habitation Minergie-A (État 2012).

On remarquera que l'énergie grise augmente 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/(m²a). 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.

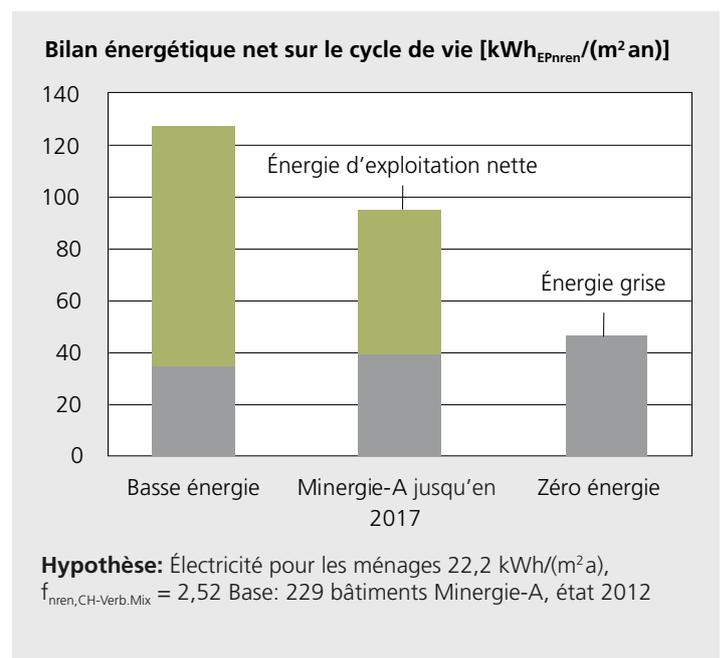
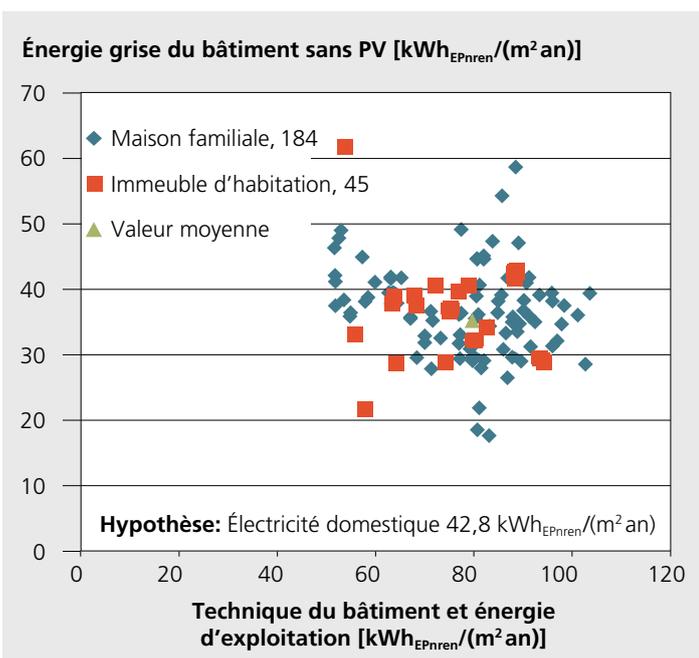
Amortissement énergétique des installations photovoltaïques

L'illustration 1.29 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. Durant sa durée de vie, une installation PV peut donc économiser 5 à 12 fois le montant d'énergie grise qu'a nécessité sa fabrication. Du point de vue de l'énergie primaire, une installation photovoltaïque est donc avantageuse.

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 de 50 kWh_{EPnren}/m² a pour le standard Minergie-A jusqu'en 2017, l'énergie grise devient indépendante de la compacité et du mode de construction (Illustr. 1.30). Les

Illustration 1.28:
Bilan total de l'énergie nette d'exploitation et de l'énergie grise des différentes normes de construction.



facteurs d'influence sur l'énergie grise sont rassemblés dans le Tableau 1.6. Les matériaux et composants ayant une faible valeur d'énergie grise et une longue durée de vie sont à privilégier.

Illustration 1.29:
Durée d'amortissement d'installations photovoltaïques et énergie primaire non renouvelable économisée par le rendement (énergie grise: 7390 kWh/kWp, $f_{nren,CH-Verb.Mix} = 2,52$, $f_{nren,PVApport} = 0,289$, basé sur Données des écobilans dans la construction, KBOB 2016, dégradation 0,5% par an).

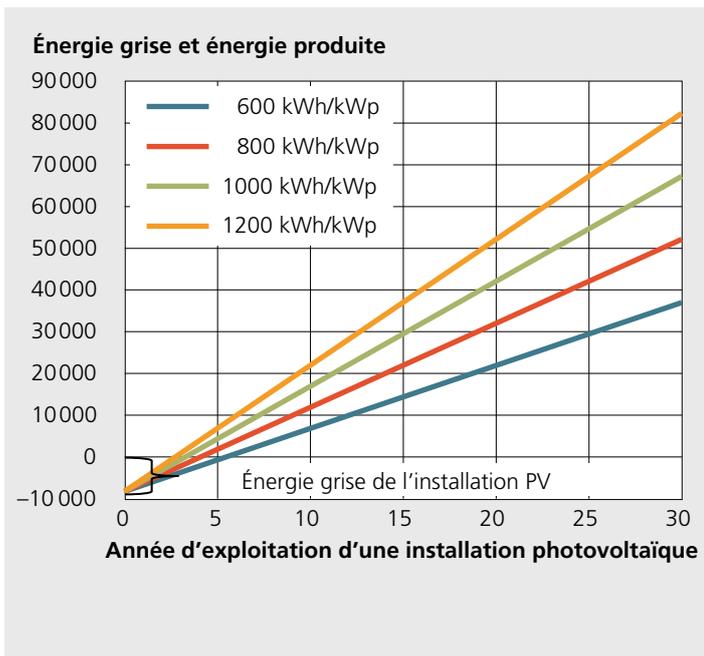
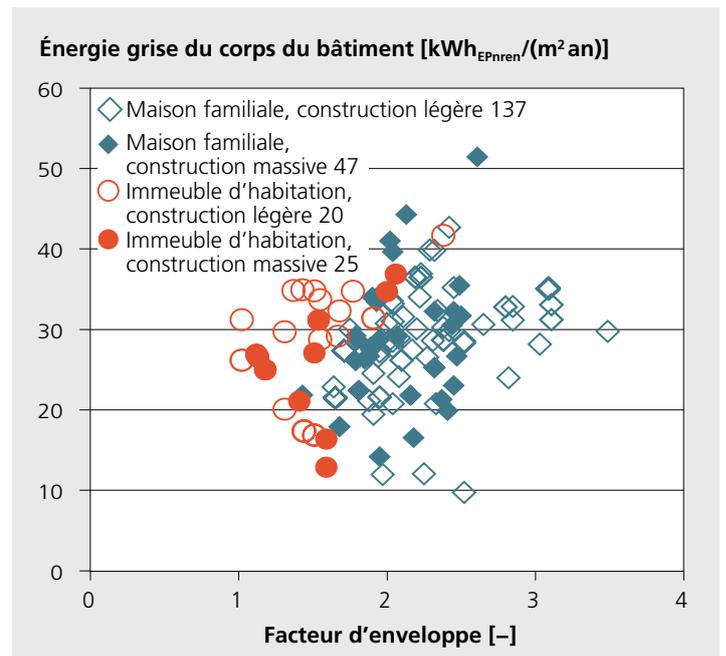


Tableau 1.6
(en haute): Facteur d'influence sur l'énergie grise.

| Facteur d'influence | Effets |
|--|--|
| Matérialisation | Différents matériaux ayant la même fonctionnalité présentent des valeurs d'énergie grise différentes. Les matériaux ayant une faible teneur en énergie grise sont à privilégier. |
| Durée de vie | Utiliser des éléments de construction et des composants présentant une longue durée de vie. Pour les composants techniques, il convient en outre de veiller à l'efficacité énergétique. |
| Séparabilité des matériaux et des éléments de construction | La séparabilité des matériaux et des éléments de construction garantit qu'en cas de remplacement, il ne faut pas remplacer l'ensemble de l'élément. |
| Construction | Des bâtiments compacts, des structures porteuses simples et une utilisation économique des structures souterraines réduit la quantité de matériaux nécessaires. |
| Bilan global | La prise en compte du bilan total de l'énergie d'exploitation et de l'énergie grise entraîne des épaisseurs d'isolation optimales en fonction du matériau d'isolation et de la production de chaleur. L'évaluation est faite en énergie primaire non renouvelable. |

Illustration 1.30
(en bas): 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. (État 2012).



Achim Geissler 1.8 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 1.7 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

Illustration 1.31: 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)

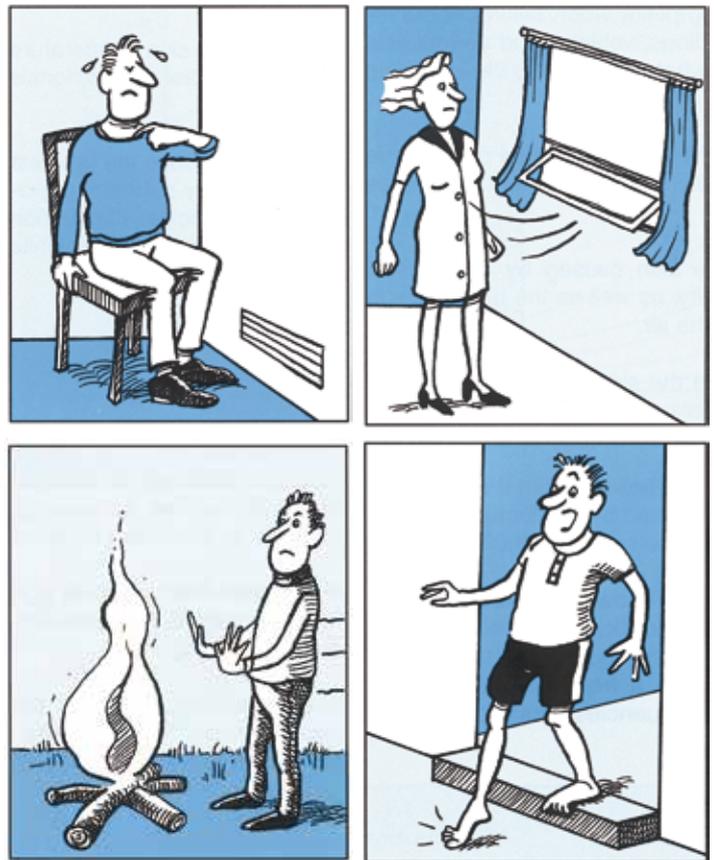


Tableau 1.7: Exemple de classification de la pertinence énergétique (voir texte).

| | En hiver | En été |
|--------------------------------------|--|--|
| Confort thermique | Chaleur pour le chauffage, important sur le plan de l'énergie. | Pas important sur le plan de l'énergie. |
| Confort visuel | Important sur le plan de l'énergie, apports solaires pouvant être fortement réduits par la protection contre l'éblouissement. | Important sur le plan de l'énergie, besoin en électricité augmenté par la protection solaire resp. contre l'éblouissement. |
| Confort acoustique | Quasi pas important sur le plan de l'énergie. | Pas important sur le plan de l'énergie, mais fortement limité p. ex. lors de l'évacuation de la chaleur par l'aération pendant les heures matinales. |
| Confort olfactif ou qualité de l'air | Important sur le plan de l'énergie, en absence d'installation de ventilation, il faut aérer par les fenêtres, aucune récupération de chaleur possible. | Pas important sur le plan de l'énergie, aération l'après-midi, mais charge thermique supplémentaire en cas de températures extérieures élevées. |

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. 1.31). 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. De plus, l'individu s'adapte dans beaucoup de domaines – en été on supporte mieux la chaleur –, en hiver au froid et on adapte son habillement. La norme SIA 180:2014 [21]

en tient compte, p. ex. en prescrivant une exigence de glissement de la température ambiante maximale admissible en fonction de la valeur de la température extérieure, dont la moyenne est calculée sur 48 h, en supposant des vêtements adaptés (Illustr. 1.32). 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. 1.8), permettent de classifier ou de vérifier le niveau de confort (à l'échelle de la planification).

| Classe | Description |
|--------|--|
| A | Niveau d'exigences élevé en matière de climat intérieur; recommandé pour les pièces où se trouvent des personnes très sensibles et vulnérables ayant des besoins particuliers. |
| B | Niveau d'exigences normal |
| C | Niveau d'exigences acceptable et modéré |

Tableau 1.8:
Classes de confort
avec leurs exi-
gences.

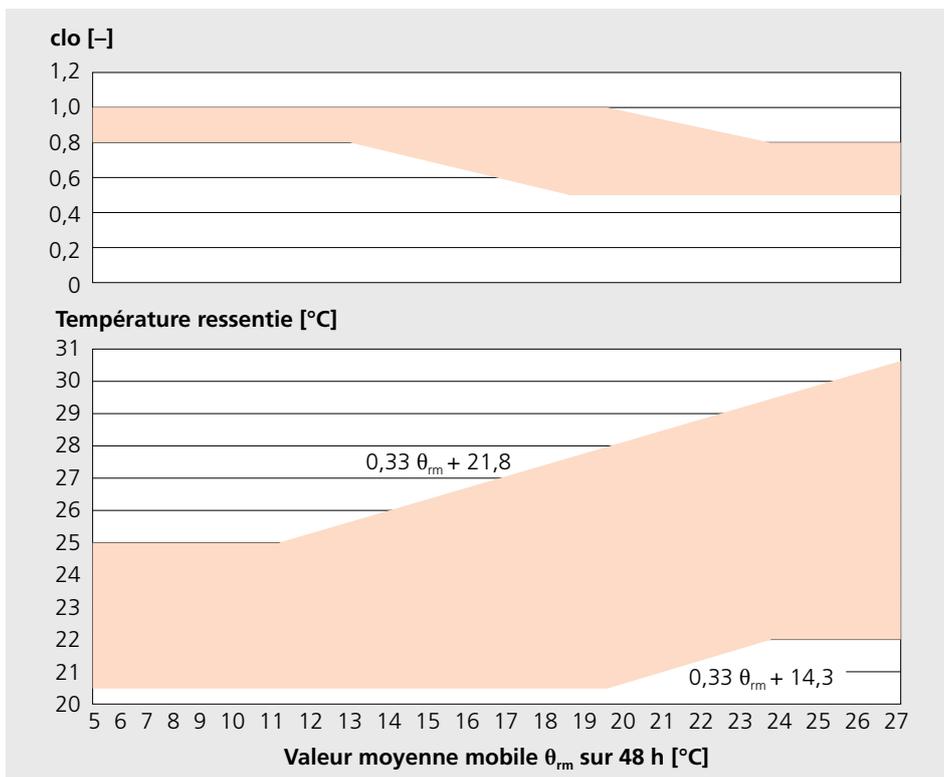


Illustration 1.32:
Adaptation des vêtements (en haut) et de la température ressentie admissible pour les locaux à ventilation naturelle qui ne sont ni chauffés ni refroidis. La température ressentie est déterminée approximativement comme la moyenne arithmétique de la température de l'air intérieur et de la température de rayonnement moyenne. La valeur «clo» décrit l'effet d'isolation thermique du revêtement. (Source: selon SIA 180:2014)

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, par exemple les valeurs UGR (voir p. 73).

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.

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_2 . 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 chauffage et éventuellement refroidi en été.

1.9 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] Stolz, Ph., Frischknecht, R.: *Données des écobilans dans la construction*, KBOB v.2.2:2016
- [5] *Analyse de la consommation énergétique suisse 2000 – 2009 en fonction de l'application*, Prognos, Office fédéral de l'énergie, Berne, décembre 2010
- [6] *Effizienz und Elektrifizierung Haushalte*, Ernst Basler + Partner, VSE, Zollikon 2012
- [7] *Perspectives énergétiques 2050+*, Prognos et al., sur mandat de l'OFEN, Bâle 2012
- [8] MoPEC 2014 www.endk.ch
- [9] www.minergie.ch (état 2019)
- [10] *Cahier technique SIA 2040: La voie SIA vers l'efficacité énergétique*, 2017
- [11] *Certificat énergétique cantonal des bâtiments CECB*, www.geak.ch (état 2019)
- [12] Hall, M., Bittel, R.: *30 % oder 80 % Eigenverbrauch? HK-Gebäudetechnik 6–7*, 2019, p. 48–50
- [13] *Facteurs de pondération nationaux*, 2017, www.endk.ch
- [14] *Norme SIA 380: Bases pour les calculs énergétiques des bâtiments*, 2015
- [15] *Guide pratique de la consommation propre*, version 2.0; sur mandat de SuisseEnergie, 2019
- [16] *Manuel Comment optimiser la consommation propre de courant solaire*, VESE, 2017, www.vese.ch
- [17] *Norme SIA 112/1 Construction durable – Bâtiment*, 2017
- [18] *Cahier technique SIA 2031, Certificat énergétique des bâtiments*, 2016
- [19] *Cahier technique SIA 2032: L'énergie grise des bâtiments*, 2010
- [20] *Ragonesi, M.: Effizienzstrategie*. Faktor Verlag, Heft 36 Wärmeschutz, 2012, pages 26 à 35.
- [21] *Norme SIA 180, Protection thermique, protection contre l'humidité et climat intérieur dans les bâtiments*, 2014

Bâtiment – Forme et enveloppe

Gregor Steinke 2.1 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. 2.1). 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. 2.2). 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 chauffage, 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. 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 réduits, construction plus simple, quantité d'énergie grise moins im-

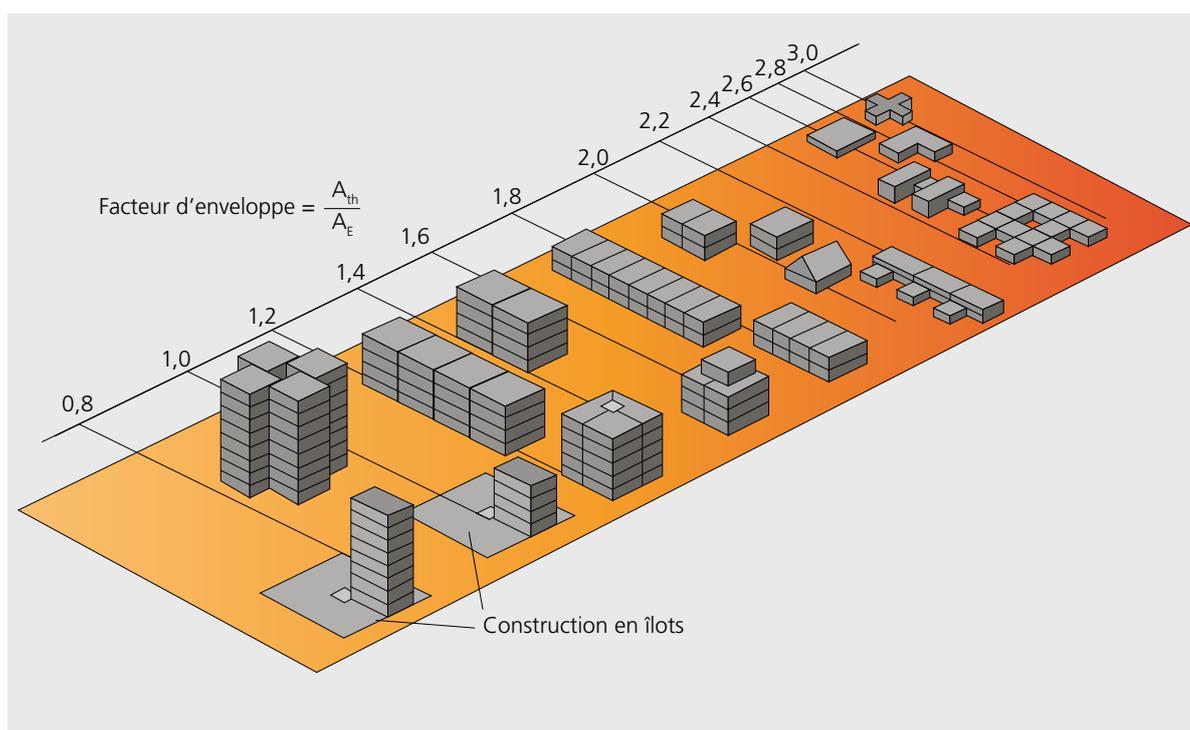


Illustration 2.1: Compacité et facteur d'enveloppe. (Source: Solarfibel, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg)

portante, 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

optimisées 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 efficace.

2.2 Enveloppe du bâtiment

L'enveloppe thermique du bâtiment doit englober les zones chauffées du bâtiment, sans interruption. 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. 2.3).

Le fractionnement de la protection thermique, par exemple dans le cas des espaces tampons non chauffés et des loggias vi-

Illustration 2.2:
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.

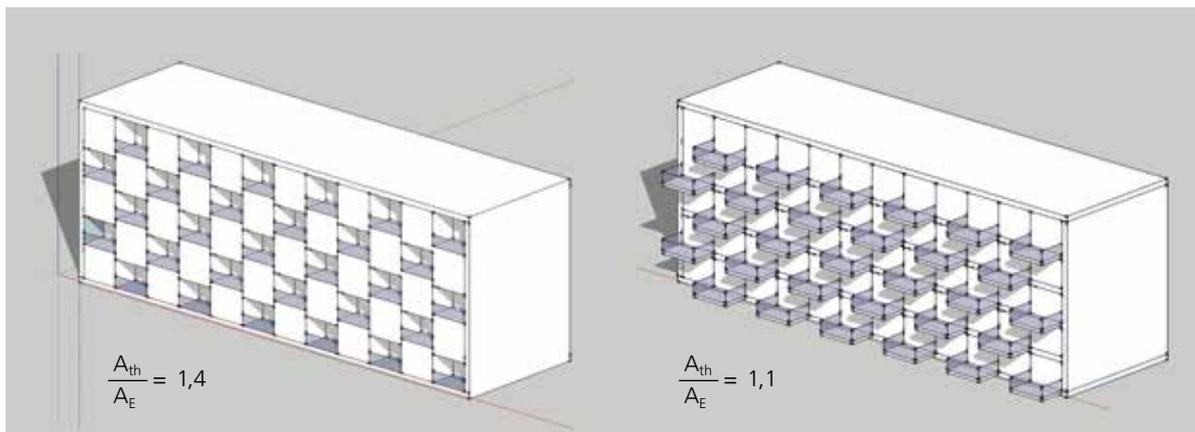


Illustration 2.3:
Tracé de l'enveloppe thermique du bâtiment, à gauche la cave et le toit se trouvent en dehors de l'enveloppe thermique, à droite ils sont à l'intérieur.



trées, 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. En 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 chauf-

fage au sol ou avec la protection contre les bruits de choc 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.

2.3 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 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.

| Valeurs U des constructions nouvelles en $W/(m^2 K)$ | Valeur limite SIA 180 | SIA 380/1 Justificatif par performances ponctuelles | |
|--|-----------------------|--|--------------|
| | | Valeur limite | Valeur cible |
| Éléments de construction opaques contre l'extérieur ou enterrés à moins de 2 m • Toit, plafond, mur extérieur, sol (contre terrain) | 0,40 | 0,17 | 0,10 |
| Fenêtres, portes-fenêtres | 2,4 | 1,0 | 0,80 |
| Éléments de construction opaques contre locaux non chauffés ou enterrés à de plus de 2 m • Toit, sol, mur extérieur • Plafond supérieur contre locaux non chauffés | 0,60 0,50 | 0,25 | 0,10 |

Tableau 2.1: Exigences de valeurs U pour une construction nouvelle selon SIA 380/1:2016, justificatif par performances ponctuelles et protection thermique minimale selon SIA 180:2014.

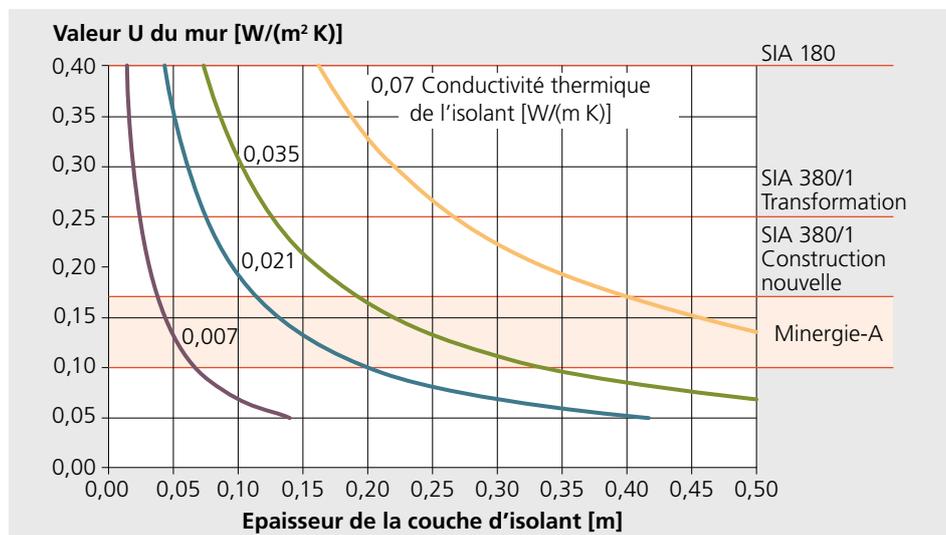


Illustration 2.4: Épaisseurs d'isolant requises en fonction de la conductivité thermique de l'isolant.

■ 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 intérieurs, 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 2.1. Les épaisseurs d'isolation thermique nécessaires pour les différents niveaux d'exigence sont représentées dans l'illustration 2.4. Si on utilise des solutions combinées (comme documenté dans le MoPEC 2014), les exigences de $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$ s'appliquent au cas par cas.

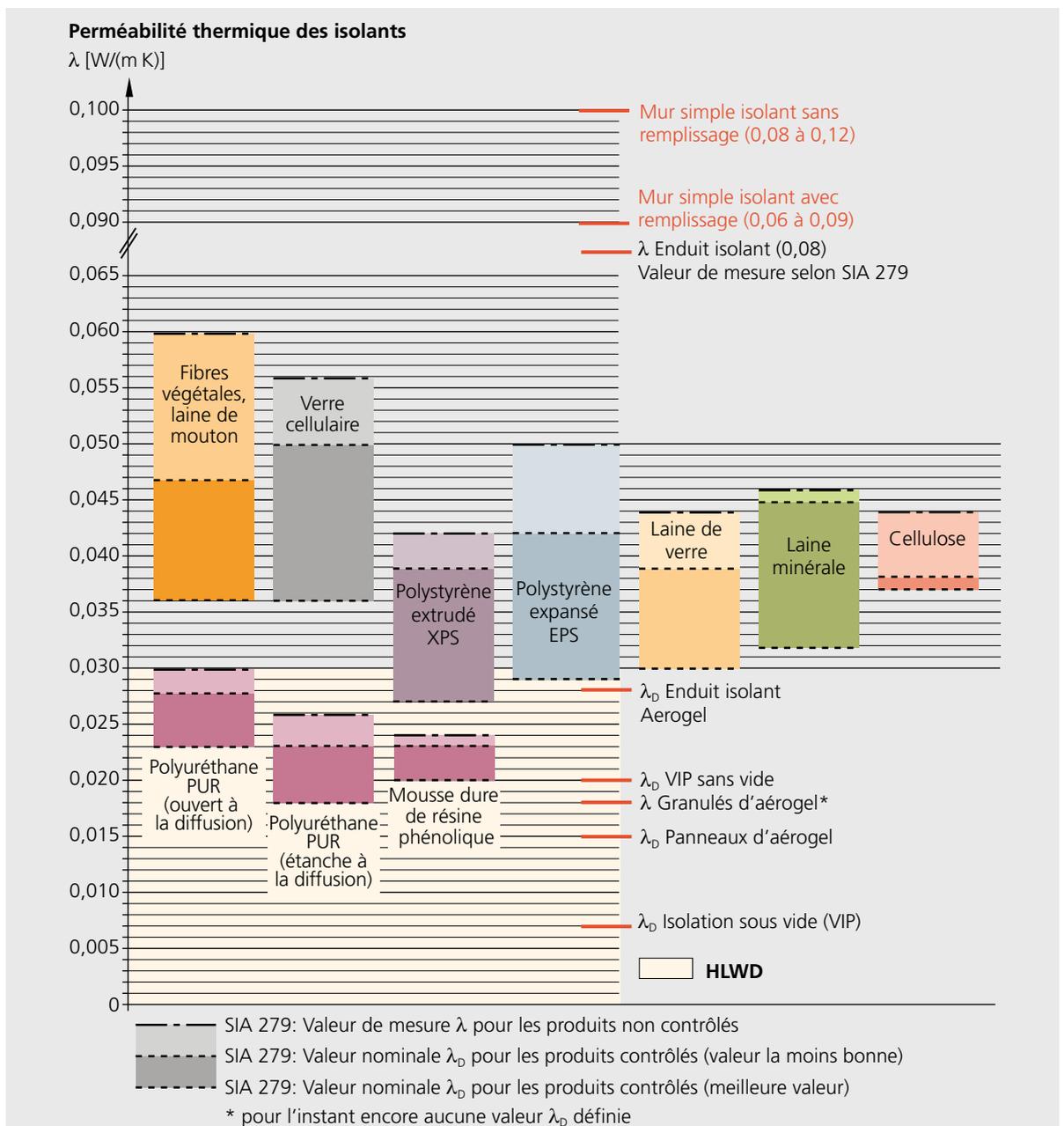


Illustration 2.5:
 Perméabilité thermique des isolants,
 version 10/2019.
 (Source: Marco Ragonesi, Gregor Steinke, Faktor Verlag)

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 constitue 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 λ s'élève à 0,1 W/(mK) 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

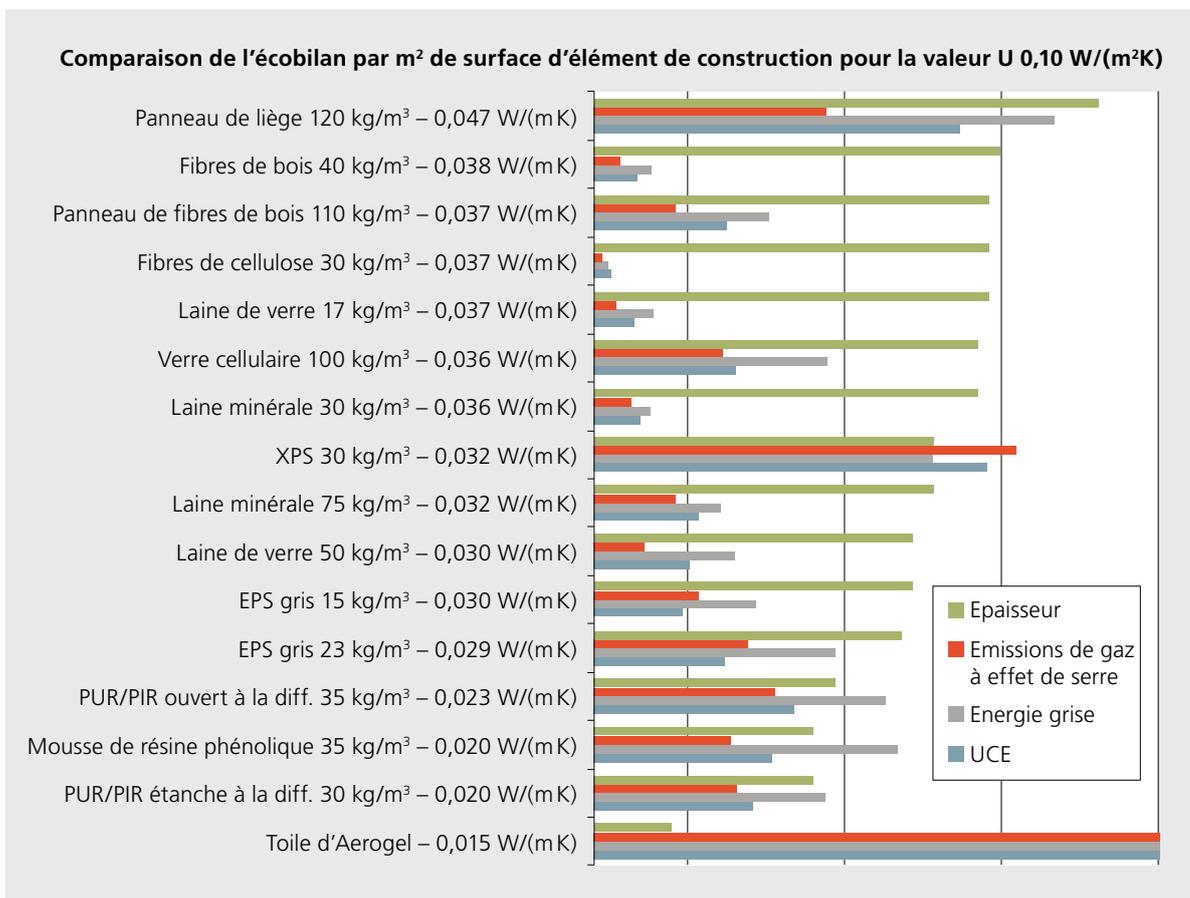


Illustration 2.6: Charge environnementale de différents isolants référencés sur une valeur U de 0,10 W/(m²K). État 10/2019. (Sources: KBOB – Données des écobilans dans la construction et valeurs des matériaux de construction SIA)

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 satisfaire 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 fabriqués à partir de matériaux naturels ou artificiels, organiques ou anorganiques. La conductivité thermique de différents isolants thermiques est représentée dans l'illustration 2.5.

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. 2.6).

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 ma-

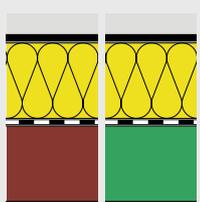
tériaux, ces isolants thermiques haute performance sont généralement utilisés pour résoudre des problèmes ponctuels sur l'enveloppe du bâtiment, lorsqu'on dispose de peu de place pour l'isolation thermique, que l'encombrement de l'isolation thermique ferait perdre une surface utile précieuse ou que des 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

Illustration 2.7:
Toiture plate massive, toiture chaude.

Toiture plate massive, toiture chaude

| | | | |
|---|---|----------------------------------|--------------------|
| 6 |  | 6 Couches de protection et utile | λ [W/(mK)] |
| 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.

Epaisseur 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 ² K)] | | | | | | | | | | | | |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,041$ W/(mK) | 0,09 | 0,13 | 0,17 | 0,20 | 0,34 | 0,15 | 0,19 | 0,23 | 0,26 | 0,40 | Panneau de verre cellulaire | |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,035$ W/(mK) | 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 | |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,030$ W/(mK) | 0,07 | 0,10 | 0,12 | 0,15 | 0,25 | 0,11 | 0,14 | 0,17 | 0,19 | 0,29 | Panneau d'EPS | |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,027$ W/(mK) | 0,06 | 0,09 | 0,11 | 0,13 | 0,22 | 0,10 | 0,13 | 0,15 | 0,17 | 0,26 | Panneau de PUR | |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,022$ W/(mK) | 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 | |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(mK) | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,15 | 0,07 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,18 | Panneaux d'aérogel | |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,008$ W/(mK) | 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 | |

2.4 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'épaisseurs 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 constructions massives, les toitures plates sont généralement conçues sous forme de toitures chaudes non venti-

lées (Illustr. 2.7). 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.

Sur les toits en pente, les chevrons sont généralement isolés sur toute la hauteur (Illustr. 2.8). Une combinaison d'isolation entre chevrons et d'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 no-

Illustration 2.8:
Toiture inclinée.

| Toiture inclinée | | | λ [$W/(m K)$] | | λ [$W/(m K)$] | |
|------------------|-------------------|--|-------------------------|-------------------|--|----------|
| | Variante 1 | | | Variante 2 | | |
| | 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 | Couche d'isolant | variable | 2 | Chevrons hauteur 18 cm (par de bois 8% / 16%) | 0,13 |
| | 1 | Panneau 3 couches ou OSB en variante Placoplâtre | 0,13 | | Couche d'isolant 18 cm | 0,036 |
| | | Cavité d'installation | 0,24 | 1 | Panneau 3 couches ou OSB en variante Placoplâtre | 0,13 |
| | | Pare-vapeur | – | | Cavité d'installation | – |
| | | | – | | 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 | |
| Valeur U [$W/(m^2 K)$] | | | | | | | | | | | |
| 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 | |
| Valeur U [$W/(m^2 K)$] | | | | | | | | | | | |
| 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 |

tamment 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. 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, il y a lieu de réaliser une couche continue étanche à l'air. Dans le cas contraire, le passage incontrôlé d'air ambiant chaud et humide à travers l'isolation thermique peut engendrer des dommages considérables

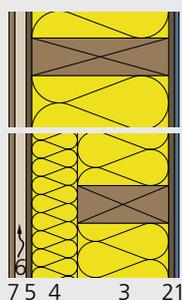
à l'humidité. L'isolation thermique après-coup de la dalle de plafond de l'étage supérieur est une mesure très efficace et bon marché pour améliorer la protection thermique dans les bâtiments existants, lorsque les combles ne sont ni aménagés ni chauffés.

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

Illustration 2.9:
Structure ossature bois du mur extérieur.

Structure ossature bois du mur extérieur



Variante 1 (simple paroi)

| | λ [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)

| | λ [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 ² | |
| - 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 ² 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 ² 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 |

(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 2.9 montre différentes variantes. L'extérieur est constitué d'un habillage ventilé 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.

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. 2.10). 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 céramiques ou des briques recuites à la place de l'enduit extérieur.

- Pour des raisons de protection contre l'incendie, en présence d'isolants ther-

miques inflammables, des pare-feu 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-tour).

- 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, les différentes couches d'éléments de construction séparées les unes des autres assument différentes fonctions du mur extérieur, 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. 2.11).

- 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.

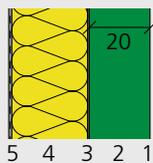
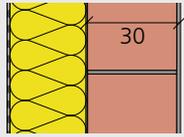
- Dans le cas de sous-structures dotées d'entretoises, monter tout d'abord l'isolation thermique sur toute la surface, puis ancrer la sous-structure sur le support porteur.

Illustration 2.10
(en haut): Façade
compacte.

Illustration 2.11
(en bas): Façade
avec ventilation ar-
rière sur un mur ex-

terieur massif avec
console d'isolation
thermique.

Mur extérieur avec façade compacte



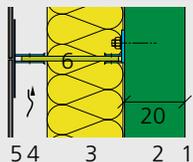
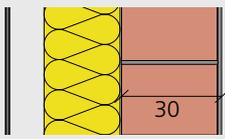
Structure

| | |
|---|---------------------|
| 1 Enduit intérieur | λ [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 |

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 ² 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 |

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



| | |
|--|---------------------|
| 1 Enduit intérieur | λ [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 ² de mur extérieur | |
| – Déperditions par ponts thermiques χ par console env. 0,0005 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 | | | | | |
|---|--------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|-------------------------|
| | 0,25 | 0,20 | 0,17 | 0,15 | 0,10 | 0,25 | 0,20 | 0,17 | 0,15 | 0,10 | |
| Valeur U [W/(m ² 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 |

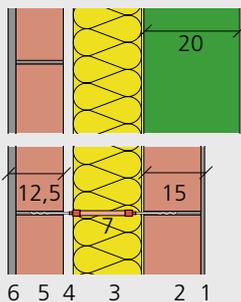
Les maçonneries isolantes (Illustr. 2.13) permettent de réaliser des constructions de mur extérieur monolithiques enduites sans couches d'isolation thermique supplémentaires et, dans une épaisseur adéquate, peuvent également répondre à des exigences élevées en termes de protection thermique. On trouve sur le marché des éléments en béton cellulaire et des briques dotées de géométries perforées. Les cavi-

tés des briques sont parfois remplis 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 spéciale. Pour les raccords entre les éléments (p. ex. appui de fenêtre), des éléments spéciaux sont proposés.

Illustration 2.12 (en haut): Maçonnerie à double paroi.

Illustration 2.13 (en bas): Maçonnerie isolante simple paroi.

Maçonnerie à double paroi

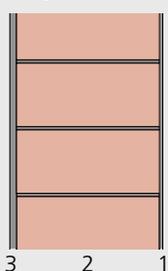


| | λ [W/(m K)] |
|-----------------------------|---|
| 1 Enduit intérieur | 0,70 |
| 2 Brique ou béton apparent | 0,35 / 2,30 |
| 3 Couche d'isolant | variable |
| 4 Couche d'air | – |
| 5 Brique | 0,35 |
| 6 Enduit extérieur | 0,87 |
| 7 Ancrage pour double paroi | – env. 0,7 pièce par m ² de mur extérieur – Déperditions thermiques χ 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 ² 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 | λ [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/(m² 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 ² K)] pour $\lambda = 0,090$ W/(m K) | 0,28 | 0,23 | | 0,20 | | | | Brique légère |
| Valeur U [W/(m ² K)] pour $\lambda = 0,085$ W/(m K) | 0,27 | 0,22 | | 0,19 | | | | Brique légère |
| Valeur U [W/(m ² K)] pour $\lambda = 0,080$ W/(m K) | 0,25 | 0,21 | | 0,18 | | 0,16 | | Brique légère |
| Valeur U [W/(m ² K)] pour $\lambda = 0,075$ W/(m K) | 0,24 | 0,20 | | 0,17 | | 0,15 | | Brique légère |
| Valeur U [W/(m ² K)] pour $\lambda = 0,070$ W/(m K) | | 0,18 | | 0,16 | | 0,14 | | Brique légère |
| Valeur U [W/(m ² K)] pour $\lambda = 0,065$ W/(m K) | | | | | | 0,13 | | Brique légère |
| Valeur U [W/(m ² K)] pour $\lambda = 0,081$ W/(m K) | 0,26 | 0,21 | 0,19 | | 0,16 | | 0,16 | Béton cellulaire |
| Valeur U [W/(m ² K)] pour $\lambda = 0,073$ W/(m K) | 0,23 | 0,19 | 0,18 | | 0,15 | | 0,14 | Béton cellulaire |

Dans les maçonneries enduites à double paroi, une couche d'isolation thermique est disposée dans l'espace intermédiaire (Illustr. 2.12). La distance entre les parois du mur est en général limitée à 30 cm pour des raisons constructives.

Sol

Dans le cas d'un sol en contact avec une zone non chauffée, en tant qu'élément de construction de l'enveloppe thermique du bâtiment, on dispose généralement, dans la construction massive, en plus de l'isolation contre les bruits de choc, la couche d'isolation thermique en dessous ou, de façon combinée, au-dessus et en dessous du plafond de l'étage (Illustr. 2.15). 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. 2.16). 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 rapport 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 2.14:
Sol en contact avec
une zone non
chauffée, massif.

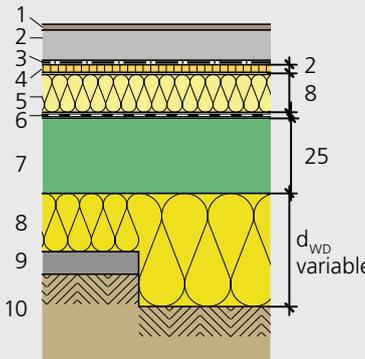
Sol en contact avec une zone non chauffée, massif

| | λ [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 |

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 plafond brut Valeur U [W/(m² K)] | 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 | |
| Épaisseur 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 |
| Épaisseur 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 |
| Épaisseur 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 |
| Épaisseur 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 |
| Épaisseur 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 |
| Épaisseur 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 |
| Épaisseur 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 |
| Épaisseur 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 |

Sol en contact avec la terre, isolation thermique sous la plaque de sol λ [W/(m K)]

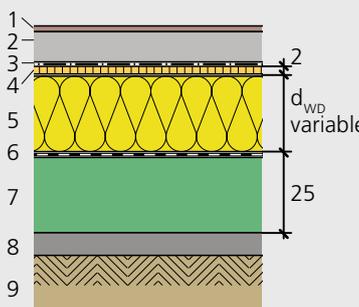


| | λ [W/(m K)] |
|---|---------------------|
| 1 Revêtement de sol | – |
| 2 Chape | – |
| 3 Couche de séparation | – |
| 4 Isolation contre les bruits d'impact 2 cm | 0,035 |
| 5 Couche d'isolant | 0,035 |
| 6 Système d'étanchéité | – |
| 7 Béton armé 25 cm | 2,3 |
| 8 Couche d'isolant | variable |
| 9 Eventuellement béton maigre | 1,5 |
| 10 Terre | 2,0 |

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

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

Illustration 2.15: Sol en contact avec la terre, isolation thermique sous la plaque de sol.

Sol en contact avec la terre, isolation thermique au-dessus de la plaque de sol


| | λ [W/(m K)] |
|--|---------------------|
| 1 Revêtement de sol | – |
| 2 Chape | – |
| 3 Couche de séparation | – |
| 4 Isolation contre les bruits d'impact | 0,035 |
| 5 Couche d'isolant | variable |
| 6 Système d'étanchéité | – |
| 7 Béton armé 25 cm | 2,3 |
| 8 Béton maigre | 1,5 |
| 9 Terre | 2,0 |

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

| Valeur U [W/(m ² K)] | 0,28 | 0,25 | 0,21 | 0,15 | 0,15 | Exemples |
|--|------|------|------|------|------|---------------------------------|
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,041$ W/(m K) | 0,12 | 0,13 | 0,17 | 0,24 | 0,24 | Panneau de verre cellulaire |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,035$ W/(m K) | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,21 | 0,21 | Panneau de laine minérale |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,033$ W/(m K) | 0,09 | 0,11 | 0,13 | 0,20 | 0,20 | Panneau d'EPS |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,027$ W/(m K) | 0,08 | 0,09 | 0,11 | 0,16 | 0,16 | Panneau de PUR |
| Epaisseur 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 |
| Epaisseur d'isolant [m] pour $\lambda = 0,018$ W/(m K) | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,11 | 0,11 | Panneaux d'aérogel |
| Epaisseur 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 |

Illustration 2.16: Sol en contact avec la terre, massif, isolation thermique sur la plaque de sol.

2.5 Élimination des points faibles

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 bâtiment 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 Ψ (psi, W/(mK)). Les ponts thermiques ponctuels (p. ex. sous-structures de façade ventilées) sont donnés par les coefficients de transmission thermique ponctuels χ (chi, W/K). Des programmes de calcul des ponts thermiques et des catalogues de ponts thermiques permettent de déterminer les valeurs chi et psi. Dans la justification énergétique, les ponts thermiques sont documentés à l'aide du catalogue des ponts thermiques (Illustr. 2.17).

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 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. La norme SIA 180:2014 spécifie les valeurs limites et cibles pour la perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment selon le Tableau 2.2. La perméabilité à l'air peut être vérifiée au moyen d'une mesure (test «Blower-door»). Le standard Minergie exige un concept d'étanchéité à l'air, un concept de mesure d'étanchéité à l'air ou une mesure d'étanchéité à l'air, selon le label recherché.

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

Tableau 2.2:
Valeurs limites et
valeurs cibles pour
la perméabilité à
l'air maximale $q_{a,50}$
en $m^3/(h m^2)$ du bâti-
ment selon
SIA 180:2014 et
Minergie 2019.

| | SIA 180:2014 | | | Minergie | Minergie-P Minergie-A |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|--------------------------|
| | Valeur limite | | Valeur cible | Exigence | |
| | pour l'aération par les fenêtres | pour ventilation mécanique | en général | pour ventilation mécanique | |
| Construction nouvelle | 2,4 | 1,6 | 0,6 | 1,2 | 0,8 |
| Rénovation | 3,6 | 2,4 | 1,2 | 1,6 | 1,6 |

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 (test «Blower-door», surtout dans le cas des objets massifs non

continus) au cours de la construction, tant que les points délicats sont encore accessibles.

Les valeurs limites et cibles documentées dans le Tableau 2.2 sont le débit volumique de fuite en $\text{m}^3/(\text{h m}^2)$ à une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de 50 Pa et par rapport à 1 m^2 de la surface de l'enveloppe du bâtiment.

Aperçu des «ponts thermiques»

Coupe de bâtiment

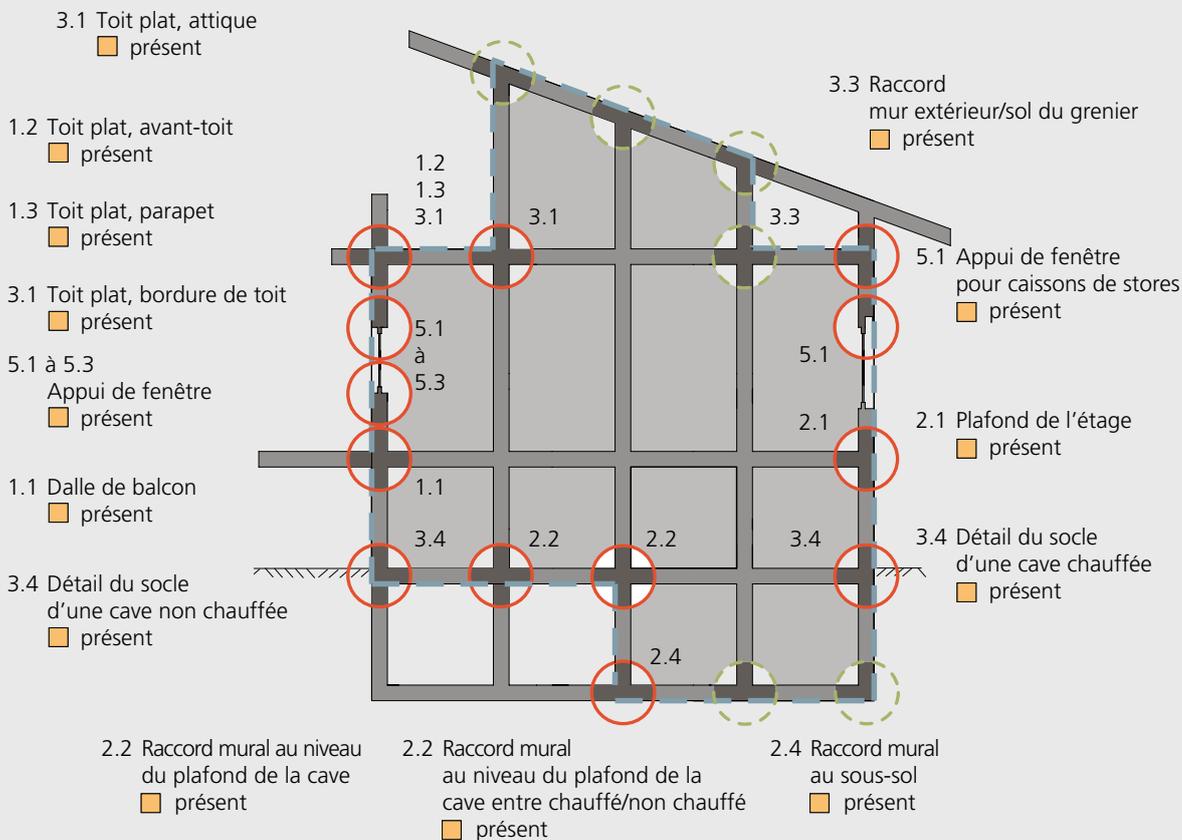


Illustration 2.17: Les indications et exigences, sous forme résumée, sont regroupés dans la «Liste de contrôle des ponts thermiques» (www.endk.ch).

Achim Geissler 2.6 Vitres et fenêtres

Les vitres, respectivement les fenêtres, sont des éléments centraux des bâtiments efficaces. Ils approvisionnent l'espace intérieur en lumière naturelle et fournissent un rapport visuel à l'environnement. En hiver, ils permettent l'utilisation passive de l'énergie solaire et réduisent ainsi nettement le besoin en chaleur. En été, ils 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 et les fenêtres 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)
 - Revêtements (coefficient d'émission et absorption ou réflexion solaire) et
 - Entretoises entre les vitres (matériaux).
- Remarque: Les fabricants ne tiennent pas compte de ces composants dans les valeurs U_g indiquées!
- Matériau du cadre resp. qualité de la séparation thermique (valeur U du cadre U_f)

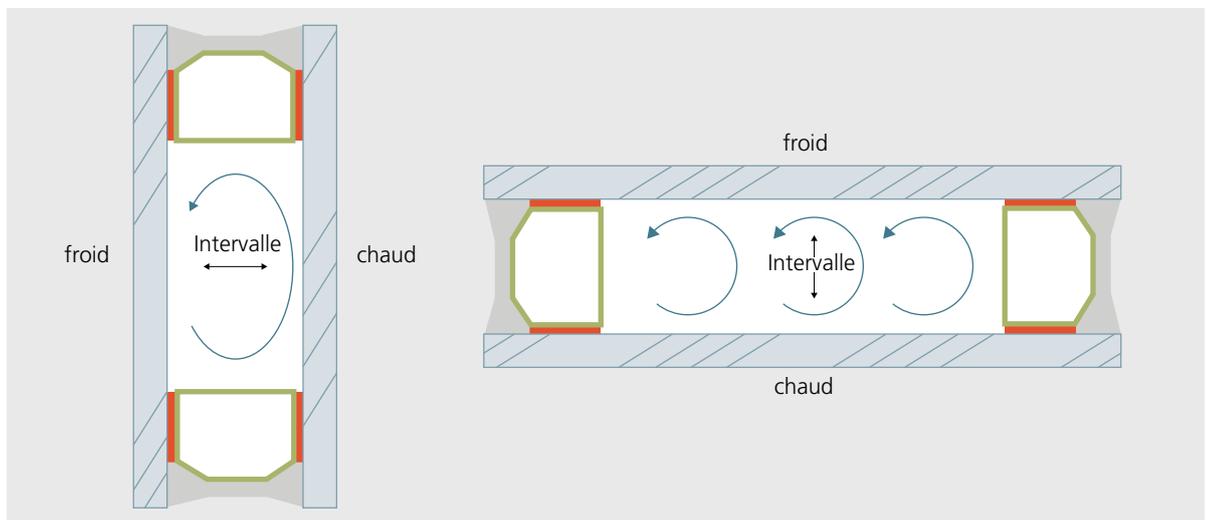
Les propriétés acoustiques, quant à elles, sont déterminées par les épaisseurs des différentes vitres, les vitres laminées éventuellement présentes ainsi que l'asymétrie des épaisseurs de vitres et les intervalles

entre vitres. Le choix des vitrages disponibles est considérable. Les différents produits sont faciles à trouver sur le site Internet des fabricants. Le développement technique est loin d'être terminé, il est donc conseillé de toujours consulter des listes à jour. Il en va de même pour les cadres ou les fenêtres complètes. Là aussi, il est conseillé de consulter les sites Internet des fabricants concernés. Il faut faire attention lors de la spécification des valeurs U des fenêtres. Celles-ci dépendent de la taille du cadre. La valeur comparative normative se réfère à une fenêtre à double battant de 1,55 x 1,15 m².

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. 2.18 et 2.20). Si l'on ne prend pas en compte cet état de choses dans le calcul de la valeur U ou dans le bilan énergétique (justificatif de système), la déper-

*Illustration 2.18:
Transport de chaleur par convection accru en présence de vitres inclinées – Phénomène appelé convection de Rayleigh-Bénard.
(Source: ift Rosenheim)*



dition thermique par transmission correspondante de cet élément de construction est bien entendu nettement sous-estimée. L'illustration 2.20 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. Un triple vitrage horizontal doit être combiné à un bon cadre (valeur U du cadre U_f basse) pour répondre aux exigences. Cette norme exige que la valeur U soit spécifiée avec deux chiffres significatifs. De nombreux fabricants ont des opinions divergentes à ce sujet. Mais il y a une différence si un verre avec $U_g = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ a en fait une valeur de 0,549! Il faut donc obliger le fabricant à spécifier la valeur avec deux chiffres significatifs. La valeur U de la fenêtre est calculée en fonction de:

$$U_w = \frac{U_g A_g + U_f A_f + \psi_g I_g}{A_g + A_f}$$

où A_g correspond à la zone claire du verre. U_f et A_f sont généralement composés de plusieurs valeurs et ψ_g est le coefficient de pont thermique pour la perte de bord du verre.

Outils de planification

Le LBNL en Californie (États-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). En outre, le LBNL met à disposition un logiciel d'analyse des vitrages de protection solaire (<http://windows.lbl.gov/>). On peut également utiliser le programme WIS issu d'un projet de recherche européen (www.windat.org/wis/html/). Celui-ci permet d'analyser des systèmes complexes constitués de verre et d'une protection solaire.

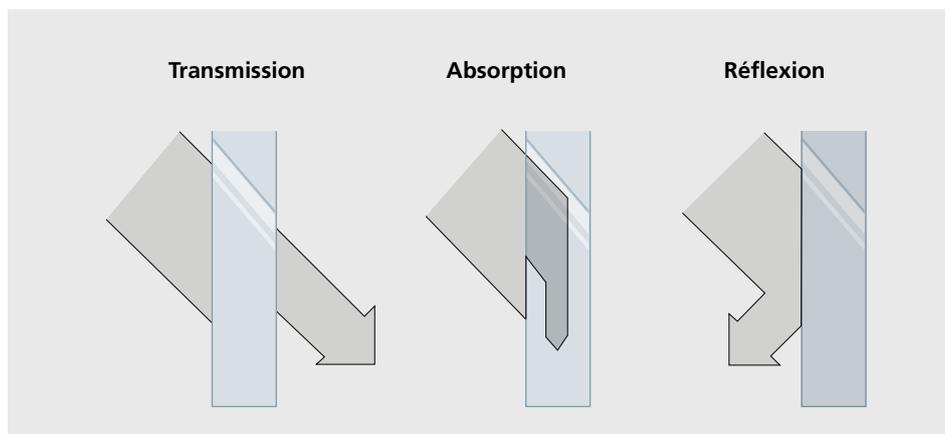


Illustration 2.19: Processus lorsqu'un rayonnement à ondes courtes parvient sur un élément. (Source: Glas Trösch)

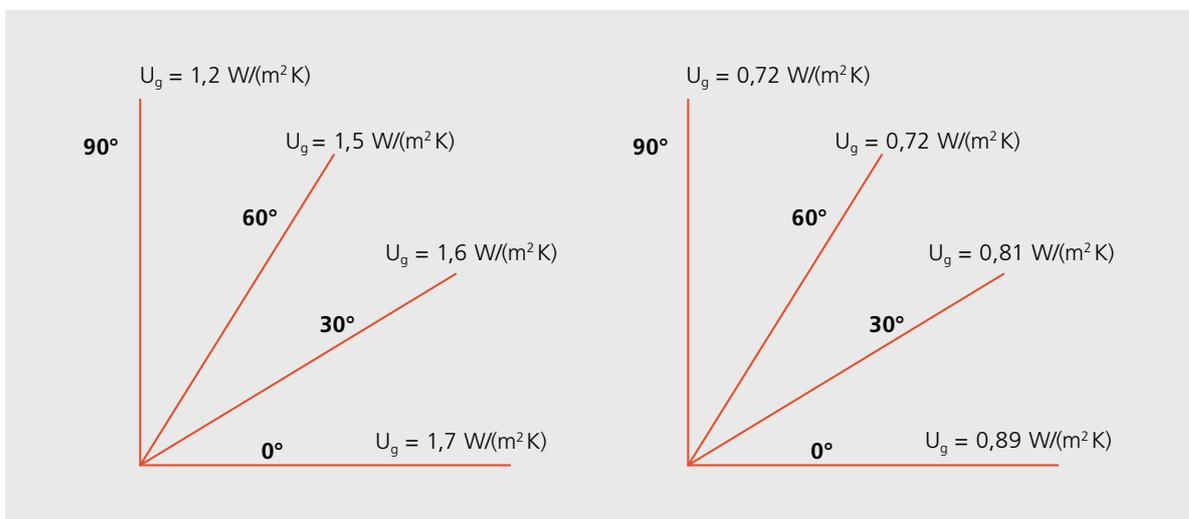


Illustration 2.20: Valeur U_g en fonction de l'angle d'inclinaison, à gauche pour un vitrage isolant double, à droite pour un vitrage isolant triple. (Source: ift Rosenheim)

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 2.21 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. Il s'applique:

$$I_{\text{glob}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{diff}}$$

avec

I_{dir} : rayonnement direct (orienté) [W/m^2]

I_{diff} : rayonnement diffus (non orienté) [W/m^2]

I_{glob} : rayonnement global [W/m^2]

C'est ainsi que nous parviennent 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. 2.19). 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 physiques de la surface de l'élé-

ment concerné. Ces propriétés dépendent généralement de la longueur d'onde:

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

avec

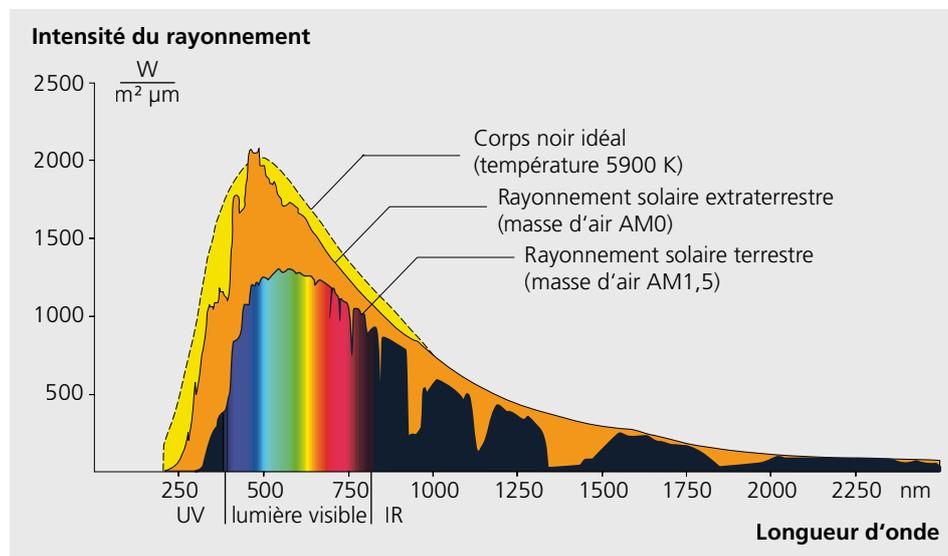
$\tau(\lambda)$: la transmission pour la longueur d'onde λ ,

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

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

Pour les produits de construction, ces grandeurs dépendantes de la longueur d'onde sont généralement résumées en valeurs intégrales pour les propriétés solaires et lumineuses. Lorsque la transmission (lumineuse) τ_{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 une bonne transmission pour le rayonnement solaire à ondes courtes, sur toute la plage de longueurs d'onde. 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 lon-

Illustration 2.21:
Spectre solaire dans
la plage de long-
ueurs d'onde de la
lumière visible.
(Source:
Wikimedia)



gours 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 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 2.22 montre un exemple de la transmission solaire spec-

trale d'un revêtement peu sélectif et d'un revêtement très sélectif. Aujourd'hui, pour cette sélectivité des vitres τ_{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.

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

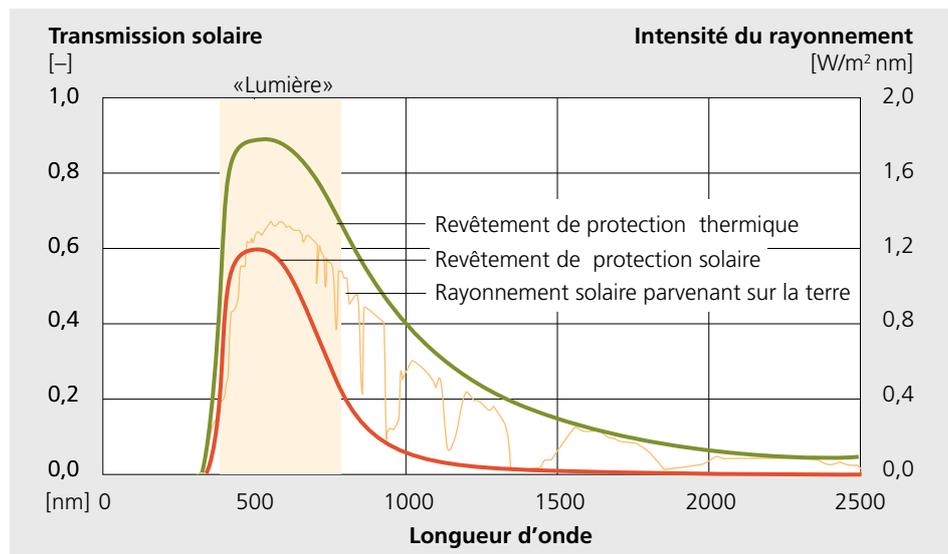


Illustration 2.22: Sélectivité. Exemple de transmission solaire dépendant de la longueur d'onde d'un revêtement d'isolation thermique (Interpane Iplus S) et d'un revêtement de protection solaire (Interpane 52/29), chacun sur un verre plat de 6 mm.

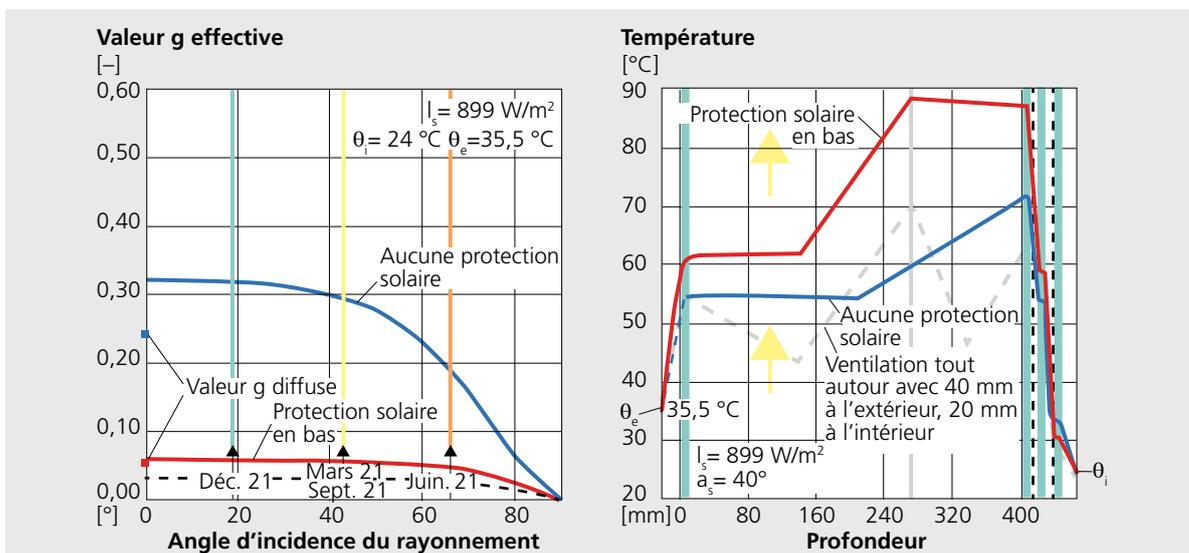


Illustration 2.23: Valeur g effective pour le rayonnement direct et diffus avec et sans stores à lamelles en fonction de l'angle du profil (à gauche) et des températures dans les plans des composants pour un angle d'inclinaison du soleil de 40° (valeurs maximales, à droite).

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 rayonnement qui diffèrent des normales, on parle d'une «valeur g effective». À 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 2.23, pour un système constitué d'un vitrage isolant et de stores à lamelles disposés à l'extérieur. À 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).

Illustration 2.24:
Transmission solaire et absorption (τ_{sol} , α_{sol}) ainsi que transmission et absorption de la lumière (τ_{vis} , α_{vis}) en fonction de l'épaisseur du verre.

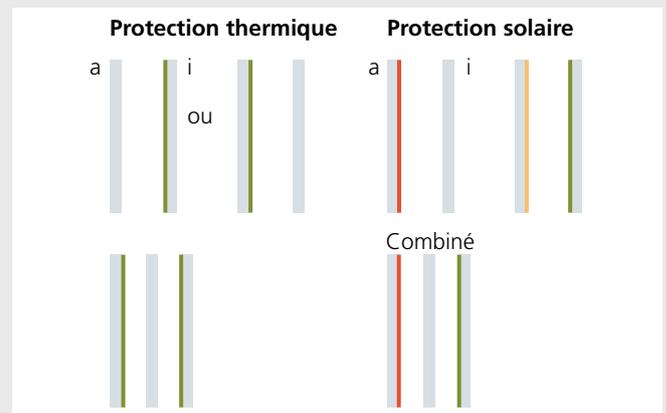
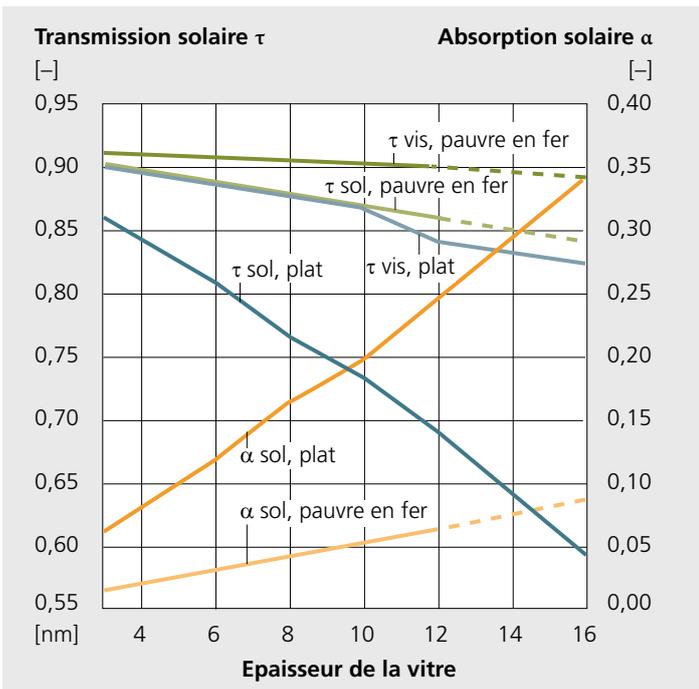
Comme base des indications du fabricant, on utilise généralement une structure du vitrage isolant de 4 – 16 – 4 ou 4 – 12 – 4 – 12 – 4. La valeur g indiquée se base alors généralement sur un verre plat normal («float»). Si l'on utilise un verre pauvre en fer, la valeur g peut être nettement plus

élevée, pour un revêtement identique. L'illustration 2.24 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.

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.

Où faut-il appliquer la couche sélective?

On ne peut pas choisir librement la position des revêtements sélectifs dans les vitrages isolants. Pour les vitrages isolants doubles renforcés, le revêtement est généralement situé sur la vitre intérieure, mais il peut aussi se trouver sur la vitre extérieure. Un second revêtement n'améliore pratiquement pas la valeur U . Pour les vitrages isolants triples renforcés, un revêtement est généralement disposé sur la vitre extérieure de chaque espace intermédiaire. En principe, il est également possible d'en prévoir un sur la vitre centrale, mais le coût est souvent élevé. Le revêtement de protection solaire doit impérativement être appliqué sur la vitre extérieure, qu'il s'agisse des vitrages de protection solaire doubles ou triples! Si le revêtement de protection solaire n'est pas un revêtement dit «combiné» (effet de protection thermique et solaire), il faut prévoir un revêtement de protection thermique sur la vitre intérieure pour les doubles vitrages. Voir schémas pour illustration.



2.7 Façades-rideaux

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-rideau entièrement vitrée est une grande fenêtre. Les illustrations 2.25 et 2.26 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 2.25 et 2.26, 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'ossa-

ture. 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, ce qui peut entraîner d'importants problèmes par la suite, lors du processus de planification ou de mise en œuvre.

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 éle-



*Illustration 2.25:
La Prime Tower à
Zurich, dotée d'une
façade-rideau entiè-
rement vitrée.*



*Illustration 2.26:
La Mobimo Tower à
Zurich – Façade-
rideau à l'aspect
d'une façade ajou-
rée.*

vés. 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 se trouve dans les vitrages, les cadres et le système dans sa globalité.

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'avantage. 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.

Valeur U_{cw}

La norme SIA 380/1:2016 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 des apports solaires, dépendant de l'orientation, par exemple Ordonnance allemande sur la protection thermique (Wärmeschutzverordnung) 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)

2.8 Protection thermique estivale

Il existe essentiellement deux possibilités pour éviter la surchauffe des pièces en été. Comme le montre le Tableau 2.3, 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 solaire 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 2.4 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.

Tableau 2.3:
Possibilités pour éviter et évacuer les charges thermiques dans les bâtiments.

Tableau 2.4:
Dispositifs de protection solaire et leur possibilité de disposition.

| | Taille | Mesure à prendre |
|----------|--|---|
| À éviter | Part de fenêtre resp. de vitrage de la (des) façade(s) | diminuer |
| | Valeurs g (vitre, opaque) | diminuer |
| | Charges internes | diminuer |
| | Valeur U (translucide et opaque) | dépendant du climat et du niveau, pas nécessairement univoque |
| | Ombrage | augmenter |
| | Protection solaire | améliorer |
| Évacuer | Aérer | augmenter ou diminuer en fonction de la température extérieure |
| | Stocker et aération nocturne | augmenter la possibilité de stockage, permettre l'aération nocturne |
| | Dalles thermoactives et autres systèmes actifs | prévoir dans le concept |
| | Valeur U (translucide et opaque) | dépendant du climat et du niveau, pas nécessairement univoque |

| Type | Variantes | intérieur | entre | extérieur |
|-----------------------------|---|-----------|-------|-----------|
| Tentures mobiles | Tissu; réfléchissant, perméable à la lumière | x | x | x |
| | Lamelles normales, systèmes d'orientation de la lumière (p. ex. tentures divisées en 2, formes de lamelles spéciales), vertical, horizontal | x | x | x |
| Ombrages isolés | Surplombs, projections | - | - | x |
| | Pilastres latéraux | - | - | x |
| | Brise soleil | - | - | x |
| Verre de protection solaire | Normal | - | (x) | - |
| | Thermo- ou électrochromique | - | (x) | - |
| | Les développements actuels comprennent des conduits intégrés de lumière, le PCM, de nouvelles options d'assombrissement etc. | - | (x) | - |

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.

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:

$$q_L = \rho c_p \Delta T$$

respectivement

$$Q_L = \dot{V} q_L$$

soit

q_L Potentiel de refroidissement spécifique par la ventilation en Wh/m^3

ρ Densité de l'air en kg/m^3

$$\rho_N \approx 1,189 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ (sec, } 23^\circ\text{C, } 1013,25 \text{ hPa)}$$

c_p Chaleur spécifique de l'air en $\text{Wh}/(\text{kg K})$

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

ΔT 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^3/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.

Exemple: La chaleur peut être extraite d'une pièce de dimensions (L x P x H) $6,0 \text{ m} \times 6,0 \text{ m} \times 3,5 \text{ m} = 126 \text{ m}^3$ en fonction du taux de renouvellement de l'air et de la différence de température entre les surfaces du côté de la pièce et l'air extérieur, comme le montre l'illustration 2.28 en bas. Sur le site de Bâle-Binningen, avec une façade sud de la pièce vitrée à 50 % ($A_g = 10,5 \text{ m}^2$) d'une valeur g de 0,10, avec un taux de renouvellement de l'air de $n = 2 \text{ h}^{-1}$ comme le montre l'illustration en haut, environ 5½ heures doit être ventilée avec une différence de température moyenne de 6 K afin d'éliminer la chaleur fournie pendant la journée par le rayonnement solaire de la pièce.

Les périodes plus longues et très chaudes sans refroidissement important la nuit restent problématiques. Ce problème augmente, surtout dans les zones urbaines – également en raison de ce qu'on appelle l'effet d'îlot de chaleur dans les agglomérations. Pour un rafraîchissement nocturne efficace, il faut viser des renouvellements d'air d'au moins 2 h^{-1} à 3 h^{-1} . Comme indication de la section efficace des ouvertures nécessaires à cet effet, on peut prendre comme base environ 5 % de la surface de

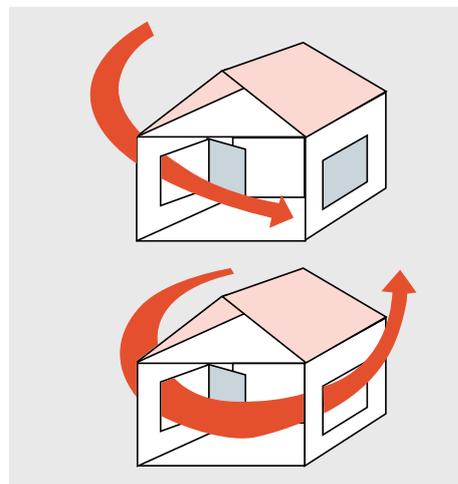


Illustration 2.27: Ventilation d'un seul côté (en haut) et ventilation transversale (en bas). Source: Fenster Keller AG

plancher pour la ventilation unilatérale (Illustr. 2.27) et 1 à 2 % de la surface de plancher pour la ventilation transversale. Le renouvellement d'air nécessaire pour un rafraîchissement nocturne efficace est sensiblement plus élevé que celui qui est nécessaire sur le plan hygiénique. C'est pourquoi les systèmes de ventilation mécanique ne sont généralement pas adaptés à cette situation. Un système correspondant doit être dimensionné pour le refroidissement nocturne et est donc surdimensionné pour un fonctionnement normal et n'a aucun sens sur le plan économique ou énergétique.

L'illustration 2.28 montre le potentiel de refroidissement par ventilation. Si la différence de température entre celle de l'air extérieur et la température moyenne des surfaces de l'enveloppe de la pièce est de $\Delta T = 6 \text{ K}$ et qu'un taux de renouvellement de l'air de $n = 2 \text{ h}^{-1}$ peut être atteint, on obtient une puissance de refroidissement d'environ 500 W. Sur le site de Bâle-Binningen, on peut s'attendre à un apport de chaleur de $2518 \times 10,5 \times 0,1 \approx 2644 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{ d})$ pendant la journée de mai avec une valeur g de 0,1 à $10,5 \text{ m}^2$ de surface vitrée. Cela signifie, par exemple, que le refroidissement

nocturne doit être maintenu pendant environ 5,5 heures afin de dissiper la même quantité de chaleur que celle fournie par le rayonnement solaire.

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

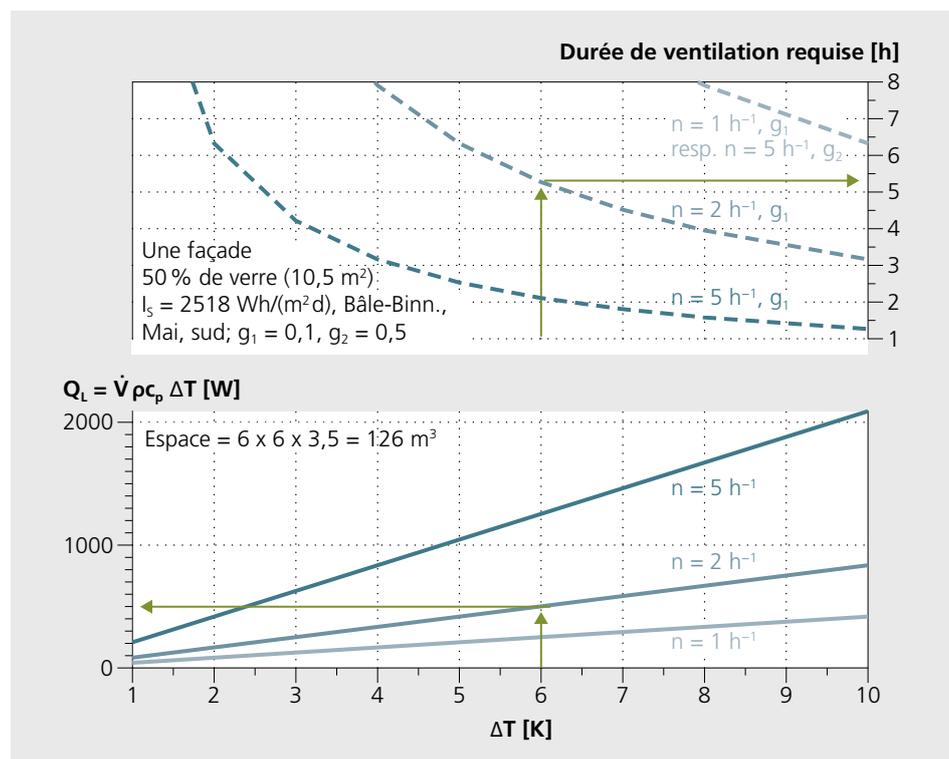


Illustration 2.28: Potentiel de refroidissement par la ventilation.

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 $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

■ 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.1.1. Le degré de perméabilité énergétique globale g_{tot} de la fenêtre (vitrage et protection solaire) est au maximum 0,10.

■ Un rafraîchissement nocturne avec un débit d'air d'au moins $10 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ est assuré (cela correspond à un renouvellement d'air de $n \geq 3 \text{ h}^{-1}$ pour des hauteurs usuelles de locaux)

■ 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 2.5 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 2.5 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.

Tableau 2.5:
Critères liés à l'utilisation et à la situation pour la procédure de justification 1: parts vitrées maximales pour une justification simple du confort pendant la saison chaude.

| Catégorie de locaux | Fenêtre ouverte | Part vitrée maximale pour la protection solaire avec commande | |
|--|-------------------|---|-------------|
| | | manuel | automatique |
| Habitat Inertie thermique élevée | une façade | 50 % | 70 % |
| | plusieurs façades | 30 % | 50 % |
| Habitat Inertie thermique moyenne | une façade | 40 % | 60 % |
| | plusieurs façades | 30 % | 50 % |
| Bureau, salle de séance, école, inertie thermique élevée | une façade | — | 40 % |
| | plusieurs façades | — | 30 % |

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 2.29 montre les valeurs à atteindre. Ces valeurs doivent être justifiées avec une protection solaire activée.

Constructions dotées d'une inertie thermique élevée

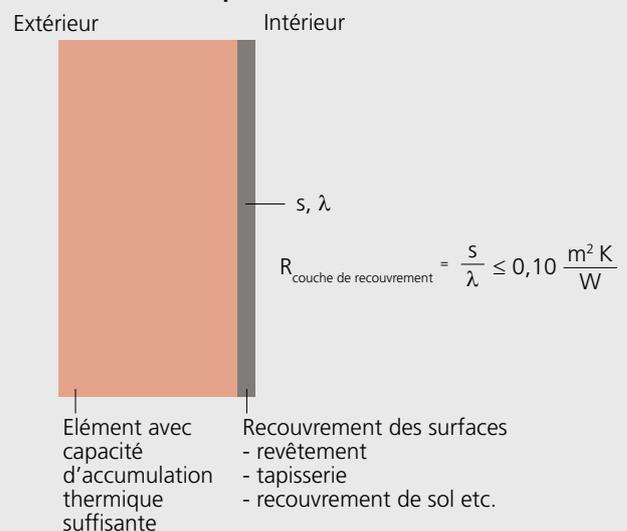
- Plafonds en béton ou murs en béton, en briques en terre cuite ou en briques silico-calcaires en contact direct avec l'air ambiant; les éléments de construction ainsi matérialisés doivent correspondre au minimum à 80 % de la surface du sol.

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

Perméabilité thermique des couches de recouvrement sur les surfaces des pièces



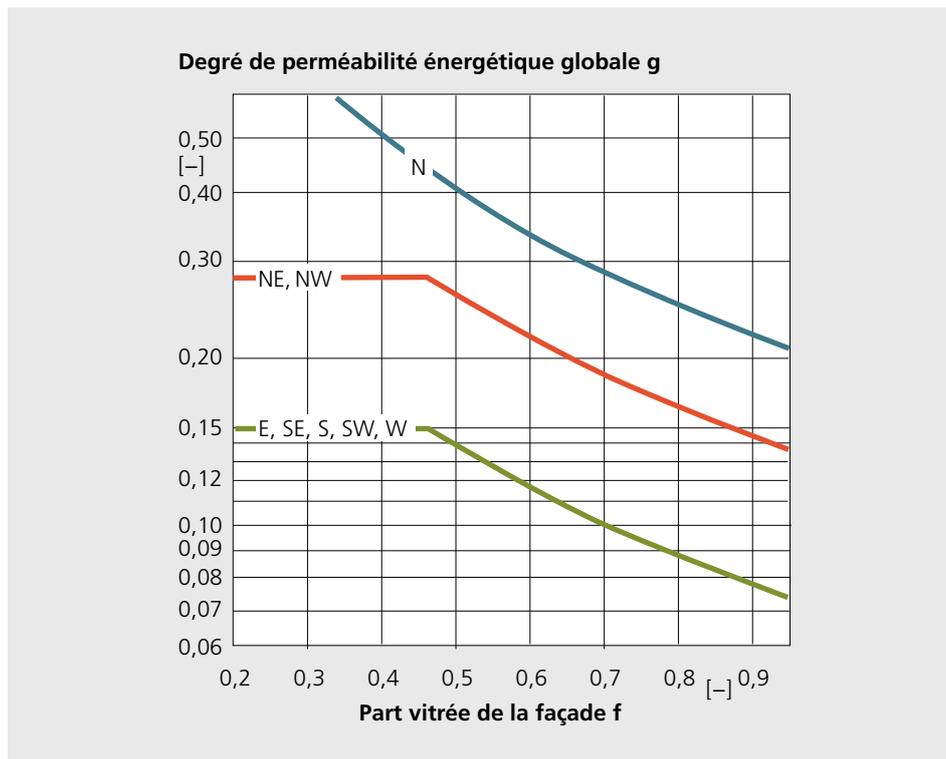


Illustration 2.29: Exigences en matière de valeur g des fenêtres de façade (vitrage et protection solaire) selon la part vitrée et l'orientation de la façade. (Source: Norme SIA 180)

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^{-1} ou 9 m^3 par heure et par m^2 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^{-1} ou 12 m^3 par heure et par m^2 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.

2.9 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 continuera d'utiliser le facteur de lumière naturelle pour évaluer la situation. Cependant, ce facteur (TQ) (daylight factor, DF) doit être considéré comme obsolète en termes de planification moderne de la lumière naturelle.

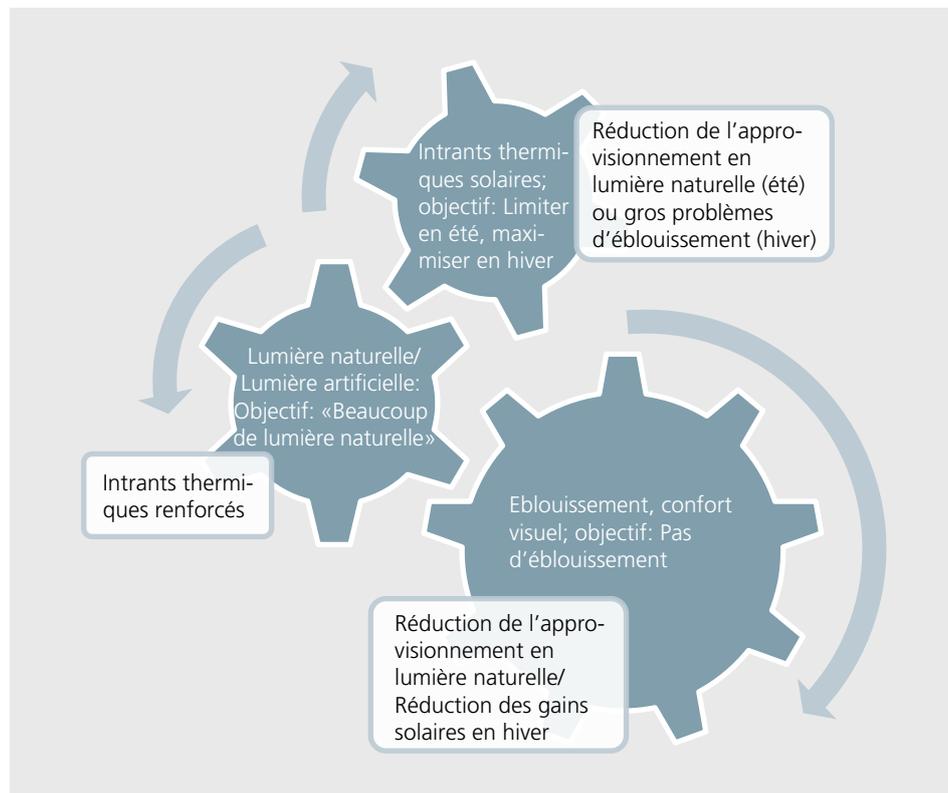
Le facteur de lumière naturelle est donc une valeur stationnaire décrivant une situation donnée, qui ne se produit que rarement. Il peut fournir de premières indications sur les conditions de lumière naturelle mais ne suffit pas à optimiser une façade dans le champ de contraintes entre la lumière naturelle, les apports de chaleur solaire et la minimisation de l'éblouissement (Illustr. 2.30). 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 2.31 montre l'extension à des conditions d'éclairage naturelles, par rapport à l'hypothèse statique artificielle d'un ciel uniforme avec 10 000 lux.

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 faible, et dans le cas des vitrages de protection solaire, net-

*Illustration 2.30:
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.*



tement plus élevée qu'avec les meilleurs luminaires disponibles. 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 2.6 et 2.7 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 [2]) sont réalisées. Celles-ci sont fondamentalement comparables avec des simulations thermiques de bâtiments pour l'analyse détaillée et l'opti-

misation 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 évalués de façon globale, pour différentes variantes de planification. De telles analyses détaillées sont peu appropriées aux maisons individuelles et à plusieurs logements 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 devienne un standard.

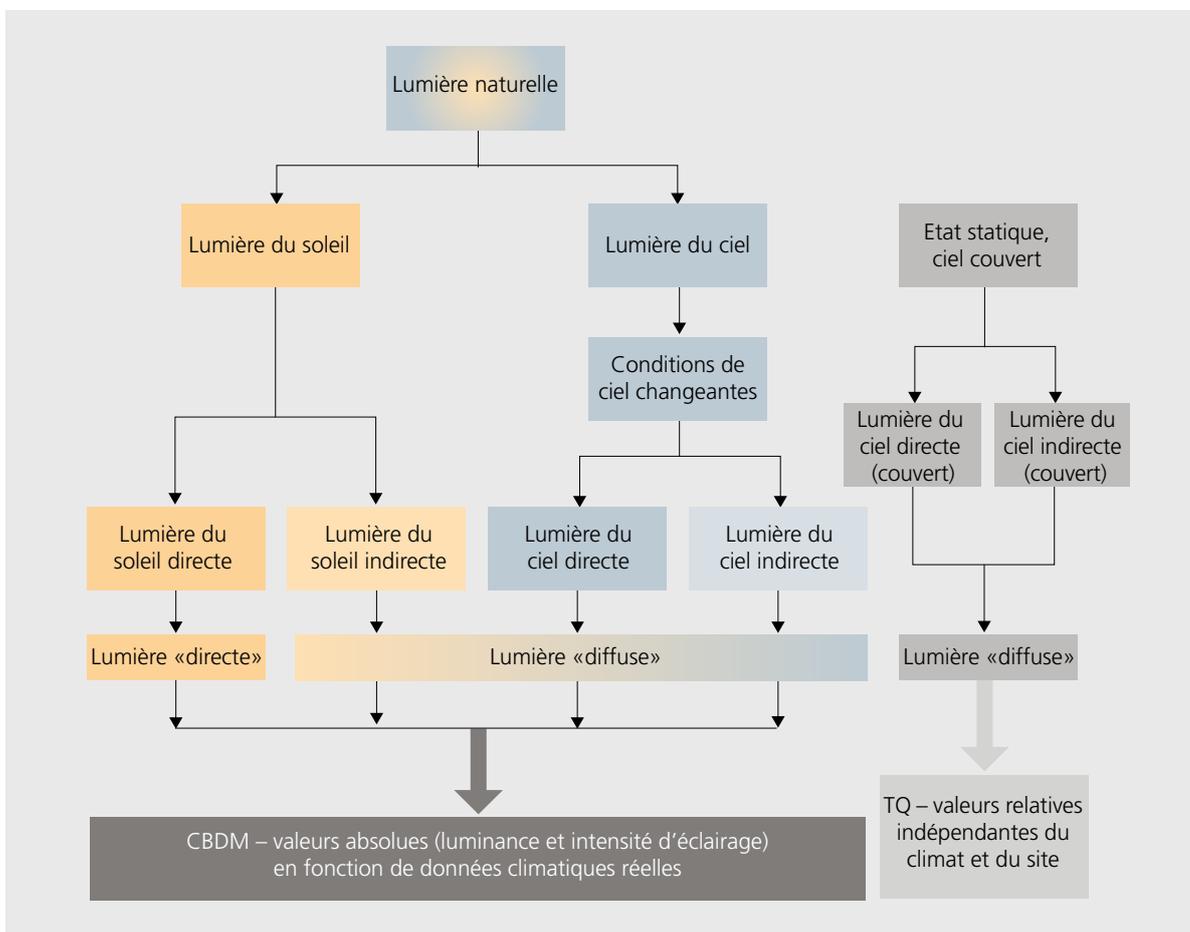


Illustration 2.31: Sources lumineuses prises en compte dans la planification de la lumière naturelle basée sur le climat (CBDM) par rapport à la valeur statique «facteur de lumière naturelle» (daylight factor, DF). (Source: [1])

Métriques

À l'exception de la valeur UGR (degré de l'éblouissement direct: Unified Glare Rating), les métriques mentionnées ci-après – c.-à-d. 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 représentation en couleurs dégradées sur un plan de la pièce concernée.

Autonomie en lumière naturelle simplifiée (TA_{387/4}):

Sur la base de la norme SIA 380/4:2017, 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.

$$TA_{387/4} = 100 \cdot (1 - t_{Li,Nz}/Nz)$$

Nz Durée d'utilisation conformément à la norme 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

Tableau 2.6:
Valeurs indicatives pour l'efficacité lumineuse des sources de lumière naturelles et artificielles. (Source (à l'exception des LED): [1])

| Source | Efficacité lumineuse (lm/W) |
|---|-----------------------------|
| Ensoleillement direct | 70 – 95 |
| Ciel bleu clair, part diffuse | 130 |
| Ciel couvert, part diffuse | 110 |
| Lumière naturelle globale (directe et diffuse) | 105 |
| Ampoules à incandescence | 15 |
| Luminaires fluorescents | 57 – 72 |
| Tubes lumineux T5 | 70 – 100 |
| LED | 100 – 190* |
| *État 2019 pour divers prototypes – une seule LED, pas encore de luminaires ou de lampes prêts à l'emploi; température de lumière variable, source: Recherche de réseau 2019. | |

Tableau 2.7:
Valeurs indicatives pour l'efficacité lumineuse des sources de lumière naturelle du Tableau 2.6 corrigées avec les propriétés sélectives des verres modernes**.

| Source | Type de verre* | Efficacité lumineuse (lm/W) |
|---|----------------------|-----------------------------|
| Ensoleillement direct | 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; chacun 6-16-6. | | |
| **L'effet positif des verres sélectifs est dû au fait que les revêtements correspondants sont développés précisément dans le but de transmettre autant de lumière et aussi peu de chaleur que possible, voir également les paragraphes «Rayonnement solaire» et «Valeur g» et l'illustration 2.22 | | |

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'atteindre une intensité d'éclairage donnée. Les plages de valeurs traditionnelles sont par exemple UDI_{>2000 Lux} (trop clair), UDI_{500-2000Lux} (autonomie), UDI_{100-500Lux} (en soutien) et UDI_{<100 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'UDI 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 actuel [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 la norme SIA 380/4:2017 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).

2.10 Sources

- [1] Mardaljevic, L. Heschong, E. Lee: Daylight metrics and energy savings; *Lighting Res. Technol.* 2009; 41: 261–283
- [2] Reinhart CF.: Daysim; version 4.0, <http://daysim.ning.com> (état juillet 2019)
- [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 (UK), 944–951

Enveloppes de bâtiment hautement isolées

Marco Ragonesi 3.1 Compréhension

Il n'existe pas de définition claire du terme «enveloppe de bâtiment hautement isolée». Les standards tels que Minergie-P ou le standard de la maison passive très répandu en Allemagne exigent évidemment une enveloppe de bâtiment hautement isolée. Lorsque les besoins en énergie pour le chauffage sont couverts par l'énergie renouvelable (p. ex. le bois) ou par des installations techniques efficaces (pompe à chaleur à COPA élevé), les enveloppes de bâtiment selon le MoPEC 2014 (ces exigences primaires s'appliquent également aux constructions Minergie et Minergie-A) peuvent d'ores et déjà être considérées comme hautement isolées. Pour le dire plus simplement: les seules enveloppes de bâtiment désormais autorisées par la législation sur l'énergie sont les enveloppes de bâtiment hautement isolées.

Le cumul enveloppe thermique du bâtiment et Minergie-P engendre une réduction des besoins de chaleur pour le chauffage conformément au MoPEC 2014 de 30 %, ce qui n'est pas toujours judicieux d'un point de vue écologique (énergie grise, effet de serre) comme d'un point de vue économique.

3.2 Considérations conceptuelles

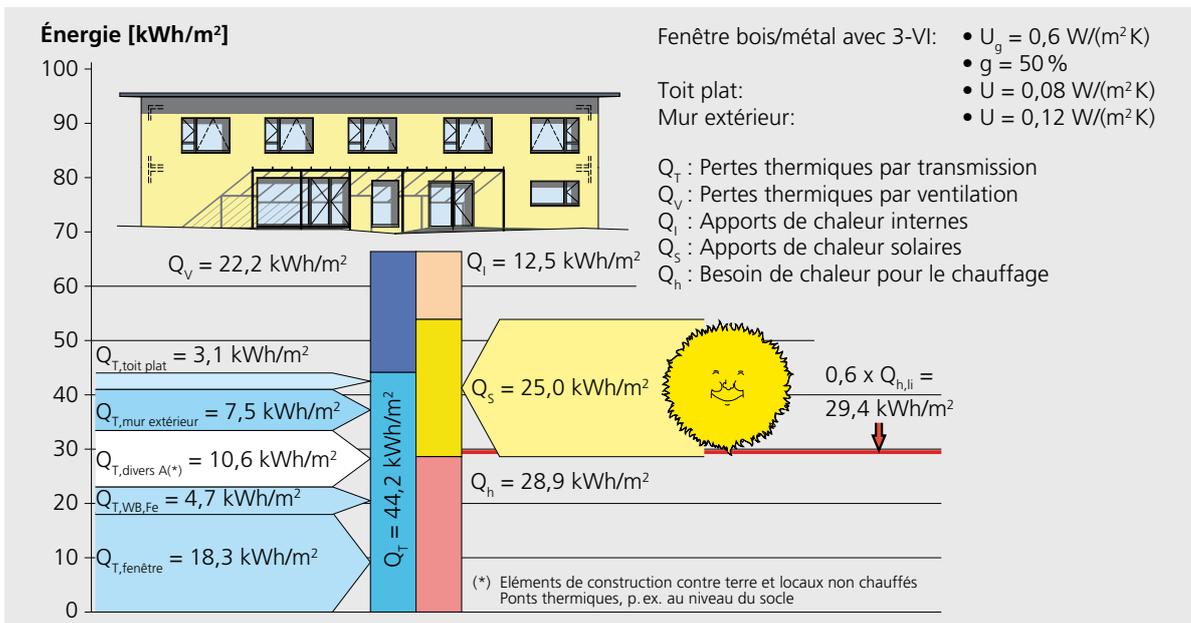
L'objectif d'une enveloppe de bâtiment hautement isolée est de réduire au minimum les besoins de chaleur pour le chauffage déterminés par calcul, ce qui est influencé par:

- Des déperditions de chaleur par transmission les plus faibles possibles avec des éléments de construction hautement isolés (valeurs U faibles) et de faibles déperditions par ponts thermiques.
- Des apports solaires passifs élevés à travers des fenêtres non ombragées ayant un taux de surface vitrée élevé, dans l'idéal orientées au sud et dotées d'une valeur g optimisée (il convient de prendre en compte la période de chauffage, mais aussi le risque de surchauffe en été).

Enveloppe thermique du bâtiment A_{th}

Pour optimiser le bilan énergétique à l'aide de calculs selon la norme SIA 380/1 ou le justificatif de la protection thermique suffisante, l'enveloppe thermique du bâtiment A_{th} est généralement définie de façon à ce que les locaux non chauffés se trouvent également à l'intérieur de celle-

Illustration 3.1: Bilan énergétique d'une enveloppe de bâtiment hautement isolée. Le bilan énergétique illustré est typique pour les constructions Minergie-P. Lors du montage, les fenêtres, conjointement aux ponts thermiques, occasionnent plus de 50% des déperditions par transmission thermique. La part utilisable des apports énergétiques par le rayonnement solaire est toutefois encore nettement supérieure aux déperditions par les fenêtres. PT: Ponts thermiques



ci. Les besoins de chaleur pour le chauffage ainsi déterminés ne reflètent donc pas les besoins effectifs de chaleur pour le chauffage eu égard aux locaux activement chauffés (Illustr. 3.2).

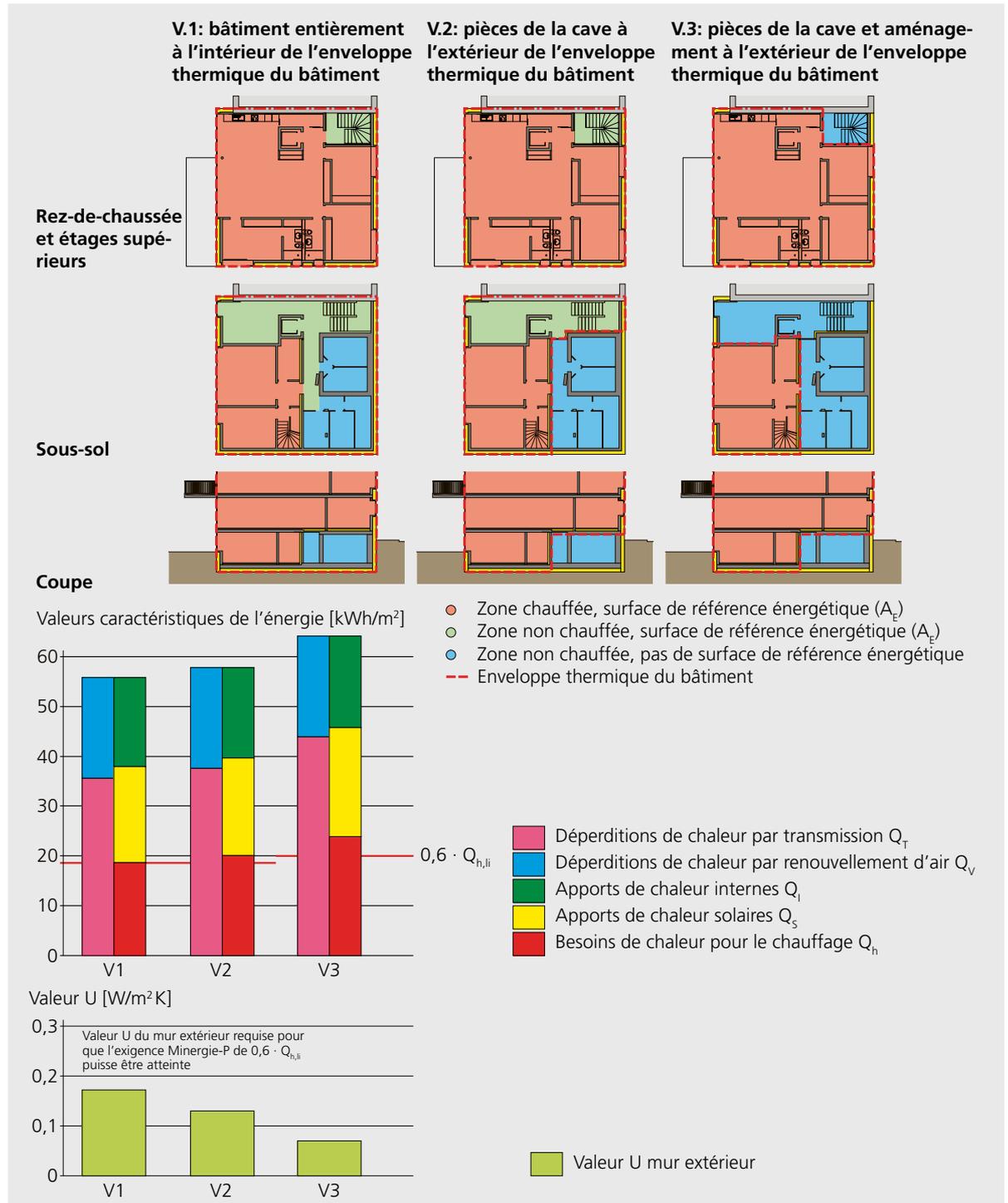
Cette «optimisation» par le biais de la détermination de l'enveloppe thermique du bâtiment, p. ex. en intégrant les locaux non chauffés au sous-sol (locaux de la cave/lo-

caux techniques) n'est pertinente que si les conditions suivantes sont respectées:

- La protection thermique entre les locaux activement chauffés et non chauffés relève du bon sens, p. ex. plafond au-dessus des locaux non chauffés ayant une valeur $U \leq 0,20 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$.

- Dans les locaux non chauffés, l'épaisseur d'isolation thermique des murs extérieurs

Illustration 3.2:
Le choix de l'enveloppe thermique du bâtiment ou de la délimitation dans et contre le terrain non chauffé est essentiel pour le justificatif calculé des besoins en chauffage. Dans cet exemple, une enveloppe thermique du bâtiment ne comprenant que les pièces chauffées activement (cf. V.3) n'aurait jamais permis d'atteindre l'objectif «Minergie-P»; le mur extérieur aurait dû avoir une valeur U irréaliste de $0,07 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$. La meilleure option pour cette propriété est la variante V.1, dans laquelle toutes les pièces sont situées à l'intérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment. Avec une valeur U de $0,172 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ pour le mur extérieur, le besoin de chauffage requis pour Minergie-P pouvait déjà être atteint. En fonctionnement, bien sûr, les trois variantes ont la même consommation de chauffage!



en contact avec la terre ne doit pas être nettement supérieure à l'épaisseur minimale pour la protection du bâtiment contre la chaleur et l'humidité (p. ex. une isolation périphérique d'env. 10 cm d'épaisseur).

■ La dalle au-dessus de la terre dans les locaux non chauffés ne doit pas faire l'objet d'une isolation thermique bien qu'elle fasse partie de l'enveloppe thermique du bâtiment.

Pour une réelle optimisation de l'enveloppe de bâtiment hautement isolée dont les avantages se traduiront ensuite pendant de nombreuses années d'utilisation, le mieux est de considérer uniquement l'enveloppe thermique du bâtiment A_{th} , qui sépare les locaux activement chauffés en contact avec l'extérieur et la terre des locaux non chauffés et intègre les valeurs U suivantes:

■ Murs extérieurs en contact avec l'extérieur ayant une valeur $U \leq 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ et en contact avec des locaux non chauffés dotés d'une valeur $U \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

■ Toits ayant une valeur $U \leq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

■ Planchers en contact avec l'extérieur ayant une valeur $U \leq 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ et en contact avec des locaux non chauffés dotés d'une valeur $U \leq 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

■ Éléments de construction en contact avec la terre dotés d'une valeur $U \cdot b$ (influence de la terre sur le flux de chaleur) $\leq 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

■ Fenêtres avec une valeur $U_w \leq 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

Maximiser les apports solaires passifs

Une réduction supplémentaire des déperditions de chaleur par transmission n'étant guère judicieuse dans les constructions hautement isolées ayant des valeurs U telles que celles proposées, une optimisation énergétique plus poussée des constructions passe par des apports solaires passifs élevés au maximum:

■ Orienter le bâtiment vers le sud, avec des écarts admissibles vers le sud-ouest ou le sud-est.

■ Orienter les grandes surfaces vitrées vers le sud et les petites surfaces vitrées vers le nord. Évaluer les fenêtres avec une petite part de cadre et un taux de surface vitrée élevé et des vitrages avec un coefficient global de transmission d'énergie maximum élevé (valeur g de 50 à 60 % possible).

■ Ne placer si possible aucun ombrage fixe au niveau de surfaces vitrées orientées au sud, disposer des balcons devant des éléments de construction opaques (Illustr. 3.3).

■ Ne pas utiliser, dans la mesure du possible, l'ombrage variable (protection solaire) pendant la période de chauffage.

■ Pour pouvoir exploiter de manière optimale l'énergie solaire reçue, le bâtiment doit présenter la plus grande masse thermique possible. Lorsque le rayonnement solaire est considérablement réduit par l'horizon, le surplomb (balcons, auvents) et les écrans latéraux (décalage de bâtiments, loggias), cela ne peut guère être compensé

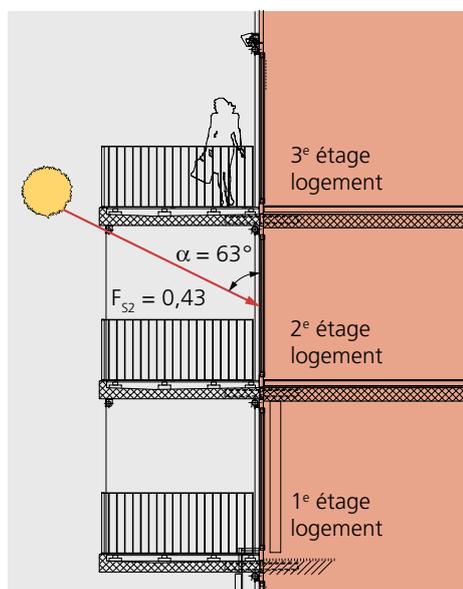


Illustration 3.3: Les balcons apportent un ombrage considérable aux fenêtres orientées sud. Considérée sur la période de chauffage, la façade de fenêtres derrière les balcons entraîne une perte d'énergie équilibrée de $33 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Sans l'ombrage des balcons, il en résulte un apport d'énergie de $19 \text{ kWh}/\text{m}^2$. La différence de $52 \text{ kWh}/\text{m}^2$ de la surface des fenêtres correspond à un pouvoir calorifique d'environ 5 litres de mazout.

par la réduction des déperditions (transmission) ou seulement en engageant des dépenses très élevées.

3.3 Éléments

Les enveloppes de bâtiment hautement isolées disposent d'éléments de construction opaques dotés de faibles déperditions de chaleur inférieures à $0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ en contact avec l'extérieur. Les toitures et les planchers, en particulier, doivent faire l'objet d'une isolation thermique relativement sans compromis, car ils délimitent des locaux qui présentent des surfaces de déperdition plus importantes que les locaux des entresols. Dans les constructions à plusieurs étages, les murs extérieurs tolèrent souvent des compromis en matière de protection thermique, des valeurs U de l'ordre de $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ peuvent également suffire pour les bâtiments hautement isolés.

Importance des matériaux d'isolation thermique

Exception faite des murs extérieurs, davantage en en maçonnerie monolithique épaisse, c'est généralement l'isolation thermique qui contribue le plus à la résistance à la perméabilité thermique. En se basant sur une résistance à la perméabilité thermique suffisante pour l'enveloppe de bâtiment hautement isolée de $6 \text{ (m}^2 \text{ K)}/\text{W}$, voici quelques exemples de matériaux d'isolation thermique envisageables:

- Isolation sous vide VIP, env. 42 mm
- Isolation aérogel, env. 90 mm
- PUR-Alu «Premium-Plus», env. 108 mm
- PSE «gris», env. 180 mm
- Plaque de laine de verre et de laine de roche, à partir de 192 mm env.

Les autres couches d'éléments de construction, telles que des matériaux porteurs et de revêtement et les résistances au transfert thermique, n'ont, à l'exception des sections en bois massif (p.ex. panneaux multicouches A+), qu'une influence négligeable. Pour la couche d'isolation thermique, il est préférable d'utiliser des produits contrôlés. On pourra ainsi atteindre une perméabilité thermique déclarée (valeur λ_D) selon la norme SIA 279. Outre la

couche d'isolation thermique et sa perméabilité thermique, des influences constructives (p.ex. sections transversales du bois, éléments de fixation) et l'orientation de l'élément (p.ex. vers la terre) agissent également sur la propriété isolante des éléments opaques.

Les flux de chaleur dans la construction en bois: valeurs U des constructions en bois non homogènes

La plupart des constructions en bois sont conçues en tant que systèmes non homogènes avec des couches d'isolation thermique entre la structure porteuse en bois. La section transversale en bois pénétrant dans la couche d'isolation thermique forme ainsi un pont thermique (manque d'homogénéité), qu'il s'agit de prendre en compte lors de l'évaluation des flux de chaleur. L'optimisation de ces éléments de construction engendre une diminution de la proportion de bois et donne naissance à des constructions à isolation renforcée à couches multiples (Illustr. 3.4).

Déperditions par ponts thermiques au niveau des éléments de fixation

Les ponts thermiques locaux sous forme d'éléments de fixation qui traversent la couche d'isolation thermique (p.ex. ancrages et rails des revêtements de façade ventilés), entraînent des déperditions par ponts thermiques ponctuels (valeur χ en W/K) ou linéiques (valeur Ψ en $\text{W}/\text{m K}$) qui doivent être prises en compte lors du calcul des valeurs U des éléments de construction. Ces influences peuvent être si importantes qu'il est impossible d'atteindre des valeurs U exigées pour une enveloppe de bâtiment hautement isolée. Notamment pour les murs extérieurs avec habillage ventilé, il convient d'évaluer des systèmes de fixation spéciaux qui permettent de construire avec une très haute isolation thermique (Illustr. 3.5), p.ex.:

- Sous-structure avec tige filetée, à travers une couche d'isolation thermique, fixée dans la sous-structure.
- Sous-structure avec console d'isolation thermique en matière synthétique renforcée par fibres, qui traverse la couche

d'isolation thermique, et éléments de fixation en aluminium disposés côté chaud et froid.

■ Isolation thermique: entre lattis croisés.

Flux de chaleur dans les éléments de construction en contact avec la terre

Lorsque des éléments de construction sont enterrés dans un sol non remué (sans influence de la nappe phréatique), les déperditions de chaleur par transmission sont réduites par l'action isolante de la terre (Illustr. 3.6 et Illustr. 3.7). L'effet isolant de la

terre est pris en compte selon la norme EN ISO 13370. Tendances constatées:

■ Plus le bâtiment est implanté profondément dans la terre (hauteur z), meilleures sont les valeurs U du mur et du plancher à structures constantes.

■ Plus la surface du plancher est importante, meilleure est la valeur U du plancher à structures constantes. Lorsque les surfaces de plancher sont très importantes, il est envisageable de renoncer à une couche d'isolation thermique ou d'isoler uniquement les parties périphériques du plancher.

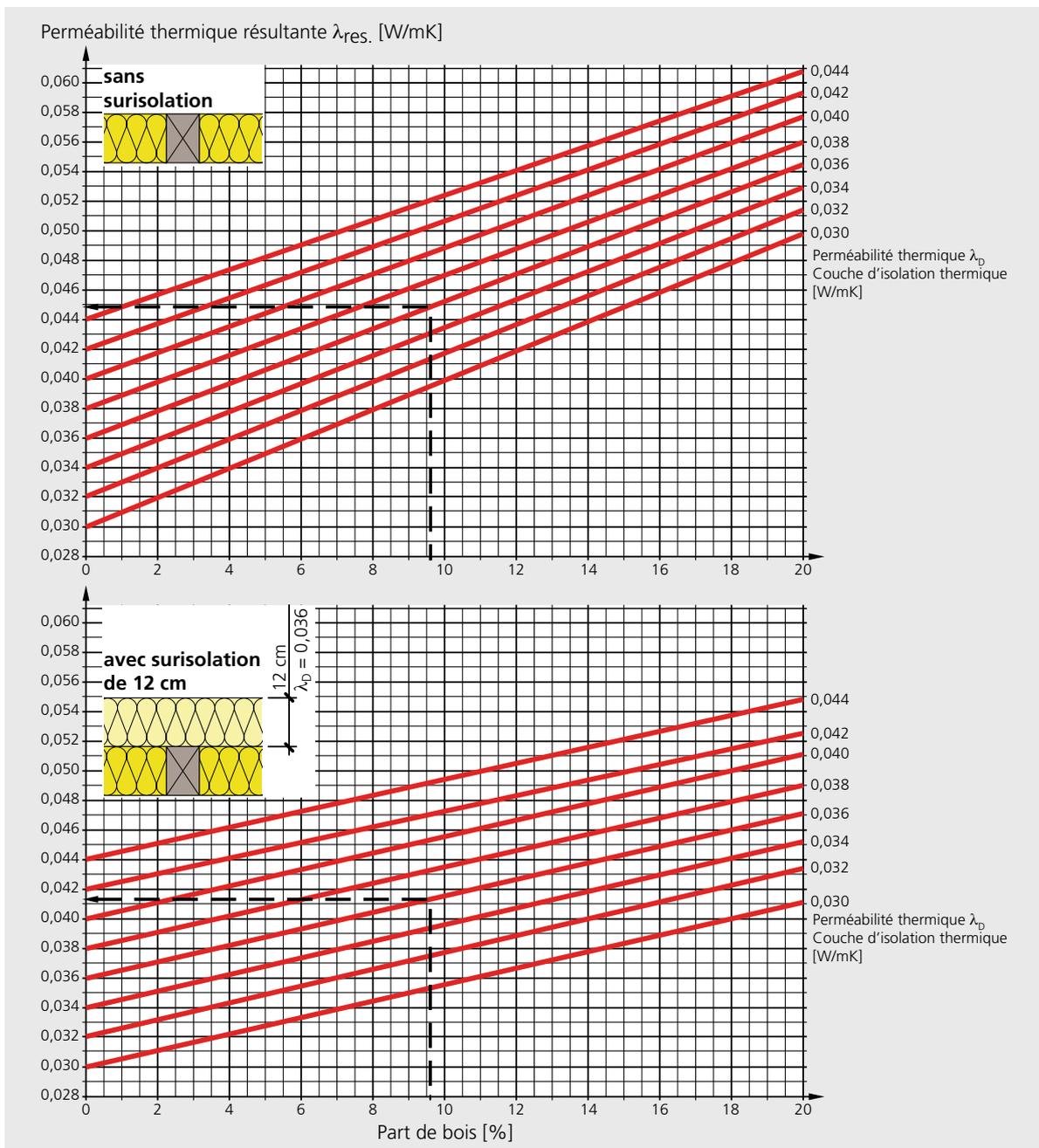
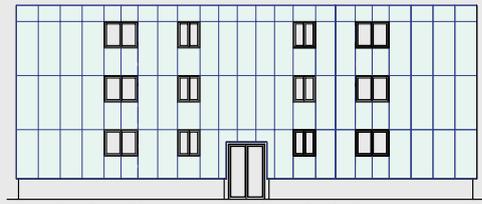
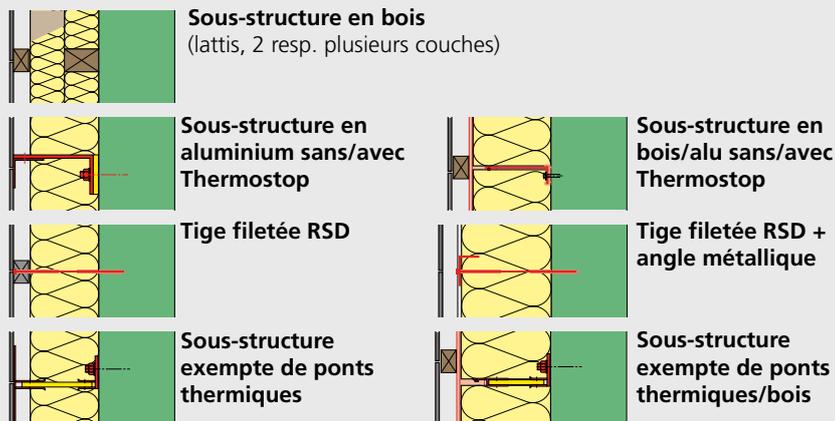


Illustration 3.4: La perméabilité thermique résultante λ_{res} pour la couche inhomogène « bois et isolation thermique » en relation dépend de la teneur bois et de la perméabilité thermique λ_D de l'isolation, avec et sans surisolation dans la couche inhomogène. Avec une part de bois de 9,5 %, la perméabilité thermique résultante peut être réduite de $\lambda_{res} = 0,045$ à $\lambda_{res} = 0,041$ W/mK.



Façade de référence pour le calcul des pertes par ponts thermiques, en panneaux de fibres de ciment dans les revêtements de façade de grande envergure.

Remarque:

Les structures effectives dépendent de l'épaisseur de la couche d'isolation, p. ex. de 160 mm (une couche) à 360 mm (plusieurs couches)

Influence du pont thermique de la sous-structure sur la valeur U du mur (augmentation de la valeur U en%)

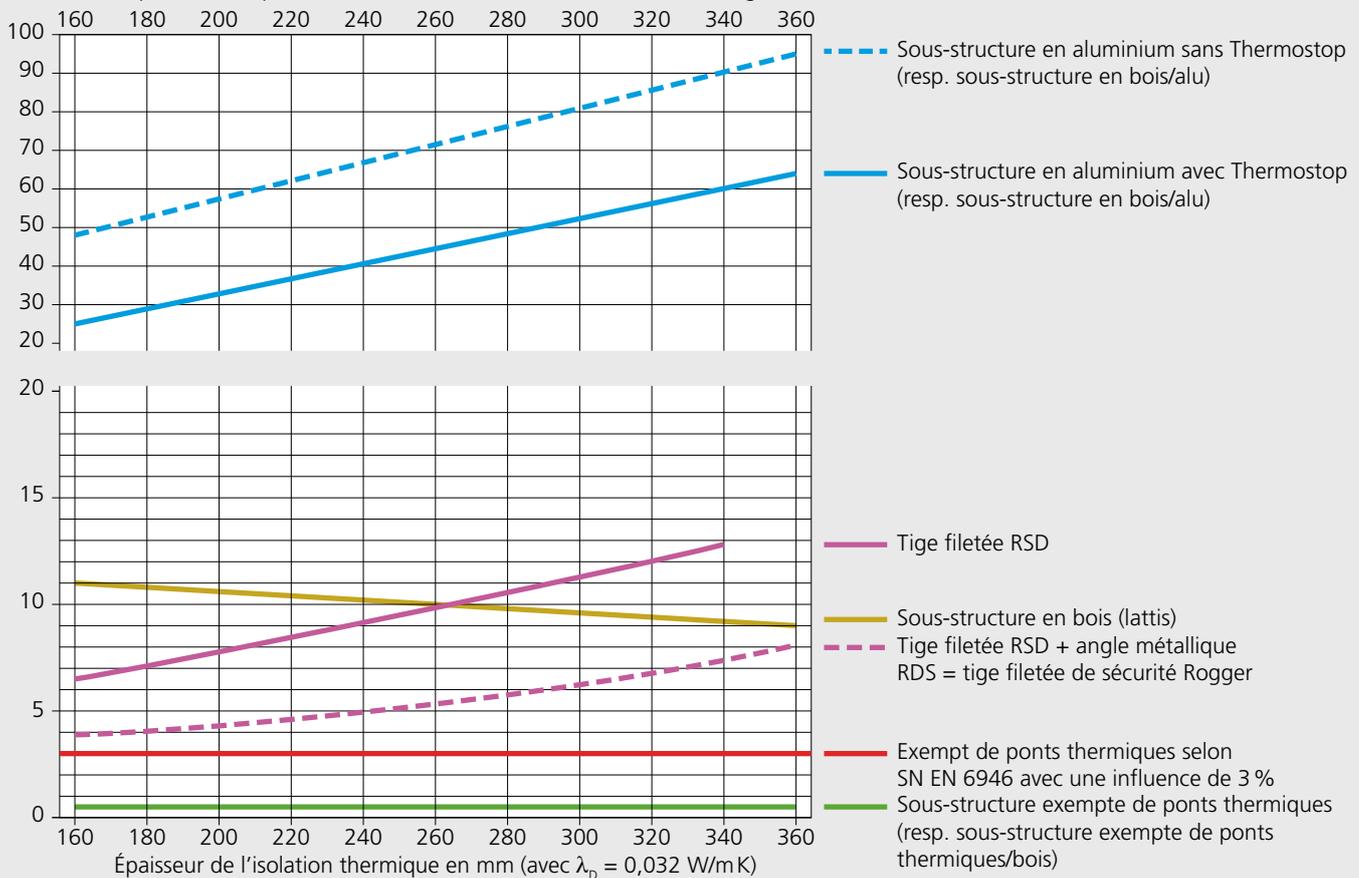


Illustration 3.5: Exemples d'augmentation du pourcentage de la valeur U prévue par différents systèmes de sous-structures, en fonction de la sous-structure et de l'épaisseur de l'isolation thermique, dans le cas d'une base d'ancrage en béton armé. Selon la norme SN EN 6946, les différences inférieures à 3% entre la valeur U sans et avec influence des ponts thermiques, comme c'est le cas par exemple pour les supports d'isolation thermique, ne doivent pas être prises en compte. Dans le cas des boulons filetés, selon le système et l'épaisseur de la couche d'isolation thermique, il en résulte une augmentation du flux de chaleur d'environ 3 à 15%. Dans les sous-structures en bois, l'influence des ponts thermiques dépend de la proportion de bois (6% pris en compte) et elle diminue en raison de la surisolation des sections transversales en bois avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'isolation thermique; elle est d'environ 9 à 11%. Dans le cas des sous-structures en aluminium, l'influence du pont thermique est d'au moins 20% et peut conduire à un quasi-doublement du transfert de chaleur. Cependant, avec des sous-structures en aluminium couvrant plusieurs étages, les pertes par ponts thermiques peuvent être considérablement plus faibles qu'avec des sous-structures « normales » en aluminium. En principe, les pertes effectives par ponts thermiques doivent être évaluées sur une base spécifique au projet afin de déterminer les pertes de chaleur correctes (valeurs U).

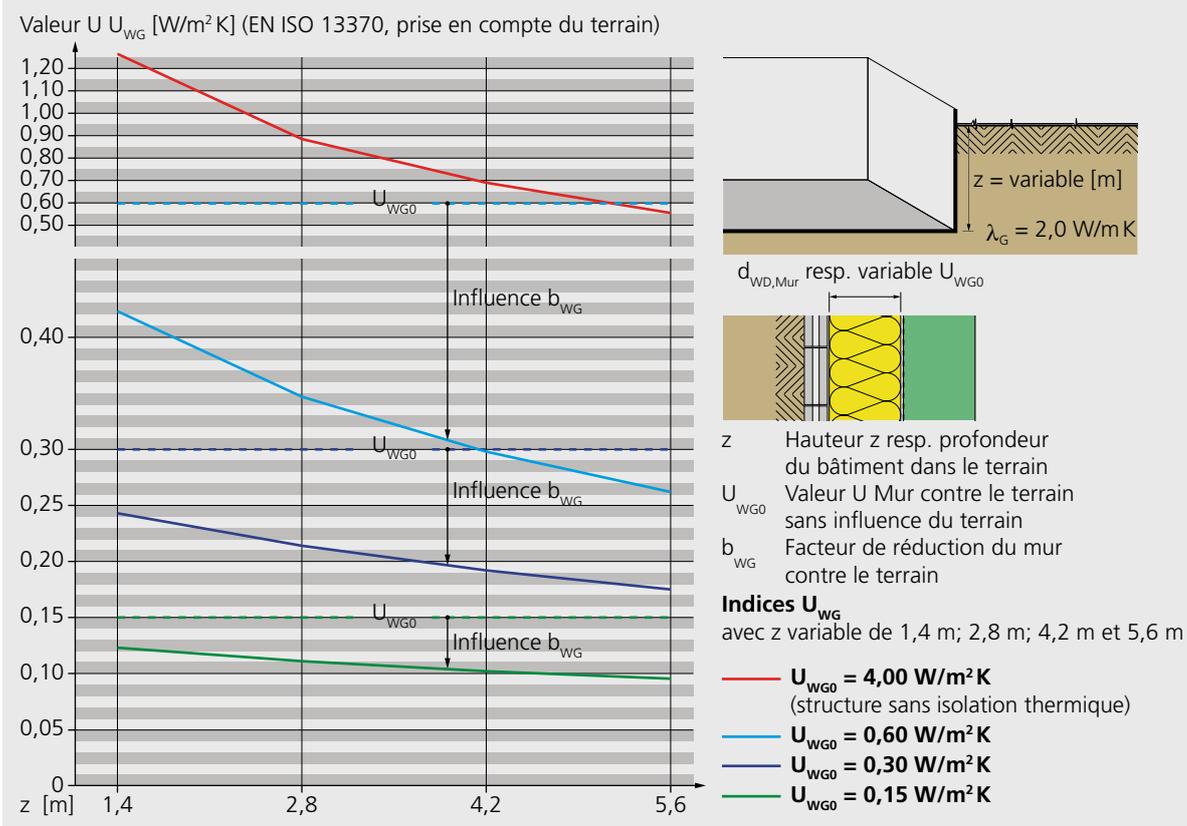


Illustration 3.6: Les valeurs U_{WG0} sont réduites par le facteur b_{WG} . L'influence du sol dépend de la conductivité thermique du sol (on considère généralement $\lambda_G = 2,0 \text{ W/m K}$) et de la profondeur z . Dans le cas de murs contre le terrain, une isolation thermique supplémentaire est toujours nécessaire pour l'enveloppe hautement isolée du bâtiment.

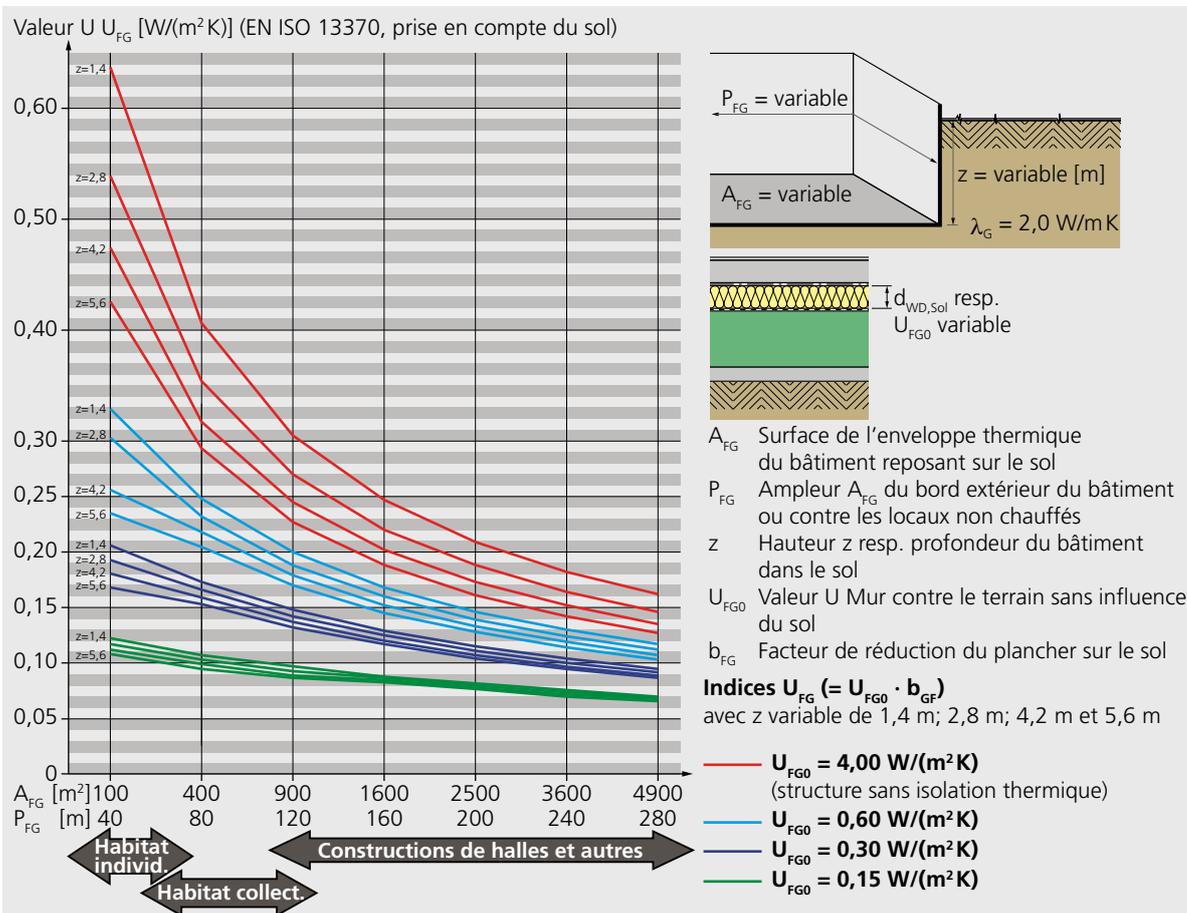


Illustration 3.7: Les valeurs U_{FG0} sont réduites par le facteur b_{FG} . L'influence du sol dépend de la conductivité thermique du sol (on considère généralement $\lambda_G = 2,0 \text{ W/m K}$), de la taille de la surface du sol et de la profondeur z . Dans le cas des constructions de halles, par exemple, une isolation thermique suffisante peut généralement être obtenue même sans isolation thermique.

Toiture plate

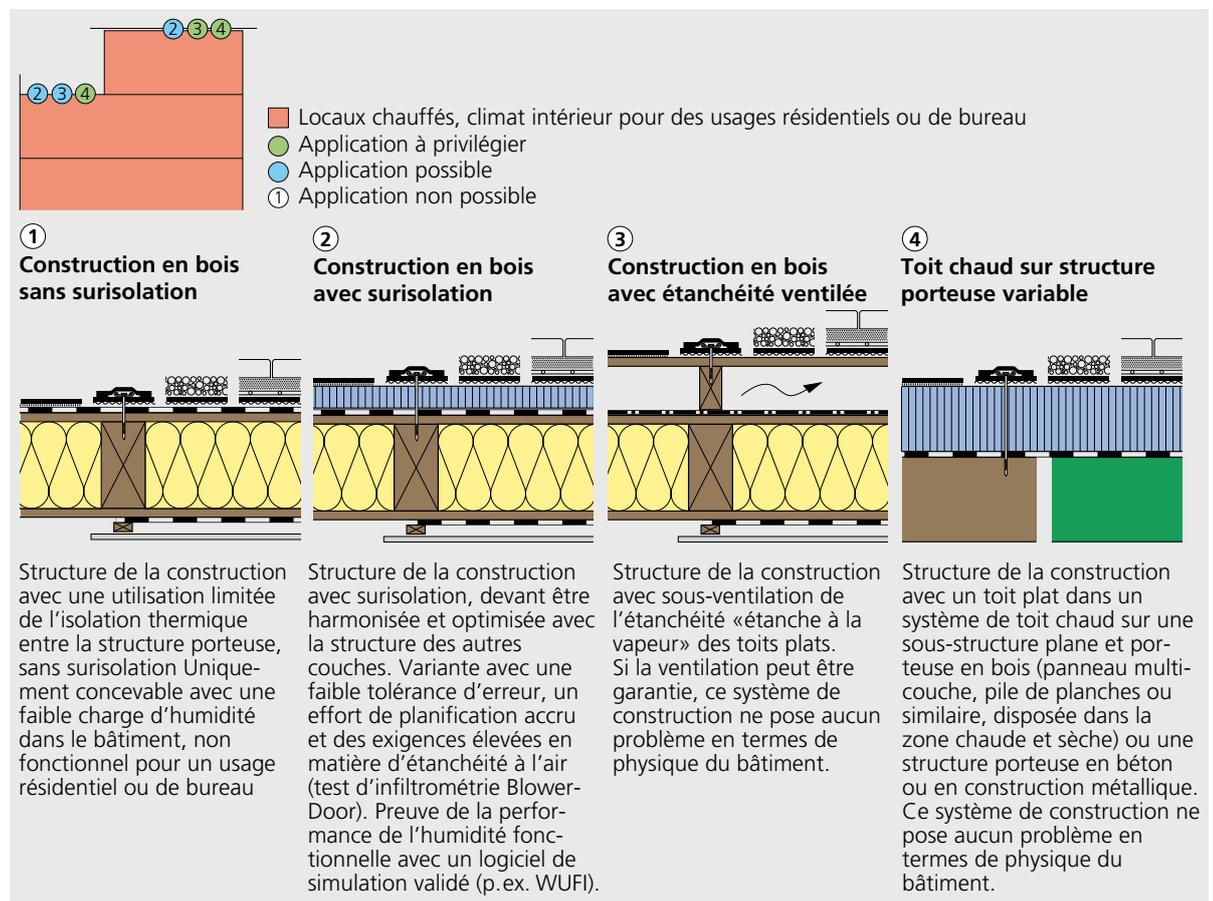
La norme SIA 271:2007 définit les règles de l'art à prendre en compte pour les toitures plates. Par ailleurs, les associations professionnelles (Enveloppe des édifices Suisse et Suissetec) ont réalisé un ouvrage spécialisé, axé sur la pratique pour la planification et la mise en œuvre.

Les toitures plates sont des toits avec peu ou pas de pente et comportant une étanchéité sans joints. La toiture chaude (système 4 de l'illustr. 3.8), en particulier, convient parfaitement en tant que structure hautement isolée. De nombreux matériaux d'isolation thermique peuvent être posés sous forme de plaques, en une ou plusieurs couches, sur le pare-vapeur ou l'étanchéité provisoire.

Lorsque l'on recherche des solutions avec une structure minimale pour des terrasses en attique, on a également recours aux isolations sous vide (Vacuum Insulated Panels VIP) par exemple. Un panneau VIP de 50 mm permet déjà d'atteindre une bonne valeur U d'environ 0,14 W/(m²K). Une iso-

lation plus épaisse garantit cependant une isolation plus économique: une valeur U de 0,14 W/(m²K) peut également être obtenue avec des plaques PUR-Alu de 120 mm d'épaisseur ($\lambda_D = 0,018$ W/mK) par exemple. Si des couches d'isolation thermique en plaques de laine de roche sont requises, elles doivent présenter une résistance suffisante à la pression, ce qui a des conséquences sur leur perméabilité thermique. Les plaques de laine de roche utilisées pour les toits plats non accessibles présentent des valeurs λ_D de 0,038 W/mK celles destinées aux toits plats accessibles possèdent des valeurs λ_D de 0,045 W/mK. Les valeurs U de 0,14 W/(m²K) exigent des plaques de laine de roche de 260 mm à 310 mm d'épaisseur environ. Suivant les performances de l'isolation thermique, les toitures chaudes hautement isolées requièrent donc des couches d'isolation thermique de 50 à 310 mm d'épaisseur. Lors de l'agencement de l'isolation thermique tout simplement entre la structure porteuse, on opte exclusivement pour une

Illustration 3.8:
Système de construction pour toits plats avec une construction en bois et sur une structure porteuse en béton/acier. La fonctionnalité technique de l'humidité des variantes de construction en bois 1 et 2 doit tenir compte des effets dynamiques, p. ex. au moyen du «WUFI»; la variante 1 n'est toutefois possible qu'avec de faibles charges d'humidité.



construction avec aération de l'étanchéité à la vapeur (système 3 de l'illustr. 3.8). Pour une proportion de bois habituelle de 16 %, il faut se baser sur une hauteur de poutrage ou une épaisseur d'isolation thermique d'environ 310 à 340 mm (plaque de laine minérale avec $\lambda_D = 0,032 \text{ W/m K}$ ou cellulose avec $\lambda_D = 0,038 \text{ W/m K}$ entre les poutres) pour atteindre une valeur U de l'ordre de $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Pour pouvoir se passer d'une aération de l'étanchéité, la construction en bois isolée entre les poutres doit être suffisamment surisolée (système 2 de l'illustr. 3.8). On a également recours à des matériaux d'isolation thermique de hautes performances pour la surisolation. Lorsque la construction est surisolée avec une couche d'isolation thermique de 60 mm d'épaisseur dotée d'une valeur λ_D de $0,027 \text{ W/m K}$ (p. ex. voile PUR), la couche d'isolation thermique entre les poutres doit être comprise entre 180 et 210 mm environ afin d'atteindre une valeur U de l'ordre de $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (proportion de bois 16 %, perméabilité thermique λ_D $0,032$ ou $0,038 \text{ W/m K}$).

Le cas particulier de la toiture inversée

Dans les toitures inversées, l'isolation thermique «insensible à l'humidité» constituée de plaques en mousse rigide de polystyrène extrudé (XPS) est posée par-dessus l'étanchéité. Cela présente deux avantages: d'une part, celui de pouvoir installer l'étanchéité directement sur la sous-structure et de supprimer le pare-vapeur ou l'étanchéité provisoire. D'autre part, l'étanchéité est ainsi protégée des influences thermiques et mécaniques.

Selon le système, l'eau pluviale s'écoule sur l'étanchéité dans le système d'évacuation d'eau du toit et extrait la chaleur de la sous-structure, ce qui augmente parfois la transmission thermique. Selon l'évaluation, la norme applicable et l'emplacement du bâtiment (la pluviosité), il résulte de très fortes majorations du flux de chaleur DU, qui ne permettent pas d'obtenir des toitures inversées traditionnelles hautement isolées.

Les isolations thermiques en XPS pour les toitures inversées hautement isolées disposent donc d'une couche de séparation

drainante entre la plaque en XPS et la couche de protection/d'usure, la majoration DU devenant ainsi le coefficient de transmission thermique de $0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (exiger un certificat de test pour la couche de séparation drainante).

Bien que les études des fabricants de matériaux isolants (DOW) indiquent qu'une pose d'isolation thermique en double couche soit possible, la norme SIA 271 ne le permet pas. De même, l'expérience pratique en Suisse n'admet qu'une seule couche. Des panneaux en XPS suffisamment épais pour les toitures inversées hautement isolées sont donc disponibles.

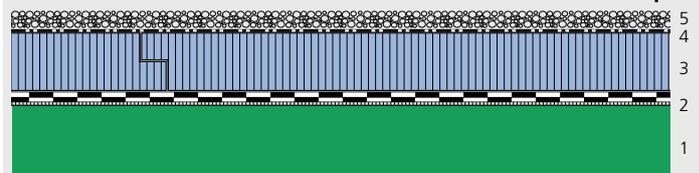
Il existe également une isolation thermique posée dans le système de toiture inversée, adaptée à l'amélioration thermique des toits plats existants encore intacts. On parle alors d'une toiture Plus. Outre les contraintes de raccordement (p. ex. hauteurs des relevés), il s'agit aussi de tenir compte de la contrainte mécanique sur l'étanchéité pendant l'exécution de l'isolation supplémentaire. Dans tous les cas, il est pertinent de renforcer l'étanchéité.

Influence de la couche utile végétalisée

L'utilisation de couches de protection et d'usure disposées sur l'étanchéité comme résistance à la perméabilité thermique n'est pas courante. S'il existe des études sur le comportement des toitures végétalisées en hiver, on ne peut en déduire aucun effet transposable sur la valeur U. La contribution des toitures végétalisées à la protection thermique en été est, toutefois, incontestable.

Illustration 3.9: L'isolation thermique en XPS doit être posée en une seule couche sur le toit inversé. Un toit plat à haute isolation thermique ne peut être réalisé qu'avec une couche de séparation drainant l'eau, ce qui signifie qu'un supplément de valeur ΔU n'est pas nécessaire.

Toit réversible, monocouche, avec couche de séparation drainant l'eau: convient aux toits réversibles à haute isolation thermique



- 1 Couche de fond/structure porteuse
- 2 Étanchéité
- 3 Panneau XPS avec feutre étagé, déposé en une couche
- 4 Couche de séparation hydrophobe
- 5 Couche de poids de gravier rond

Toiture inclinée

La norme SIA 232/1:2011 définit les règles de l'art à prendre en compte pour les toitures inclinées. Par ailleurs, les associations professionnelles (Enveloppe des édifices Suisse et Suissetec) ont réalisé un ouvrage spécialisé, axé sur la pratique pour la planification et la mise en œuvre.

Sont considérées comme toitures inclinées les toitures présentant une pente permettant une couverture par chevauchement ou à joint debout. Les toitures inclinées peuvent également être végétalisées. Dans ce cas, leur conception doit alors être identique à celle des toitures plates, du point de vue de la fonction de l'étanchéité.

Le système le plus courant est la version 1 du toit simplement ventilé (Illustr. 3.10) avec couches d'isolation thermique entre et sur les chevrons. On utilise généralement des panneaux en fibres de bois dotés d'une perméabilité thermique λ_D de 0,039 W/mK p.ex. pour la surisolation. Pour pouvoir at-

teindre une valeur U de 0,14 W/(m²K) avec un panneau en fibres de bois de 100 mm d'épaisseur, la couche d'isolation thermique entre les chevrons doit mesurer environ 180 et 200 mm d'épaisseur (proportion de bois 16 %, perméabilité thermique λ_D 0,032 ou 0,038 W/mK).

Remarque concernant la protection contre l'humidité

Les toitures à isolation thermique doivent toujours disposer d'une sous-toiture au-dessus de l'isolation thermique. Suivant la pente du toit et la couverture, il faut faire la distinction entre les sous-toitures destinées à subir des contraintes normales, accrues et exceptionnelles. Ces sous-toitures sont perméables à la vapeur ce qui évite les problèmes techniques de diffusion de la vapeur. Cependant, sur la sous-toiture, en cas d'écoulement d'eau permanent dû à une faible pente et à une étanchéité insuffisante de la couverture, il

Illustration 3.10: Systèmes de construction pour toitures inclinées dans les structures en bois. La pose de supports en béton armé (p.ex. pour les nuisances sonores importantes) ou en tôle profilée (pour les structures en acier) est également possible.

| Toits inclinés | Construction en bois | | | |
|--|--|--|---|--|
| Ventilation simple Ventilation transversale, entre le sous-toit et la couverture | Variante 1 – Pare-vapeur/étanchéité à l'air au-dessus de la tête – Couche d'isolation entre et au-dessus de la structure porteuse | Variante 2 – Élément de toit avec lattage étanche à l'air – Couche d'isolation entre la structure porteuse | Variante 3 – Pare-vapeur/étanchéité à l'air sur la couche de fond – Couche d'isolation thermique sur la structure porteuse | Variante 4 – analogue à la Variante 3 avec panneau de bois massif entre autres comme élément porteur |
| | | | | |
| Ventilation double Ventilation transversale entre l'isolation thermique et le sous-toit et entre le sous-toit et la couverture | Variante 1 – Couche d'isolation entre et au-dessous de la structure porteuse | Variante 2 – Couche d'isolation entre la structure porteuse | | |
| | | | | |
| Légende | 1 Couverture 2 Ventilation transversale 3 Sous-structure (lattage/contre-lattage du toit) 4 Sous-toiture 5 Coffrage/couche de fond | 6 Isolation thermique 7 Isolation thermique résistante aux pas 8 Pare-vapeur/étanchéité à l'air 9 Structure porteuse 10 Lattage/niveau des installations | 11 Coffrage étanche à l'air 12 Revêtement de plafond | |

convient d'installer une étanchéité spéciale (étanchéité pour toit plat avec lés d'étanchéité selon la norme SIA 271). Ces étanchéités pour toit plat ne sont pas perméables à la vapeur, les répercussions sur la fonctionnalité de la construction en matière de physique du bâtiment doivent donc être prises en compte (voir également Illustr. 3.8).

Murs extérieurs

Les murs extérieurs marquent l'aspect architectural extérieur d'un bâtiment, par leur matérialisation (texture, couleur), leur ouverture et leur formation au niveau des interfaces (socle, ouvertures, toiture; Illustr. 3.12). Les murs extérieurs enveloppent et protègent les locaux des influences telles que:

- les différences de température (protection thermique),
- l'humidité (pluie, pluie battante, diffusion de la vapeur, condensat),

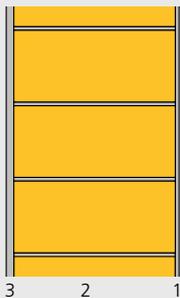
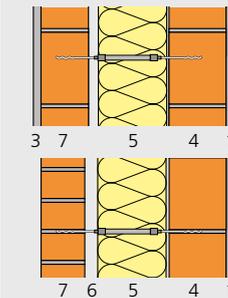
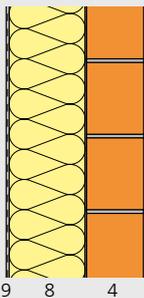
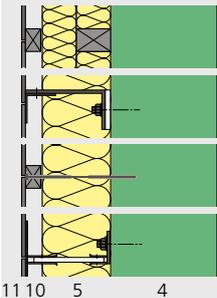
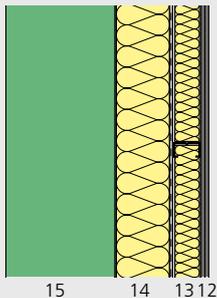
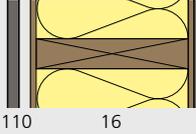
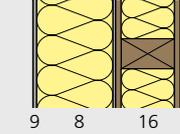
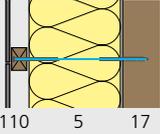
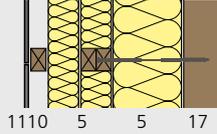
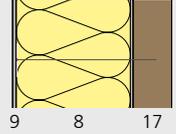
- le bruit (bruit extérieur) et
- le feu (protection contre l'incendie).

En règle générale, faisant partie intégrante de la structure porteuse d'un bâtiment, les murs extérieurs doivent supporter les charges et les forces et avoir une action stabilisatrice (sécurité sismique). Lors de l'étude du projet, le choix du mur extérieur représente une étape importante en raison de la multitude d'exigences et de possibilités.

Typologies des murs extérieurs

L'Illustration 3.11 présente un aperçu des principaux critères de décision lors du choix des murs extérieurs. Outre les critères représentés, il faut distinguer les murs extérieurs porteurs des murs extérieurs non porteurs (p.ex. dans les constructions hybrides). La construction métallique ou la construction de façades (p.ex. façades devant des bâtiments à ossature) n'est pas abordée.

Illustration 3.11: Typologies des murs extérieurs, sans préention à l'exhaustivité

| Constr. massive | à une paroi | Maçonnerie à deux parois | Système de réseau de chauffage à distance | Revêtement de façade ventilé | Isolation thermique intérieure |
|-----------------------------|---|---|--|--|---|
| | – Maçonnerie simple avec briques, pierres en béton cellulaire entre autres – Valeur U jusqu'à environ 0,14 W/m ² ·K  | – Crépie ou avec maçonnerie apparente  | – Avec panneau EPS ou en laine minérale, ou avec d'autres isolants appropriés  | – Optimal avec sous-structure exempte de ponts thermiques – Possibilités infinies concernant le revêtement de façade, jusqu'aux éléments PV  | – En règle générale, exclusivement pour les constructions en béton apparent – Pertes prévisibles par ponts thermiques plutôt élevés  |
| Construction en bois | Construction à ossature bois – Avec revêtement de façade ventilé – Possibilité de crépi, avec système de réseau de chauffage à distance ou panneau porteur en crépi ventilé  |  | Construction en bois massif – Avec revêtement de façade ventilé – Possibilité de crépi, avec système de réseau de chauffage à distance ou panneau porteur en crépi ventilé  |  |  |
| Légende | 1 Crépi intérieur 2 Maçonnerie simple isolante 3 Crépi extérieur 4 Maçonnerie/béton (base d'ancrage) 5 Couche d'isolation thermique 6 Cavité d'air/niveau de drainage | 7 Maçonnerie/maçonnerie apparente 8 Couche d'isolation thermique collée 9 Crépi extérieur avec armature en textile 10 Sous-structure/ventilation 11 Revêtement de façade 12 Placoplâtre ou de fibres de plâtre | 13 Profil C isolé/cavité d'installation 14 Couche d'isolation thermique (p.ex. XPS), sur toute la surface, sans cavités collé, avec crépi de fond (étanchéité à l'air) 15 Béton apparent 16 Cadre de bois, latté et isolé des deux côtés 17 Plaque de bois massif | | |

Mur à paroi simple, homogène (maçonnerie monolithique)

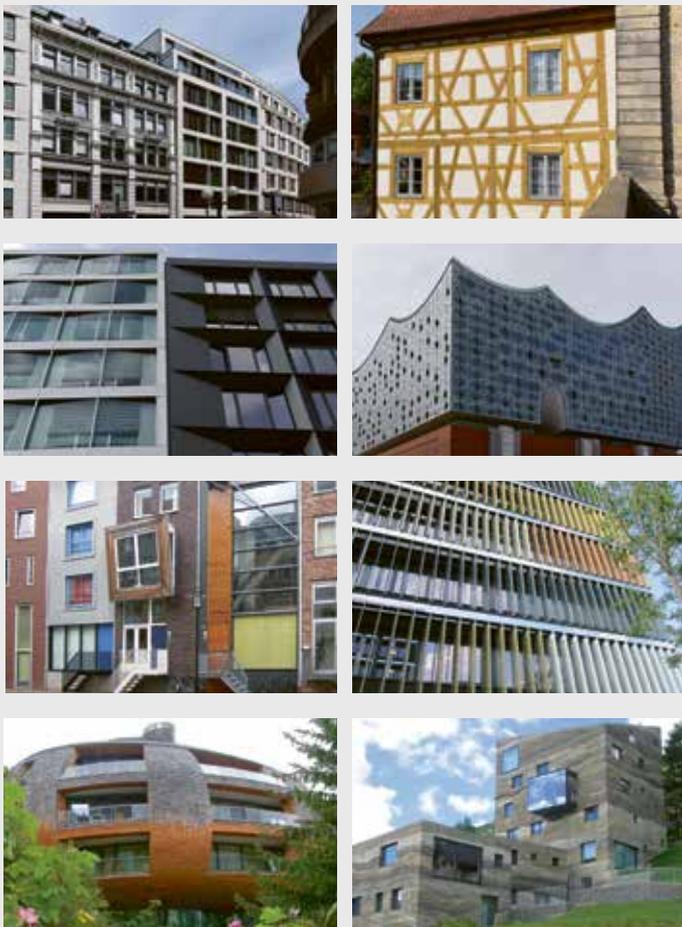
La section transversale porteuse et isolante d'un mur extérieur homogène est, si possible, entièrement composée du même matériau microporeux (p.ex. briques en terre cuite ou béton cellulaire) et est enduite à l'intérieur et à l'extérieur. Malgré une porosité élevée (bonne propriété d'isolation thermique) et, dans certains cas, des matériaux d'isolation thermique dans les cavités (la section transversale ne peut alors plus vraiment être désignée comme homogène), ces systèmes de mur présentent des épaisseurs de mur importantes pouvant aller jusqu'à 50 cm, ce qui permet, dans le meilleur des cas, d'obtenir des valeurs U de l'ordre de 0,14 W/(m² K) (Illustr. 3.13). Un enduit isolant permet également d'améliorer la protection thermique. Une optimisation de la protection thermique par l'ajout d'une isolation thermique extérieure (enduit ou avec habillage

Illustration 3.12: Par leur matérialisation, les murs extérieurs sont essentiels pour les multiples caractéristiques architecturales d'un bâtiment.

ventilé) n'est, en revanche, guère judicieuse. Il est donc préférable, pour un mur porteur, d'opter pour une surisolation par l'extérieur, l'enduit ou l'habillage ventilé. Il convient d'accorder une attention particulière à la répartition des charges et à l'ouverture de la façade. Par exemple, lorsque, pour des raisons statiques, des murs de refend en béton sont nécessaires à cause de la présence de grandes baies vitrées, le mur extérieur homogène se transforme en une construction mixte hétérogène comportant des détails difficiles à résoudre.

Ces murs extérieurs engendrant parfois des transmissions indirectes des bruits vraiment élevées, il n'est pas toujours possible de respecter les exigences strictes en matière de protection contre les bruits aériens imposées aux parois de séparation des logements et aux planchers.

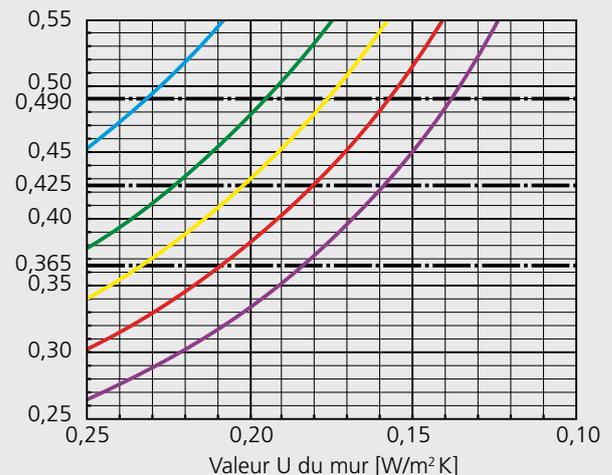
Illustration 3.13: Sans surisolation supplémentaire, une isolation thermique jusqu'à U = 0,14 (W/m² K) peut être obtenue avec une maçonnerie simple.



Maçonnerie simple isolante

| | λ [W/m K] |
|--|-------------------|
| 1 Crépi intérieur 10 mm | 0,70 |
| 2 Briques, béton cellulaire entre autres | variable |
| 3 Crépi de fond léger 20 mm | 0,30 |

Épaisseur de la maçonnerie simple [m]



Maçonnerie simple avec:

- $\lambda_D = 0,07$ W/m K
 - $\lambda_D = 0,08$ W/m K
 - $\lambda_D = 0,09$ W/m K
 - $\lambda_D = 0,10$ W/m K
 - $\lambda_D = 0,12$ W/m K
- } Briques isolantes et pierres en béton cellulaire
- épaisseurs de maçonnerie usuelles

Mur à double paroi apparent ou enduit

Le mur à double paroi se compose:

- d'un mur porteur intérieur,
- d'un mur protecteur extérieur et
- d'une couche d'isolation thermique disposée entre les deux.

La possibilité de la pose continue d'une couche d'isolation thermique bien protégée garantit une construction de mur extérieur totalement dépourvue de ponts thermiques. L'influence des pièces d'ancrage des deux parois est faible et négligeable. Outre la construction avec briques en terre cuite décrite dans l'illustration 3.14, d'autres maçonneries sont possibles, comme les briques silico-calcaires par exemple.

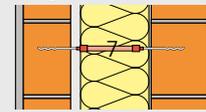
En pratique, le mur porteur intérieur en briques silico-calcaires mesure de 125 à 175 mm d'épaisseur, selon les exigences statiques. Par ailleurs, un voile en béton armé peut éventuellement être nécessaire (sécurité structurale). Avec des pièces d'ancrage pour deux parois standard, l'écart maximal des parois est d'environ 290 mm; une couche d'isolation thermique de plus de 280 mm d'épaisseur (mur enduit) ou 260 mm (mur apparent) est donc difficilement réalisable sur le plan de la technique du bâtiment.

La couche d'isolation thermique est installée sous forme de panneaux. Il est préférable de la fixer mécaniquement sur la paroi porteuse. Pour les parois extérieures en maçonnerie apparente, il convient de respecter un écart (espace d'air) de 2 à 3 cm entre la couche d'isolation thermique et le mur extérieur afin d'éviter tout contact entre les infiltrations d'eau et la couche d'isolation thermique; on ne peut toutefois pas parler d'espace ventilé.

Selon les conditions climatiques et le matériau d'isolation thermique, un pare-vapeur est éventuellement nécessaire, lequel est déjà appliqué sur la couche d'isolation thermique par exemple. L'appui des fenêtres doit être réalisé sur la paroi porteuse intérieure.

Illustration 3.14:
Maçonnerie à deux parois crépie ou maçonnerie apparente.

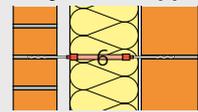
Maçonnerie à deux parois



6 5 4 3 2 1

| | λ [W/mK] |
|---|--------------------|
| 1 Crépi intérieur 10 mm | 0,70 |
| 2 Maçonnerie en brique 150 mm | 0,35 |
| 3 Couche d'isolation thermique variable | variable |
| 4 Cavité d'air 10 à 20 mm | non pris en compte |
| 5 Maçonnerie en brique 125 mm | 0,35 |
| 6 Crépi extérieur 20 mm | 0,87 |
| 7 Ancrage pour deux parois | |
| – environ 0,7 pièce par m ² de mur extérieur | |
| – Pertes par ponts thermiques χ env. 0,003 W/K | |

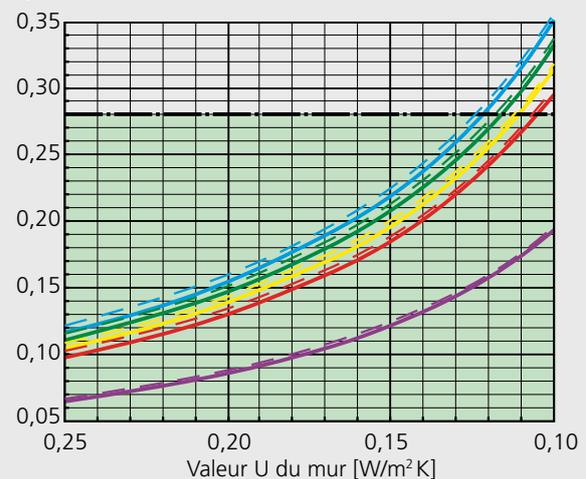
Maçonnerie apparente à deux coques



5 4 3 2 1

| | λ [W/mK] |
|---|--------------------|
| 1 Crépi intérieur 10 mm | 0,70 |
| 2 Maçonnerie en brique 150 mm | 0,35 |
| 3 Couche d'isolation thermique variable | variable |
| 4 Cavité d'air env. 30 mm | non pris en compte |
| 5 Maçonnerie apparente 115 mm | 1,80 |
| 6 Ancrage pour deux parois | |
| – environ 0,7 pièce par m ² de mur extérieur | |
| – Pertes par ponts thermiques χ env. 0,003 W/K | |

Épaisseur de la couche d'isolation [m]



Couche d'isolation thermique avec:

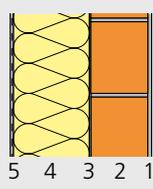
- $\lambda_d = 0,021$ W/m K
- $\lambda_d = 0,032$ W/m K
- $\lambda_d = 0,034$ W/m K
- $\lambda_d = 0,036$ W/m K
- $\lambda_d = 0,038$ W/m K
- — — — — Domaine limite au niveau de la construction (ancrage pour deux parois ou similaire)
- Couche d'isolation thermique à une couche possible, selon l'isolation thermique

Isolation thermique extérieure enduite (VAWD)

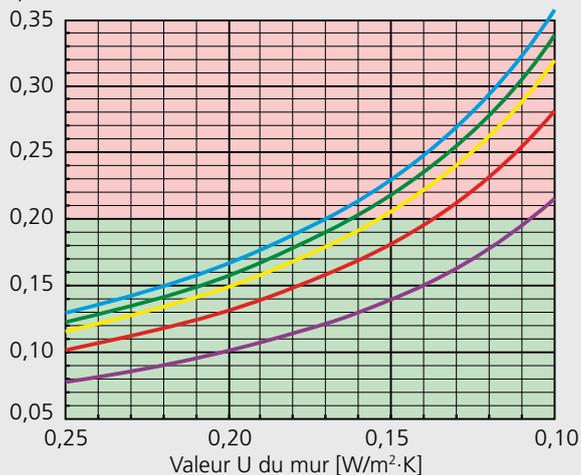
Dans le cas de cette construction de mur extérieur, l'isolation thermique est collée sur un support porteur et éventuellement fixée de manière mécanique. Dans les constructions massives, le support peut être en béton armé, en briques en terre cuite (Illustr. 3.15) ou en briques silico-calcaires. De même, dans les constructions en bois, p. ex. dans une construction à ossature bois, il est possible d'appliquer des isolations thermiques extérieures enduites sur un revêtement extérieur en panneaux de bois aggloméré ou sur un mur porteur en bois massif. L'isolation thermique extérieure enduite est le système le plus rentable pour les murs extérieurs hautement isolés. La planification et la réalisation doivent intervenir dans le respect de la norme SIA 243:2008 et des directives du système afin d'éviter les dom-

Illustration 3.15: Isolation thermique extérieure crépie (VAWD) sur mur de briques. La fixation mécanique de la couche d'isolation thermique n'est généralement pas nécessaire. Les spécifications d'épaisseur pour atteindre les valeurs U ne tiennent pas compte des pertes par ponts thermiques pour les éventuels éléments de fixation.

Isolation thermique extérieure crépie (façade compacte)

| | | |
|--|---|------------------------|
|  | 1 Crépi intérieur 10 mm | λ [W/m·K] 0,70 |
| | 2 Maçonnerie en brique 150 mm | 0,35 |
| | 3 Mortier adhésif 4 mm | 0,90 |
| | 4 Couche d'isolation thermique | variable |
| | 5 Mortier d'enrobage/crépi extérieur 8 mm | 0,90 |

Épaisseur de la couche d'isolation [m]



Couche d'isolation thermique avec:

— $\lambda_D = 0,023$ W/m K

— $\lambda_D = 0,030$ W/m K

— $\lambda_D = 0,034$ W/m K

— $\lambda_D = 0,036$ W/m K

— $\lambda_D = 0,038$ W/m K

■ Couche d'isolation thermique à une couche possible, selon l'isolation thermique

■ Couche d'isolation thermique, plusieurs couches requises ou avantageuses

mages de construction. Des mesures de protection contre les intempéries, telles que des auvents, des appuis de fenêtre, des revêtements etc., permettent de réduire les charges d'humidité et la formation d'algues et de prolonger la durée d'utilisation des isolations thermiques extérieures enduites. Dans la zone du socle, il faut aussi tenir compte des contraintes accrues en utilisant des matériaux adaptés (p. ex. panneaux en XPS au lieu de panneaux en EPS) et en prenant des mesures de protection.

Isolation thermique extérieure avec habillage ventilé

La norme SIA 232/2:2011 définit les règles de l'art à prendre en compte pour les habillages ventilés. Par ailleurs, les associations professionnelles (Enveloppe des édifices Suisse, Suissetec et l'Association professionnelle suisse des façades ventilées) ont réalisé un ouvrage spécialisé, axé sur la pratique pour la planification et la mise en œuvre.

Ce système de mur extérieur ne pose aucun problème sur le plan de la physique du bâtiment et présente une protection élevée contre les dommages de construction. Les coûts liés à la planification, à la technique d'exécution et, par conséquent, les coûts financiers dépendent essentiellement du choix du matériau d'habillage. L'habillage ventilé détermine l'aspect esthétique de la façade et est décisif pour l'architecture du bâtiment. Il est donc légitime que l'habillage de la façade soit choisi assez tôt dans le projet et qu'il soit considéré comme une contrainte irrévocable. Les décisions suivantes relatives à l'habillage ont une influence considérable sur la formation structurelle du mur extérieur:

- poids de l'habillage
- habillage fermé ou ouvert
- exigence en matière de planéité
- possibilité d'apports énergétiques solaires actifs, principalement grâce au photovoltaïque

Les facteurs agissant essentiellement sur la protection thermique sont les suivants:

- l'épaisseur et la perméabilité thermique de la couche d'isolation thermique,

- les déperditions par ponts thermiques à travers la sous-structure et
- la résistance thermique de la base d'ancrage, avec effets sur les déperditions par ponts thermiques de la sous-structure.

Il est souvent difficile de respecter les exigences parfois élevées en matière de protection thermique avec des sous-structures métalliques, en raison des ponts thermiques locaux, qui selon la valeur U à atteindre peuvent encore être trop élevés même avec l'utilisation du système «Thermostop» (Illustr. 3.5).

Des sous-structures en bois, des boulons filetés ou des sous-structures dépourvues de ponts thermiques engendrant des déperditions par ponts thermiques modérées, voire nulles permettent de réaliser des murs extérieurs hautement isolés avec habillage ventilé.

Isolation thermique intérieure

Dans les constructions nouvelles, l'isolation thermique intérieure est presque exclusivement utilisée dans les ouvrages en béton apparent, ce qui est plutôt problématique sur le plan de la physique du bâtiment. La couche d'isolation thermique à l'intérieur prend la forme soit d'un enduit, soit d'un habillage, soit d'un mur de protection (Illustr. 3.16). Avec un mur en béton d'environ 25 cm d'épaisseur, la couche la plus étanche à la vapeur se trouve généralement sur le côté froid, avec les risques liés à l'absorption d'humidité que cela comporte (condensat par diffusion et par convection). La capacité de rétention thermique du mur extérieur porteur n'est pas utile pour l'espace intérieur. Des déperditions accrues par ponts thermiques sont généralement inévitables. Voici les constructions à envisager afin d'assurer une haute isolation thermique éventuellement en ajoutant une couche d'isolation intérieure:

- La dalle en béton traverse l'isolation thermique intérieure, améliorations ciblées avec des couches d'isolation thermique des zones marginales au plafond et à travers une couche d'isolation thermique et du bruit de choc plus épaisse dans le plancher.

- La dalle en béton repose entièrement sur les murs intérieurs et des piliers de soutien situés à l'intérieur devant le mur en béton brut ou l'isolation thermique. On obtient ainsi une construction quasiment dépourvue de ponts thermiques.

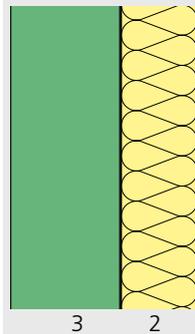
- Une isolation thermique intérieure, qui englobe complètement tous les éléments de construction d'agencement de l'espace est idéale, p. ex. pour les «bâtiments d'une seule pièce»

Murs de construction en bois

La plupart du temps, les murs extérieurs sont préfabriqués de manière industrielle dans des conditions optimales et sont souvent livrés, fenêtres comprises, sur le chantier en tant qu'éléments de grandes dimensions. Dans les constructions purement en bois, les éléments de mur extérieur sont généralement porteurs; ils ne le sont toutefois pas dans les constructions hybrides

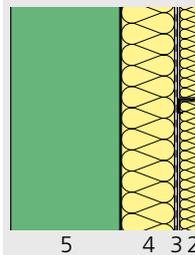
Illustration 3.16: Exemples de construction pour des murs extérieurs en béton apparent avec isolation thermique.

Isolation thermique intérieure crépie



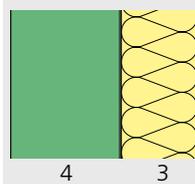
- 1 Mortier d'enrobage/crépi intérieur
 - 2 Isolation thermique collée sur toute la surface
p. ex.:
 - Dalle en béton cellulaire
 - Plaque en perlite
 - Panneau de mousse rigide en polystyrène XPS (*)
 - 3 Béton apparent
- (*) Attention aux exigences en matière de technique acoustique (p. ex., isolation du plafond au sol contre le bruit aérien) en ce qui concerne la transmission by-path via une transmission longitudinale accrue du bruit!

Isolation thermique intérieure avec revêtement du mur



- 1 Revêtement du mur, p. ex. placoplâtre
- 2 Profils C, plaque de laine minérale, cavité pour les installations
- 3 Crépi de base exécuté comme couche étanche à l'air (raccords!) Mortier d'enrobage/crépi intérieur
- 4 Isolation thermique collée sur toute la surface, p. ex. Panneau de mousse rigide en polystyrène XPS
- 5 Béton apparent

Isolation thermique intérieure avec revêtement en brique



- 1 Crépi intérieur
- 2 Revêtement en brique non porteur, p. ex.:
 - Plaques avec isolation acoustique
 - Panneaux de plâtre
- 3 Isolation thermique, p. ex.: Panneau de mousse rigide en polystyrène XPS
- 4 Béton apparent

(p. ex. éléments de mur hautement isolés avec remplissage entre dalles en béton).

À de rares exceptions près, il s'agit de constructions non homogènes dans lesquelles l'isolation thermique est disposée entre la structure porteuse (châssis en bois) ou entre les lattes en bois (Illustr. 3.17). Le fait de réduire le plus possible la proportion de bois dans le niveau d'isolation thermique permet d'obtenir le meilleur effet d'isolation thermique possible.

L'étanchéité à l'air requise est assurée soit par des revêtements de grandes dimensions, étanches à l'air côté chaleur avec joints collés, soit par l'utilisation d'un joint d'étanchéité à l'air séparé.

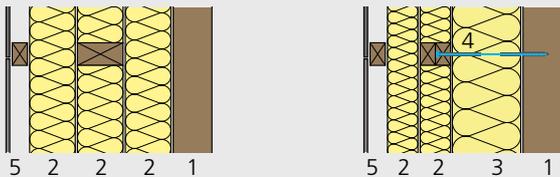
Illustration 3.17:
Exemples de construction pour les murs extérieurs en bois.

Construction à ossature bois (revêtement ventilé/crépi)



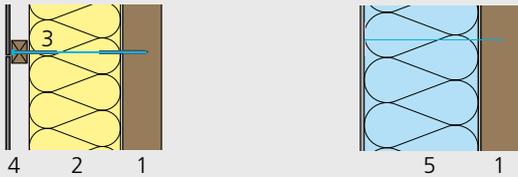
- 1 Revêtement intérieur en placoplâtre
- 2 évent. pare-vapeur/étanchéité à l'air
- 3 Coffrage-cadre avec panneau en bois
- 4 Ossature bois/couche d'isolation thermique
- 5 Coffrage-cadre avec panneau en bois
- 6 Revêtement de façade ventilé
- 7 Isolation thermique extérieure crépie

Construction en bois massif (ventilée et revêtue)



- 1 Mur en bois massif (étanche à l'air, joints collés)
- 2 Couche d'isolation thermique entre lattes
- 3 Couche d'isolation thermique
- 4 Lattis fixé avec boulon fileté
- 5 Revêtement de façade ventilé

Construction en bois massif (ventilée/revêtue)



- 1 Mur en bois massif (étanche à l'air, joints collés)
- 2 Couche d'isolation thermique
- 3 Lattis fixé avec boulon fileté
- 4 Revêtement de façade ventilé
- 5 Isolation thermique extérieure crépie

Murs en contact avec des locaux non chauffés

Les murs en contact avec des locaux non chauffés font l'objet des mêmes réflexions en matière de construction et de protection thermique que les murs extérieurs. Des valeurs U un peu plus mauvaises autour de 0,20 W/(m²K) sont envisageables.

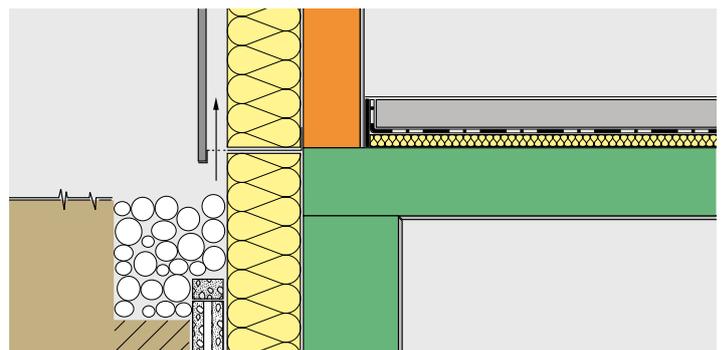
Murs en contact avec la terre

Le matériau porteur majoritairement utilisé dans le sol est le béton armé qui est protégé de l'humidité côté terre par un enduit, un rebouchage ou un film composite en béton. L'utilisation d'empierrements maillés, de plaques et de conduites de drainage (sous le joint de chantier dalle/mur extérieur) garantit un drainage extérieur permettant d'éviter la formation d'eau sous pression (concept d'évacuation). Dans les locaux chauffés au sous-sol, il est toujours nécessaire d'employer une couche d'isolation thermique pour assurer une protection thermique suffisante malgré l'action isolante de la terre (Illustr. 3.6).

Isolation extérieure ou périphérique

À l'instar des toits plats dans le système de toiture inversée, on isole également les murs extérieurs enterrés avec des mousses synthétiques insensibles à l'humidité (mousse rigide de polystyrène extrudé) ou avec du verre cellulaire sur le côté extérieur. L'isolation extérieure peut être prolongée au-dessus du sol (enduit ou avec revêtement de façade ventilé) avec une isolation périphérique (Illustr. 3.18).

Illustration 3.18:
Isolation périphérique dans le prolongement d'une isolation extérieure crépie ou avec un revêtement ventilé.



étant généralement formée en béton armé. La couche d'isolation thermique peut donc aussi être posée dans la zone du socle (interface avec le mur extérieur en contact avec l'extérieur) (Illustr. 3.19).

Isolation thermique intérieure

L'isolation thermique intérieure applicable aux murs extérieurs enterrés est, en principe, identique à celle du mur extérieur au-dessus du sol. La couche d'isolation thermique est placée du côté le moins avantageux sur le plan de la physique du bâtiment. Des points faibles en matière d'isolation thermique sont généralement inévitables au niveau des appuis de dalle (raccord de socle) et des murs intérieurs. Ce système est néanmoins justifié lorsque seuls certains locaux au sous-sol sont chauffés et thermiquement isolés.

Protection du bâtiment contre la chaleur et l'humidité

Pour pouvoir utiliser des locaux au sous-sol en contact avec la terre comme locaux de cave ou de stockage, une protection du bâtiment contre la chaleur et l'humidité, par exemple avec une isolation périphérique d'env. 8 cm d'épaisseur, est une solution pertinente. Les locaux non chauffés au sous-sol peuvent alors éventuellement être intégrés dans l'enveloppe thermique du bâtiment (Chapitre 3.2 «Considérations conceptuelles»).

dessous et par rapport à l'extérieur. La couche d'isolation thermique peut être disposée au-dessus, en dessous ou entre (plafond à poutres en bois) la structure porteuse, des combinaisons sont également possibles. En cas de chauffage au sol, une partie de la couche d'isolation thermique doit être placée sur la structure porteuse.

Constructions avec dalles en béton

Le choix du type d'isolation thermique pour les sols dépend essentiellement de réflexions approfondies sur la suppression des déperditions par ponts thermiques (Illustr. 3.20). Dans les situations avec beaucoup de murs au-dessus de la dalle en béton (construction à murs de refend porteurs) et peu de murs sous la dalle en béton (p. ex. linteaux dans des parkings souterrains), assurer une isolation thermique sous la dalle en béton est une solution efficace. En revanche, lorsqu'une construction en bois est réalisée sur une dalle en béton, les déperditions par ponts thermiques sont généralement réduites au minimum lorsque toute l'isolation thermique est disposée au-dessus de la dalle en béton et est ainsi raccordée à la construction en bois isolante.

Illustration 3.20: Construction de plancher au-dessus de l'air extérieur et des locaux non chauffés avec une disposition différente de la couche d'isolation thermique et des mesures pour assurer l'isolation aux bruits de choc.

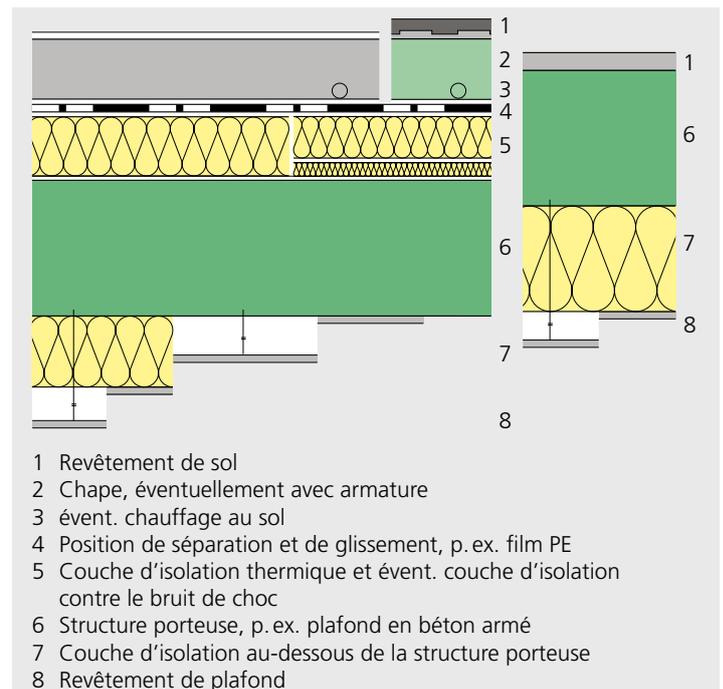
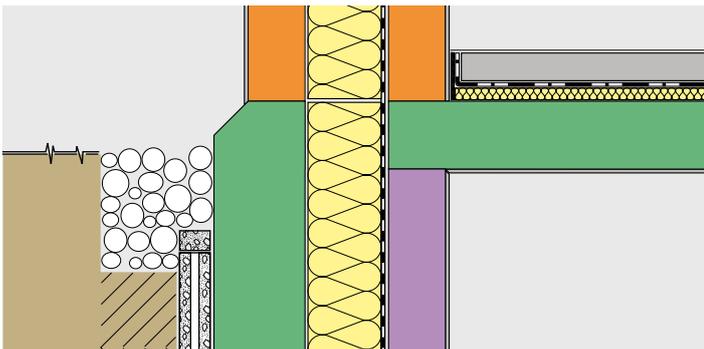


Illustration 3.19: Maçonnerie à deux parois dans le sol dans le prolongement d'une maçonnerie apparente à deux parois.



Planchers au-dessus du climat extérieur et de locaux non chauffés

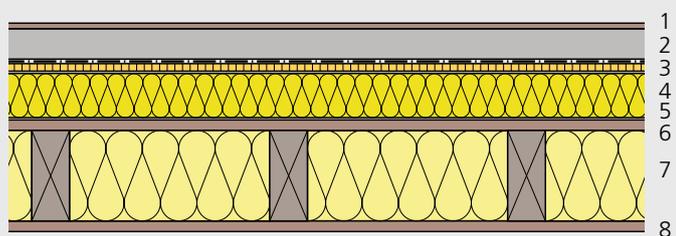
Les constructions de plancher limitent le flux de chaleur du haut vers le bas. Elles délimitent les locaux chauffés par rapport aux locaux non chauffés se trouvant en

Des chauffages de surface peuvent être intégrés dans les constructions de plancher avec chapes flottantes. Les couches d'isolation thermique au-dessus ou au-dessous de la structure porteuse permettent à la construction de plancher d'être conforme au concept d'isolation thermique et aux exigences de la valeur U. La protection contre les bruits de choc demandée est garantie par l'ajout de couches de protection contre les bruits de choc et l'utilisation de revêtements de sol isolants contre les bruits de choc.

Les constructions de plancher sans chapes flottantes doivent être adaptées aux exigences en matière de protection thermique en appliquant des couches d'isolation thermique sous la structure porteuse et, si nécessaire, aux exigences en matière de protection contre les bruits de choc par le biais de revêtements de sol isolants contre les bruits de choc.

Selon la perméabilité thermique des couches d'isolation thermique et de protection contre le bruit de choc, il faut prévoir des couches entre env. 10 et 16 cm d'épaisseur pour atteindre une valeur de $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ contre les locaux non chauffés. Des couches d'isolation thermique et de protection contre le bruit de choc entre env. 12 et 22 cm d'épaisseur sont requises pour une protection thermique avec une valeur U de $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ pour les planchers au-dessus du climat extérieur.

Illustration 3.21:
Construction de plancher au-dessus de l'angle des poutres en bois, avec une couche d'isolation thermique entre les poutres en bois et des couches d'isolation thermique et de bruit de choc variables au-dessus du plafond de poutres en bois, en fonction des exigences d'isolation thermique et de bruit de choc.



- 1 Revêtement de sol
- 2 Chape
- 3 Position de séparation et de glissement
- 4 Couche d'isolation contre le bruit de choc au min. 0,02 m
- 5 Couche d'isolation thermique
- 6 Plaque à 3 couches ou similaire
- 7 Bois massif ou lamellé-collé, couche d'isolation thermique au milieu
- 8 Plaque à 3 couches ou similaire

Construction avec poutres en bois

En raison de la perméabilité thermique accrue par le manque d'homogénéité du bois et de l'isolation thermique, il est efficace, pour ces constructions, de choisir une couche d'isolation thermique entre les poutres en bois uniquement de l'épaisseur prescrite par la hauteur statique requise. Le reste de la couche d'isolation thermique et de protection contre le bruit de choc est disposé, de préférence, au-dessus de la structure porteuse dans le plancher, car ces couches présentent des perméabilités thermiques nettement meilleures que l'isolation thermique entre les poutres (Illustr. 3.21). En tenant compte d'une couche d'isolation thermique de 24 cm d'épaisseur (isolation thermique λ_D $0,035 \text{ W}/\text{m K}$; proportion de bois 16 %) entre les poutres, on obtient déjà une valeur U de $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ sans isolation supplémentaire. Des couches d'isolation thermique et de protection contre le bruit de choc entre env. 4 et 5 cm d'épaisseur env. sont requises pour une protection thermique avec valeur U de $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ pour les planchers au-dessus du climat extérieur.

Planchers au-dessus de la terre

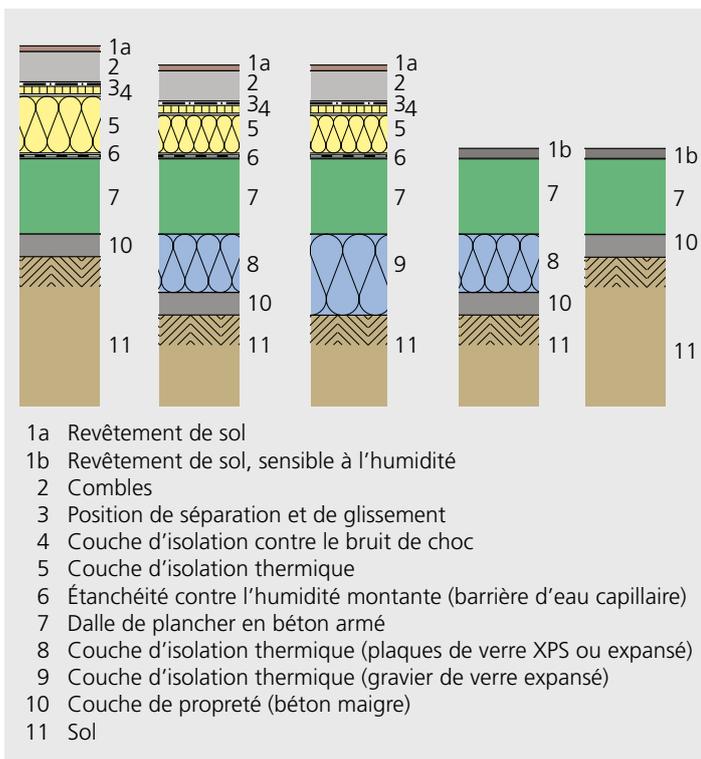
Lorsque les surfaces de plancher sont très importantes, on peut obtenir une protection thermique suffisante éventuellement sans avoir recours à une isolation thermique, en raison de l'action isolante de la terre. La non-isolation du plancher au-dessus de la terre est particulièrement judicieuse lorsque le plancher, en tant que partie de l'enveloppe thermique du bâtiment, sépare les locaux non chauffés (cave, réserve, installations techniques) de la terre. Investir dans l'isolation thermique n'aurait alors un impact que sur la preuve par le calcul de la protection thermique suffisante, mais pas sur les déperditions de chaleur lors de l'exploitation (seul le plancher au-dessus du local non chauffé est alors pertinent).

Dans le cas des planchers au-dessus du sol, l'isolation thermique peut être disposée au-dessus ou au-dessous de la dalle en béton ou bien combinée, une partie au-dessus, une partie en dessous (Illustr. 3.22).

Lorsque le mur extérieur est pourvu d'une isolation extérieure ou périphérique et que le bâtiment n'est pas enterré profondément, il est judicieux de disposer au moins une partie de l'isolation thermique sous la dalle. Ceci pour, d'une part, réduire les déperditions par ponts thermiques au-dessus du «socle» et, d'autre part, garantir des températures de surface côté habitat suffisamment élevées (suppression des dégradations dues à l'humidité ou de la formation de moisissures).

En cas de chauffage au sol et d'exigences en matière de protection contre le bruit de choc (transmission indirecte du bruit de choc), il convient de disposer au moins une partie de l'isolation thermique ou de la protection contre le bruit de choc au-dessus de la dalle.

Illustration 3.22:
Construction du plancher au-dessus du sol, avec une disposition différente des couches d'isolation thermique et des bruits d'impact au-dessus et au-dessous de la dalle de béton, en fonction des exigences d'isolation thermique et des bruits de choc.



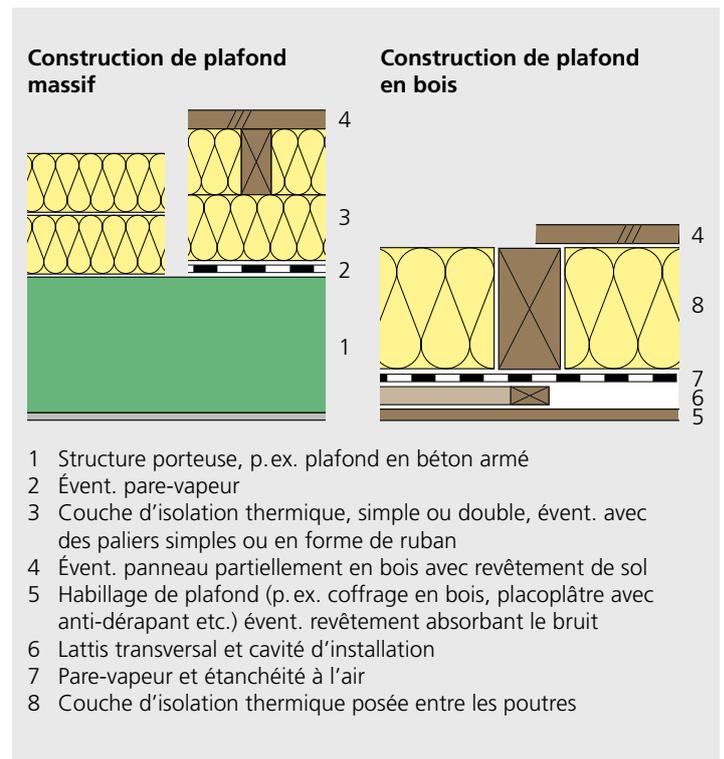
réalisée avec ou sans couche praticable suivant l'usage du local non chauffé. Pour atteindre une valeur U de 0,20 W/(m²K), il est nécessaire de prévoir des couches d'isolation thermique entre 10 et 18 cm d'épaisseur env. suivant le matériau d'isolation thermique et le type de pose ou le manque d'homogénéité.

Dans le cas d'un plafond à poutres en bois, la couche d'isolation thermique est posée entre les poutres en bois (isolation thermique d'env. 22 m d'épaisseur pour une valeur U de 0,20 W/(m²K)). Si les poutres doivent être moins hautes d'un point de vue statique, il est pertinent de poser une partie de l'isolation thermique sous ou sur les poutres (Illustr. 3.23).

Portes et portails

La valeur U des portes en contact avec l'extérieur doit être au maximum de 1,2 W/(m²K) conformément au MoPEC 2014 dans le cadre d'un justificatif par performances ponctuelles. Cette exigence suffit également pour l'enveloppe de bâtiment hautement isolée, notamment car la surface des portes par rapport à l'enveloppe thermique du bâtiment est généralement très faible. Le respect des exigences

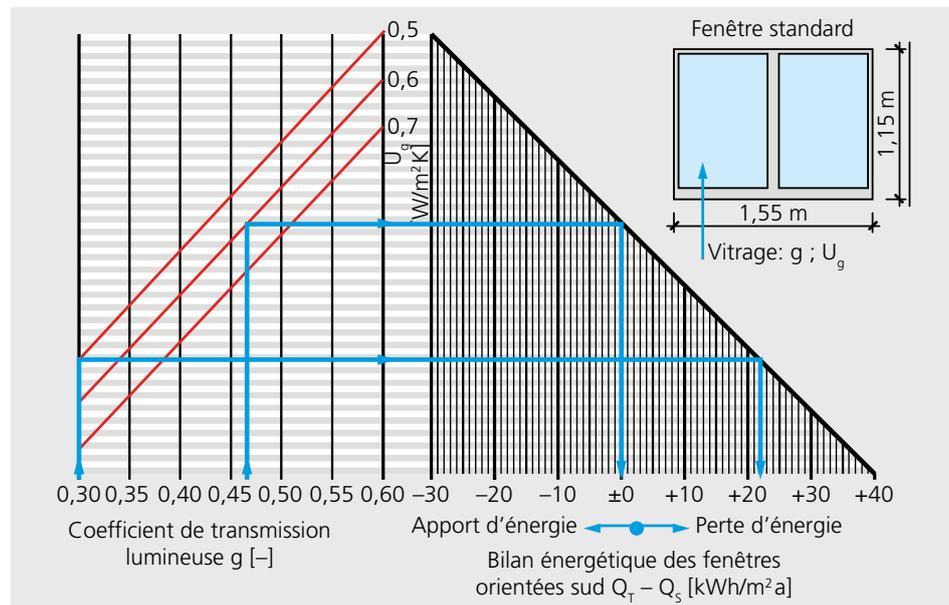
Illustration 3.23:
Construction du plafond contre espace non chauffé du toit ou des combles, évent. non ou peu accessible.



en matière de protection thermique implique l'installation de vantaux de porte isolés ou de portes vitrées (Chapitre 3.4 «Éléments de construction transparents»). La valeur U des portails en contact avec l'extérieur doit être au maximum de $1,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ conformément au MoPEC 2014 dans le cadre d'un justificatif par performances ponctuelles. Suivant la part de surface dans l'enveloppe thermique du bâtiment, cette exigence des éléments de construction individuels est également pertinente pour satisfaire les exigences d'une enveloppe de bâtiment hautement isolée (p. ex. pour Minergie). Tous les portails n'offrent pas une telle protection thermique:

- Portail basculant $1,7$ à $5,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- Portail en accordéon, portail coulissant en accordéon $1,7$ à $5,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- Portail coulissant $1,2$ à $4,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- Portail battant $1,4$ à $5,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- Portail sectionnel $0,5$ à $5,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- Portail roulant $3,9$ à $5,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- Portail rapide $1,5$ à $5,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

Illustration 3.24:
Bilan énergétique des fenêtres orientées sud, c'est-à-dire les pertes de chaleur par transmission moins les apports d'énergie par rayonnement solaire, en fonction de la transmission lumineuse g et de la valeur U_g du verre. Les verres de protection solaire avec valeur g $0,3$ entraînent une perte d'énergie équilibrée même avec un triple vitrage IV avec $U_g = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. À partir d'une valeur g de $0,47$, le triple vitrage IV avec $U_g = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ entraîne un apport d'énergie équilibré.



3.4 Éléments de construction transparents

La fenêtre influence considérablement le bilan énergétique et, en définitive, la consommation d'énergie d'un bâtiment (Illustr. 3.1). Il s'agit donc de l'élément de construction le plus important, en particulier pour l'enveloppe du bâtiment hautement isolée.

Influences de la fenêtre sur le bilan énergétique et la consommation d'énergie

La fenêtre a des effets déterminants sur les besoins de chaleur pour le chauffage à travers les déperditions énergétiques (transmission) et les apports solaires passifs. En cas de fenêtres non ombragées orientées au sud, à l'est et à l'ouest, il devrait être possible d'enregistrer un gain énergétique pendant la période de chauffage. La fenêtre a également un effet sur les déperditions de chaleur dues à l'aération, mais il n'est pas spécialement visible sur le plan comptable. Des fenêtres étanches à l'air (feuillures, montage du vitrage) et une installation étanche à l'air (raccord entre la fenêtre et le mur extérieur) permettent d'éviter un renouvellement d'air non contrôlé, non souhaité. Les déperditions de chaleur dues à l'aération, engendrées par l'ouverture des fenêtres par l'utilisateur (p. ex. aération permanente due aux fe-

nêtres en position inclinée) peuvent être considérables. Cette influence se traduit également par de grandes différences entre les consommations de chaleur pour le chauffage. Dans le cas d'enveloppes de bâtiment hautement isolées notamment, cela explique aussi en partie les différences entre la consommation de chaleur pour le chauffage calculée et effective.

Déperditions d'énergie par transmission au niveau des fenêtres

Voici les facteurs qui influencent les déperditions de chaleur par transmission tout autour de la fenêtre:

- La construction du châssis (surface de projection extérieure dans jour de maçonnerie, valeur U_f).
- Le vitrage (surface vitrée A_g , valeur U_g ; projection intercalaire, déperditions par ponts thermiques Ψ_g).
- Les influences géométriques (position de la fenêtre dans le mur extérieur) et dues aux matériaux (couches conductrices de chaleur, en particulier profilés alu) au niveau du montage d'une fenêtre (déperditions par ponts thermiques Ψ_E).

Gain énergétique grâce au rayonnement solaire

La meilleure solution pour réduire les besoins de chaleur pour le chauffage consiste, en général, à optimiser ou augmenter les apports solaires passifs avec les facteurs d'influence suivants:

- Surface vitrée A_g la plus grande possible, p. ex. en utilisant de grandes surfaces de fenêtre sans trop de subdivisions (petits bois, traverses d'imposte) et en renforçant l'isolation des châssis.
- Choisir des vitrages avec un coefficient global de transmission d'énergie g le plus élevé possible. Remarque: lorsque la dépense d'énergie pour le rafraîchissement domine dans les bâtiments aux charges internes élevées, choisir une valeur g optimisée plus faible peut s'avérer efficace. Il en est de même pour la protection thermique en été.
- Orienter le bâtiment de façon à ce que les grandes fenêtres profitent du rayonnement global élevé vers le sud.

■ Éviter l'ombrage autant que possible. Disposer les balcons devant les éléments de construction opaques et non devant les éléments de construction transparents.

■ Taux d'utilisation pour gains de chaleur h_g (en fonction de la masse d'accumulation et du réglage du chauffage).

L'utilisateur a une grande influence sur les apports d'énergie solaire obtenus lors de l'exploitation:

■ L'ombrage variable (protection solaire) ne doit pas être utilisé, dans la mesure du possible, pendant la période de chauffage. Il réduit la valeur g p. ex. de plus de 50 % à moins de 10 %.

■ Pendant la période de chauffage, il faut s'accommoder d'une température plus élevée que la température de confort souhaitée, obtenue à cause des apports solaires passifs.

■ Par conséquent, il ne faut pas recouvrir de tapis le sol accumulant la chaleur ou l'énergie.

Fenêtres pour l'enveloppe de bâtiment hautement isolée

Les planificateurs doivent évaluer et préconiser une fenêtre tenant compte le plus possible des aspects énergétiques. La fenêtre évaluée représente la «contrainte invariable» dans le calcul des besoins de chaleur pour le chauffage; les éléments de construction opaques peuvent alors être optimisés par l'épaisseur de la couche d'isolation thermique et le type de matériau d'isolation thermique (perméabilité thermique déclarée λ_D) de façon à satisfaire les exigences relatives aux besoins de chaleur pour le chauffage. Les fenêtres optimales sur le plan énergétique sont celles qui peuvent être surisolées sur les côtés et en haut presque jusqu'au verre, ce qui engendre un taux de surface vitrée élevée. Il faut se baser sur les caractéristiques suivantes que seuls des triples vitrages permettent d'atteindre:

■ Valeur U_g pour le vitrage de l'ordre de $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Il existe des triples vitrages présentant des valeurs U jusqu'à $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

■ Coefficient global de transmission d'énergie (valeur g) du vitrage $\geq 60\%$, si les locaux ne sont pas refroidis (utilisation sans charges internes élevées). Remarque: Si des verres antibruit sont nécessaires en raison des nuisances sonores, des concessions doivent généralement être faites à la valeur g.

■ Intercalaire à isolation thermique (bords chauds) avec déperditions par ponts thermiques Ψ_g de l'ordre de $0,033 \text{ W/mK}$.

■ Valeur U_f pour le châssis de la fenêtre $\leq 1,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$; plus la part du châssis est petite, plus son importance est faible. Des châssis de fenêtre en bois, bois/métal, plastique et des profilés métalliques à rupture thermique sont donc possibles.

3.5 Ponts thermiques

Le Chapitre 3.3 est consacré aux influences des ponts thermiques au niveau des éléments de construction sur les déperditions de chaleur. La détermination correcte de la valeur U des éléments de construction prend en compte ces déperditions:

■ Manque d'homogénéité dans les constructions en bois.

■ Déperditions par ponts thermiques au niveau des éléments de fixation qui traversent l'isolation thermique, p.ex. au niveau des murs extérieurs avec habillages ventilés.

Les déperditions par ponts thermiques linéaires ou ponctuels résultant d'interfaces doivent être prises en compte séparément.

Ponts thermiques au niveau des interfaces

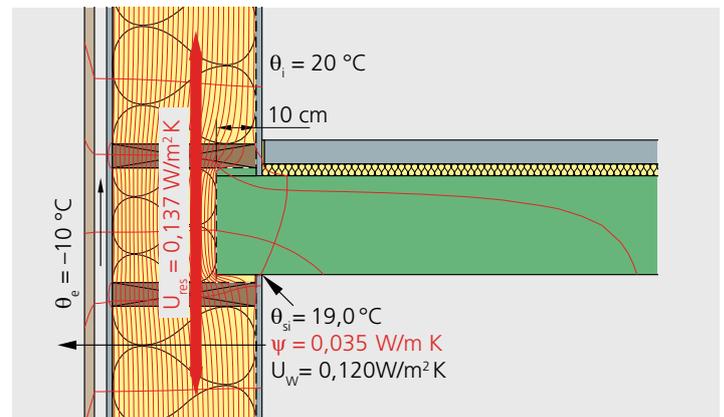
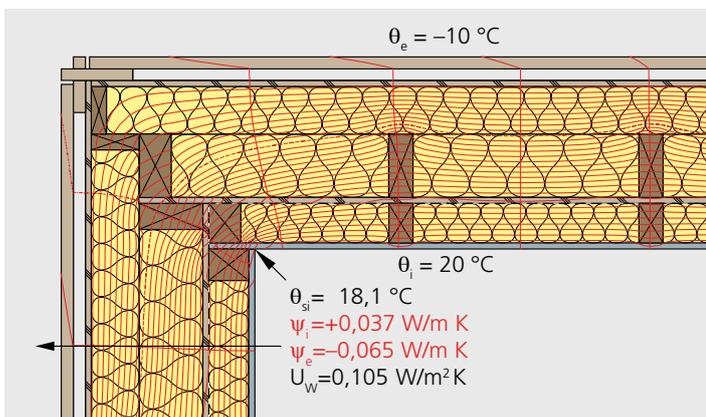
L'influence des ponts thermiques au niveau des interfaces peut être importante, p.ex. env. 10 à 15 % de l'ensemble des déperditions de chaleur par transmission. Dans les constructions hautement isolées, il s'agit donc de réduire autant que possible les déperditions par ponts thermiques. L'évaluation de ces déperditions peut être réalisée à l'aide des Catalogues des ponts thermiques:

■ Catalogue des ponts thermiques pour les constructions Minergie-P de l'OFEN, paru en 2008, pour les valeurs U d'élément de construction de l'ordre de $0,1$ à $0,12 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

■ Catalogue des ponts thermiques de l'OFEN, paru en 2002, pour les valeurs U d'élément de construction de l'ordre de $0,15$ à $0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Illustration 3.26: Dans la construction hybride, les pertes par ponts thermiques via les dalles de sol et les cloisons de séparation en béton armé faisant saillie dans l'élément de paroi extérieur sont inévitables. L'influence des ponts thermiques du détail énergétiquement et acoustiquement optimisé est cependant limitée.

Illustration 3.25: Lors de l'assemblage de composants en bois, les influences dues à la géométrie et au matériau n'entraînent pas d'augmentation des flux de chaleur (par rapport aux dimensions extérieures).



■ Liste de contrôle des ponts thermiques de l'EnDK, pour les valeurs U d'élément de construction de 0,20 W/(m²K).

Les détails du catalogue ne correspondant jamais précisément aux détails spécifiques à un ouvrage et les valeurs caractéristiques du catalogue tenant essentiellement compte des valeurs les plus élevées (déperditions par ponts thermiques plus élevées), cela incite à considérer des valeurs correctes et optimisées en fonction de l'objet issues des calculs des ponts thermiques.

Ponts thermiques dans les constructions en bois

Les déperditions par ponts thermiques dans les constructions en bois sont généralement négatives par rapport aux dimensions extérieures. Cela signifie qu'aucune déperdition par ponts thermiques ne doit être intégrée au niveau des bords d'un bâtiment (coins, socle, bord de toit etc.) (Illustr. 3.25). La pose de fenêtres et de portes engendre toutefois, dans les constructions en bois, des déperditions par ponts thermiques supplémentaires qui doivent être prouvées et prises en compte.

Ponts thermiques dans la construction mixte

L'interface entre deux éléments de construction en bois peut être réalisée sans pont thermique. Dans la zone d'interface avec la construction massive (p. ex.

appui de dalle en cas de plancher en béton armé), des ponts thermiques sont toutefois inévitables (Illustr. 3.26).

Ponts thermiques dans les constructions massives

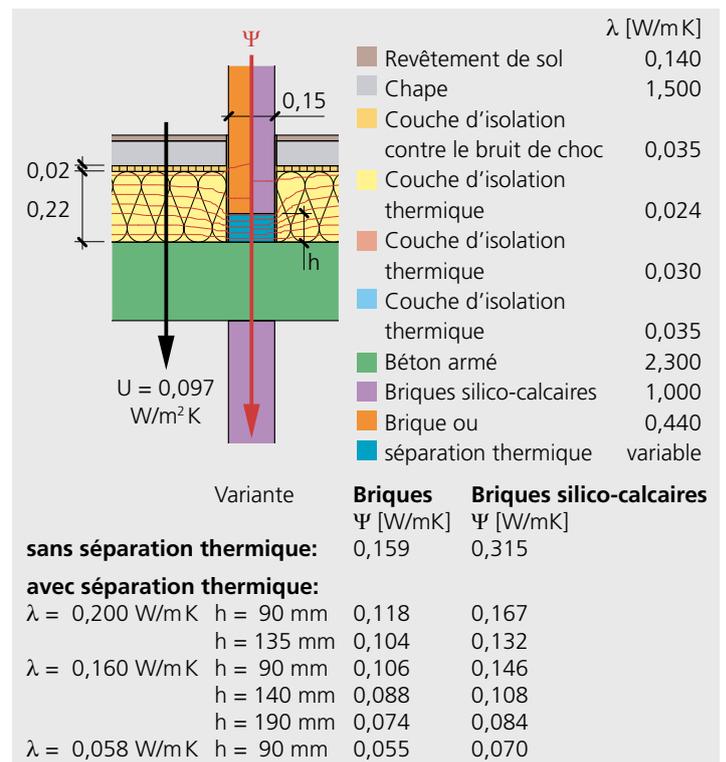
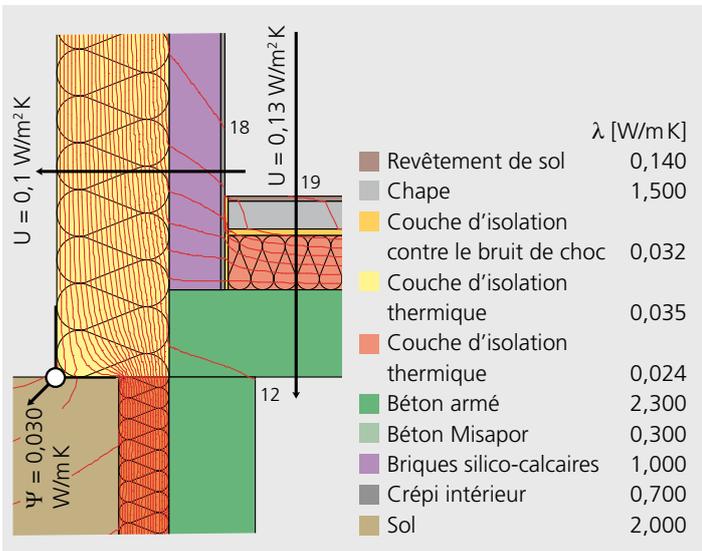
Contrairement aux matériaux en bois présentant une perméabilité thermique de 0,13 W/mK, les autres matériaux de construction tels que les briques en terre cuite, les briques silico-calcaires, le béton armé et les métaux entraînent des flux d'énergie localement bien supérieurs lorsqu'ils traversent la couche d'isolation thermique. Ces matériaux doivent donc bénéficier d'une isolation sur tout leur pourtour ou d'une séparation thermique.

Ponts thermiques au niveau du socle

Au niveau du socle représenté sur l'illustration 3.27, le rez-de-chaussée chauffé entre en contact avec le sous-sol non chauffé. Cette interface se trouve, selon la configuration du terrain, en contact avec l'extérieur et la terre. Pour protéger le bâtiment contre la chaleur et l'humidité, il est pertinent d'isoler également au minimum les murs dans un sous-sol non chauffé (p. ex. avec une isolation périphérique en

Illustration 3.28: Si le mur peut être séparé thermiquement du plafond en béton armé, il est optimal de placer toute la couche d'isolation thermique au-dessus du plafond. Plus l'élément de séparation thermique est élevé et plus sa conductivité thermique est faible, plus la perte par ponts thermiques à cette transition de composant est faible. En pratique, les critères statiques déterminent l'utilisation possible de ces éléments (p. ex. Thermur, Ytong-Thermofuss, Foamglas-Perinsul).

Illustration 3.27: En raison de la protection constructive contre la chaleur et l'humidité des murs extérieurs contre le terrain, la température ambiante dans le sous-sol non chauffé ne devrait guère être inférieure à environ 12°C, même à une température extérieure de -10°C. La perte par ponts thermiques via le mur de briques silico-calcaires, qui pénètre la couche d'isolation thermique, est modérée à 0,03 W/mK. Si le mur porteur peut être séparé thermiquement, cette perte par ponts thermiques peut être réduite à environ 0,01 W/mK.



contact avec la terre d'env. 10 cm d'épaisseur). Cela permettra de réduire les déperditions par ponts thermiques malgré la pénétration du mur extérieur porteur.

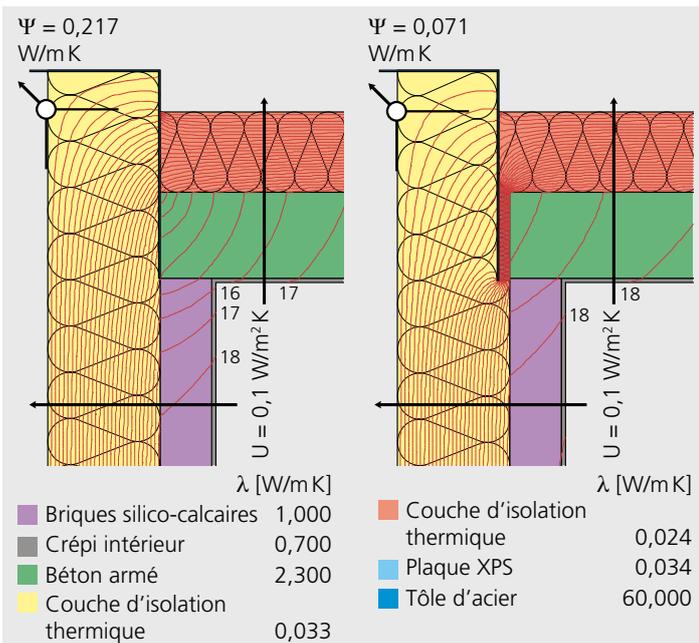
Lorsque le panneau mural est posé sur un élément porteur isolant, ce qui n'est guère possible avec les murs en béton, les déperditions par ponts thermiques selon le détail de l'illustration 3.27 peuvent encore être divisées par 3 environ.

Ponts thermiques au niveau des murs intérieurs

Lorsque des murs en béton qui ne sont pas séparés thermiquement (c'est la règle) du rez-de-chaussée chauffé se prolongent dans le sous-sol non chauffé, des déperditions par ponts thermiques de l'ordre de 0,5 à 0,7 W/m K doivent être prises en compte, selon l'emplacement des couches d'isolation thermique. Au niveau des murs en briques en terre cuite et en briques silico-calcaires, les déperditions par ponts thermiques sans séparation thermique diminuent à environ 0,2 à 0,3 W/m K.

Lorsque les murs du rez-de-chaussée en briques en terre cuite et en briques silico-calcaires peuvent être isolés au-dessus de la dalle en béton, la solution idéale est d'appliquer l'isolation thermique au-dessus de la dalle en contact avec le sous-sol non chauffé ou l'extérieur (Illustr. 3.28).

Illustration 3.29: Les tôles d'acier continus entraînent des pertes par ponts thermiques élevées au bord du toit. Celles-ci peuvent être réduites d'un facteur 3 par séparation thermique avec une feuille XPS résistante à la pression de 3 cm d'épaisseur.



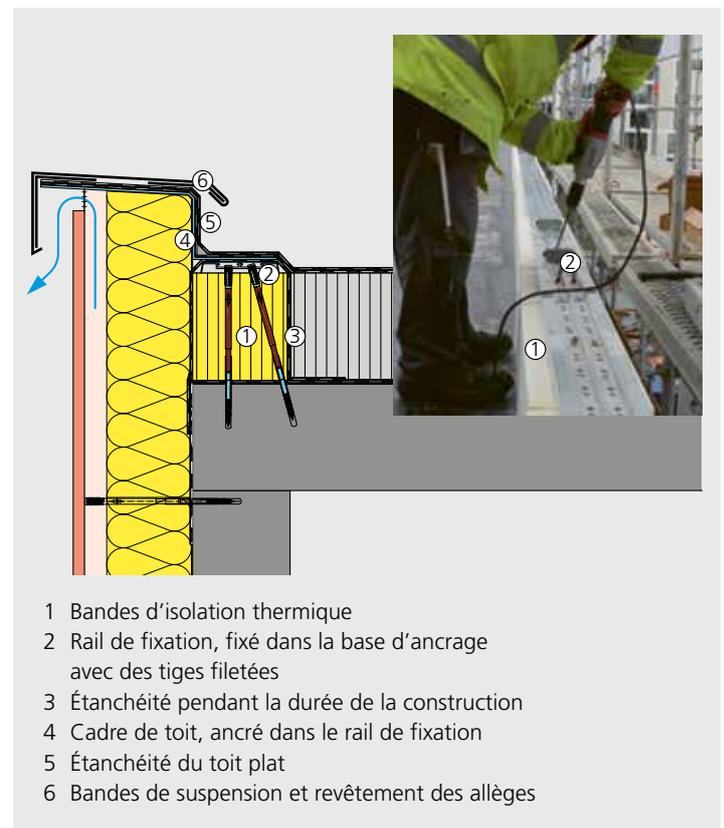
Ponts thermiques au niveau du bord du toit

Lorsque des tôles portantes traversent l'isolation thermique au bord du toit, on constate de fortes déperditions par ponts thermiques qui peuvent être sensiblement réduites par un montage isolé sur le plan thermique (bandes d'isolation thermique de 3 cm d'épaisseur entre la tôle et le plafond) (Illustr. 3.29).

Le bord de toit représenté sur l'illustration 3.30 est entièrement dépourvu de ponts thermiques. La tige filetée qui traverse l'isolation thermique engendre des déperditions par ponts thermiques ponctuels d'environ 0,005 W/K, et approximativement 2,5 la tige filetée sont nécessaires par mètre de bord de toit.

Lorsque le bord de toit prend la forme d'un parapet, la solution la plus efficace est la séparation thermique du parapet en pierre en ou béton (Illustr. 3.31). Même par rapport à un parapet bénéficiant d'une isolation tout autour, cela permet de diviser par deux les déperditions par ponts thermiques. Sans mesures spéciales, les déperditions par ponts thermiques élevées

Illustration 3.30: La société Rogger propose un rail de fixation posé à l'aide de tiges filetées à travers la couche d'isolation thermique dans la base d'ancrage. En fixant la tôle porteuse au rail de fixation, on obtient une bordure de toit pratiquement dépourvue de ponts thermiques.



de 0,252 W/mK environ correspondent aux déperditions de chaleur à travers un mur de la hauteur d'un étage et de 1 m de long ayant une valeur U de 0,1 W/(m²K).

Ponts thermiques au niveau du balcon

Les balcons en appui séparés disposant d'une isolation thermique extérieure d'un seul tenant entre le mur extérieur et la dalle du balcon représentent une solution optimale d'un point de vue thermique, car ils sont dépourvus de ponts thermiques. S'ils sont interdits par la loi sur les constructions – par exemple car les balcons dépassent de l'alignement des constructions – il ne reste alors que le raccord avec dalle en porte-à-faux. Dans ce cas, la marge d'optimisation se limite à la qualité de l'élément de raccord. Il est possible de jouer sur la qualité de l'acier ou d'utiliser des éléments en matière synthétique renforcée par fibres. En général, les raccords de dalle en porte-à-faux conventionnels présentent une valeur ψ d'environ 0,3 W/mK. Lorsque l'isolation de la dalle du balcon est impossible pour des raisons statiques, il convient de

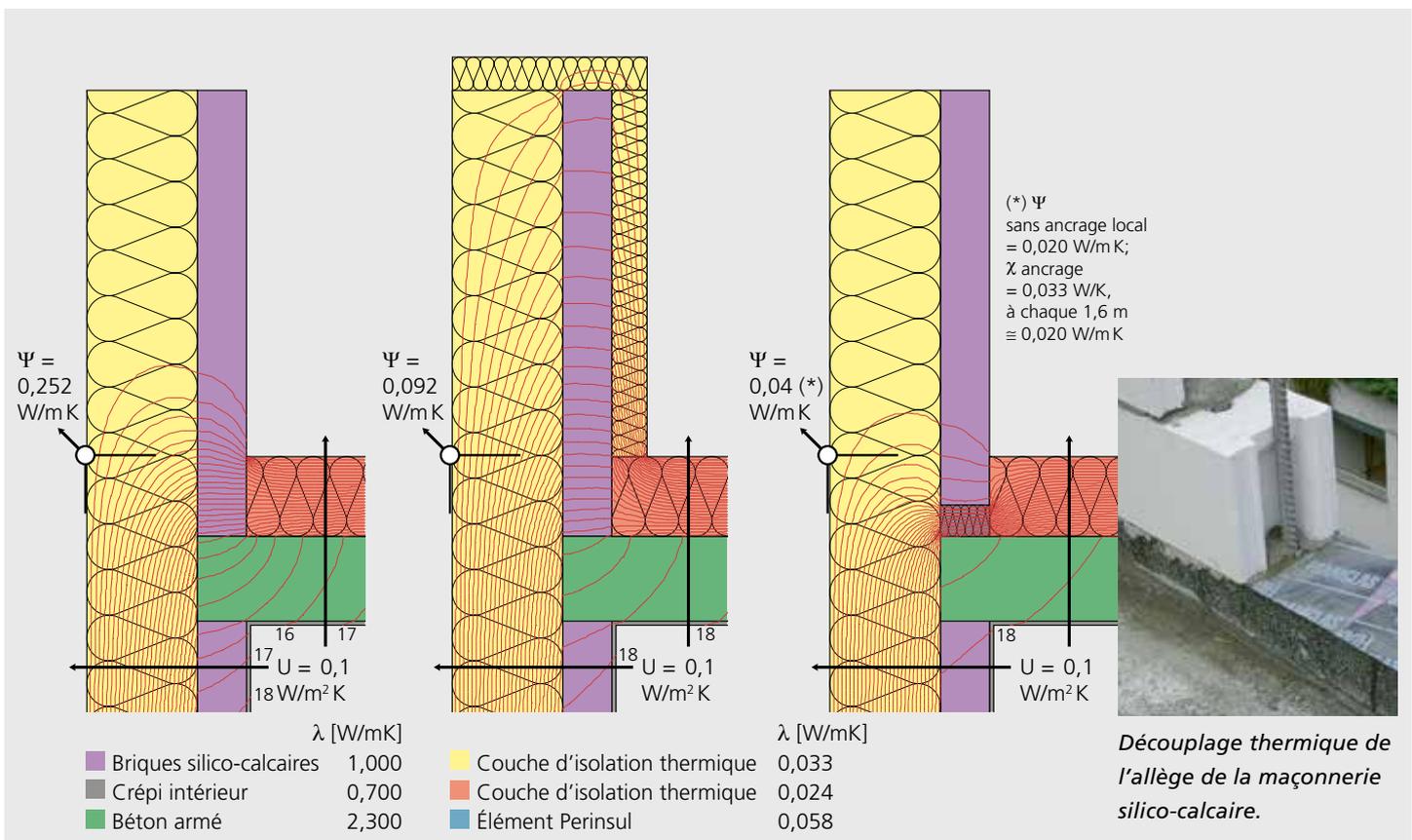
procéder à son isolation sur tout son pourtour, une méthode complexe à réaliser. Une isolation de 6 cm d'épaisseur (en haut, en bas et sur le devant de la dalle du balcon) engendre des déperditions par ponts thermiques d'environ 0,45 W/m K.

Ponts thermiques au niveau du montage d'une fenêtre

Le montage d'une fenêtre génère toujours d'importantes déperditions par ponts thermiques, dans les constructions massives tout comme dans les constructions en bois. Étant également représentatif des déperditions par ponts thermiques au niveau du montage des fenêtres dans la zone de l'allège ou du seuil et au niveau du linteau (où viennent s'ajouter d'autres facteurs d'influence tels que les logements du linteau p.ex.), seul le raccord de fenêtre latéral dans le mur extérieur est retenu pour la suite.

L'illustration 3.32 montre l'influence du montage de la fenêtre pour la construction à ossature bois et l'isolation thermique extérieure enduite (également applicable

Illustration 3.31: Même une allège à l'attique surisolée a tendance à provoquer des pertes élevées par ponts thermiques. La solution optimale est de placer l'allège sur un élément d'isolation thermique et de la découpler ainsi thermiquement du plafond en béton armé.

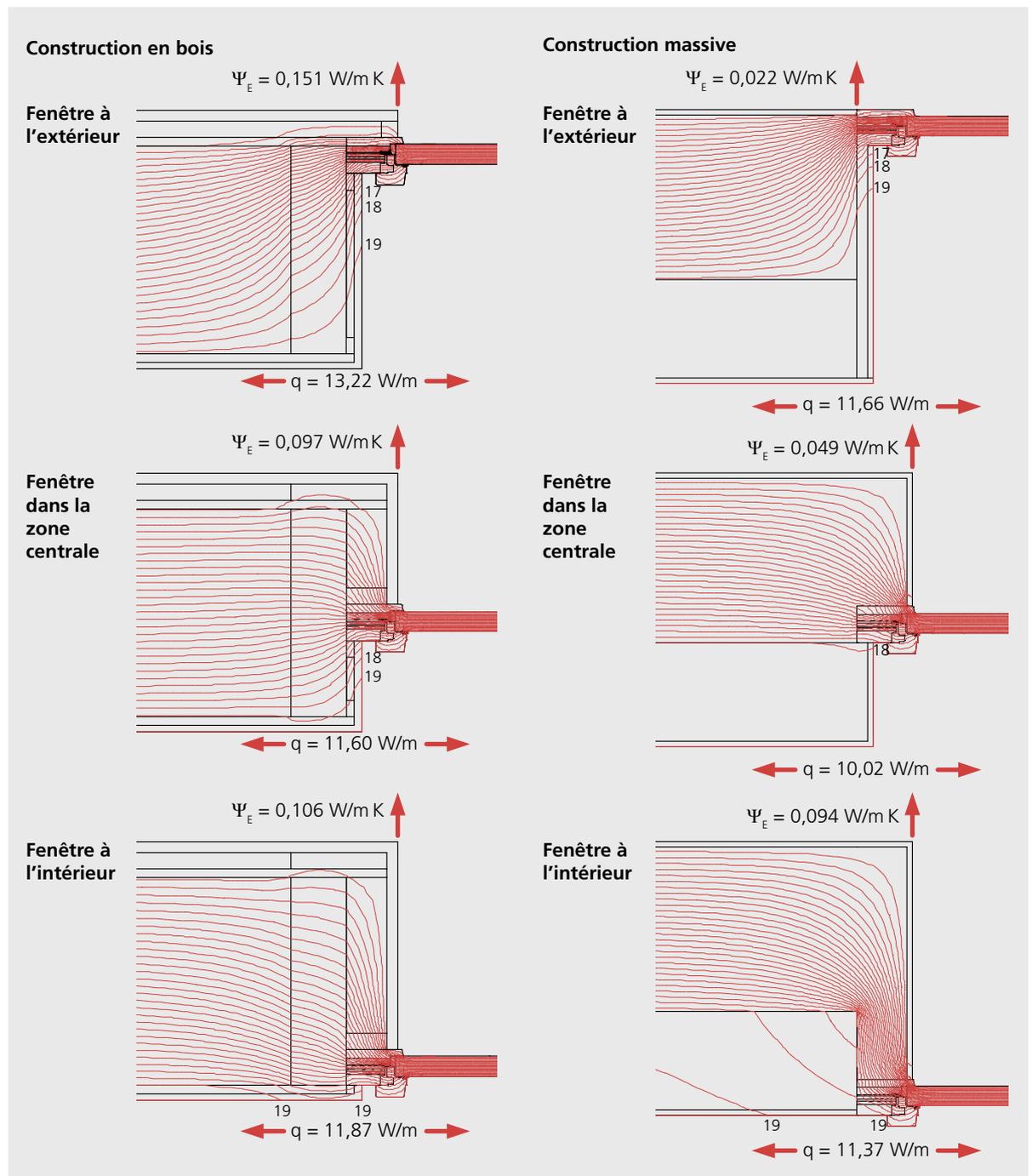


avec habillage ventilé). La fenêtre considérée engendre des déperditions par ponts thermiques minimales au niveau du montage. Avec des fenêtres en bois et métal ou en métal, les déperditions par ponts thermiques seraient encore nettement plus élevées.

L'appui de fenêtre latéral engendre ainsi les déperditions de chaleur les plus faibles et, par conséquent, les déperditions par ponts thermiques les plus petites au niveau

du montage de la fenêtre, lorsque celle-ci est montée au milieu de la construction en bois ou dans la zone intérieure de l'isolation thermique extérieure de murs extérieurs massifs ($\psi_E = 0,097$ ou $0,049$ W/m K). Dans la construction en bois, les déperditions par ponts thermiques sont donc supérieures à celles de la construction massive, car le châssis en bois exigé par la statique de construction dans la zone de l'embrasure influence les déperditions par

Illustration 3.32: Perte par ponts thermiques Ψ_E à l'appui de fenêtre latéral et perte thermique q sur tout le périmètre détaillé (mur avec $U = 0,1$ W/m² K; cadre de fenêtre avec $U_f = 0,91$ W/m² K; verre avec $U_g = 0,5$ W/m² K et $\Psi_g = 0,05$ W/m K). L'installation de fenêtres dans la zone centrale entraîne les pertes d'énergie les plus faibles. L'installation de fenêtres en plein centre conduit à des températures de surface interne maximales élevées. Les pertes d'énergie sont plus importantes avec des fenêtres montées à l'extérieur, bien que cela ne se manifeste pas nécessairement dans la valeur Ψ_E en raison des plans de référence modifiés.



ponts thermiques. Les plus grandes déperditions énergétiques ont été constatées avec la fenêtre affleurant à la surface extérieure, cela ne se répercutant pas forcément sur la valeur ψ_E en raison de la modification des niveaux de référence. Une fenêtre affleurant à la surface intérieure est également moins efficace sur le plan énergétique qu'une fenêtre disposée au milieu. Ce type d'appui engendre toutefois des déperditions de chaleur plus faibles que la fenêtre disposée au même niveau que la surface extérieure et les températures au niveau des surfaces côté habitat sont également élevées dans ce détail de construction.

Les différences au niveau des déperditions par ponts thermiques pouvant être très importantes suivant le châssis de fenêtre et le type d'appui, il est conseillé de déterminer les déperditions par ponts thermiques effectives dans les bâtiments hautement isolés à l'aide de calculs spécifiques à chaque ouvrage.

Installations techniques du bâtiment

Heinrich Huber 4.1 Prescriptions légales

Le modèle de prescriptions énergétiques des cantons, MoPEC 2014, fixe les «Exigences concernant la couverture des besoins de chaleur des constructions nouvelles». Ainsi, les besoins pondérés en énergie finale pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation et la climatisation ne doivent pas dépasser 35 kWh/m² par an (Bâtiments d'habitation, Tabl. 4.1). Trois points sont à retenir à ce sujet:

■ Ne sont pas concernées par ces exigences les extensions de bâtiments existants, lorsque la surface de référence énergétique récemment construite est inférieure à 50 m² ou représente au maximum 20 % de la surface de référence énergétique du bâtiment existant et moins de 1000 m².

■ L'électricité issue de l'autoproduction ne peut pas être prise en compte. Le courant produit par des installations de couplage chaleur-force fait exception.

■ Cette exigence est donc pertinente pour les installations techniques d'un nouveau bâtiment, car les solutions les plus économiques ne peuvent être mises en œuvre qu'en association avec des installations permettant l'utilisation d'énergie renouvelables. Ces prescriptions représentent la planification intégrale dans laquelle le bâti et les installations techniques constituent un système global.

Pour les deux catégories d'ouvrage Habitat collectif et Habitat individuel, le MoPEC 2014 propose six combinaisons de solutions standard pour obtenir le justificatif

des besoins en énergie pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation et la climatisation. (Tabl. 4.2). Le Tableau 4.3 comporte des valeurs permettant d'évaluer l'efficacité des mesures.

Tableau 4.2:
Combinaison de solutions standard pour les constructions nouvelles selon MoPEC 2014.

| Combinaisons de mesures structurelles et techniques | | |
|---|--|--|
| CSS | Conditions structurelles et techniques | Production de chaleur |
| 1 | Éléments de construction contre extérieur: 0,17 W/(m ² K); fenêtres: 1,0 W/(m ² K); aération du logement | Pompe à chaleur électrique; chauffage à bois automatique; chaleur à distance issue d'UIOM, de STEP ou d'énergies renouvelables |
| 2 | Éléments de construction contre extérieur: 0,17 W/(m ² K); fenêtres: 1,0 W/(m ² K); installation solaire thermique au moins 2 % SRE | Pompe à chaleur électrique; chauffage à bois automatique; chaleur à distance issue d'UIOM, de STEP ou d'énergies renouvelables |
| 3 | Éléments de construction contre extérieur: 0,15 W/(m ² K); fenêtres: 1,0 W/(m ² K) | Pompe à chaleur électrique, sonde géothermique ou eau; chauffage à bois automatique; chaleur à distance issue d'UIOM, de STEP ou d'énergies renouvelables |
| 4 | Éléments de construction contre extérieur: 0,15 W/(m ² K); fenêtres: 0,8 W/(m ² K) | Pompe à chaleur électrique; chauffage à bois automatique; chaleur à distance issue d'UIOM, de STEP ou d'énergies renouvelables |
| 5 | Éléments de construction contre extérieur: 0,15 W/(m ² K); fenêtres: 1,0 W/(m ² K); ventilation du logement; installation solaire thermique au moins 2 % SRE | Pompe à chaleur électrique ou à gaz; poêle à bois automatique; chaleur à distance issue d'UIOM, de STEP ou d'énergies renouvelables; chauffage à bûches |
| 6 | Éléments de construction contre extérieur: 0,15 W/(m ² K); fenêtres: 0,8 W/(m ² K); ventilation du logement; installation solaire thermique au moins 2 % SRE | Pompe à chaleur électrique ou à gaz; chauffage à bois automatique; chaleur à distance issue d'UIOM, de STEP ou d'énergies renouvelables; chauffage à bûches; générateur de chaleur fossile |

CSS: Combinaisons de solutions standard
 CSS 6: Installation solaire thermique pour le chauffage et ECS
 Pompe à chaleur électrique: Source: sonde géothermique, eau ou air neuf

Tableau 4.1:
Les valeurs limites pour les besoins énergétiques des constructions nouvelles conformément aux prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC 2014) peuvent être atteintes par une combinaison de mesures structurelles et techniques.

| Besoin en énergie pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation, la climatisation des constructions nouvelles (MoPEC 2014) | | |
|--|--------------------|-----------------------|
| Catégorie de bâtiment | Utilisation | Valeurs limites |
| I | Habitat collectif | 35 kWh/m ² |
| II | Habitat individuel | 35 kWh/m ² |
| III | Administration | 40 kWh/m ² |
| IV | Écoles | 35 kWh/m ² |
| VII | Locaux de réunion | 40 kWh/m ² |

Exigence du MoPEC: Estimation du besoin en énergie et de l'effet des mesures

| | | | | | |
|---|---|------|-----------------------------------|--|------------------|
| Coefficient d'enveloppe du bâtiment | 0,6 | 1,2 | 1,8 | voir Illustration 2.1, p. 43 | |
| Besoin de chauffage | 23,6 | 32,2 | 42,8 | Valeurs en kWh/(m²a) | |
| Besoin en production d'ECS | 21 | 21 | 21 | | |
| Besoin en chaleur (100 %) | 44,6 | 53,2 | 63,8 | | |
| Valeur limite MoPEC 2014 | 35 | | | | |
| Part maximale admissible en énergie non renouvelable | 78 % | 66 % | 55 % | | |
| Part minimale nécessaire pour couvrir le besoin en énergie non renouvelable | 9,6 | 18,2 | 28,8 | | |
| Réduction par | Effet sur le besoin en chaleur pour le chauffage | | Effet sur le besoin en ECS | | |
| CSS: valeurs U en W/(m ² K) | Valeurs en kWh/(m ² a) | | Valeurs en kWh/(m ² a) | | |
| Mesures à prendre sur l'enveloppe du bâtiment (valeurs U fenêtre/mur extérieur/toit) | | | | | |
| CSS 1 + 2 (1,0/0,17/0,17) | 3 | 2 | 2 | | |
| CSS 3 + 5 (1,0/0,15/0,15) | 4 | 4 | 3 | | |
| CSS 4 + 6 (0,8/0,15/0,15) | 6 | 7 | 7 | | |
| Super isolation (0,8/0,1/0,1) | 7 | 10 | 13 | | |
| Mesures à prendre pour la technique du bâtiment | | | | Sans Soth | Avec Soth |
| Ventilation du logement 80 % | 9 | 9 | 9 | – | – |
| PAC air-eau 50 °C | 6 | 9 | 11 | 4 | 12 |
| PAC avec sondes géothermiques 50 °C | 9 | 12 | 16 | 4 | 12 |
| PAC air-eau 35 °C | 10 | 15 | 19 | 4 | 12 |
| PAC avec sondes géothermiques 35 °C | 13 | 19 | 24 | 4 | 12 |
| Chaleur à distance | 8 | 13 | 17 | 8 | 14 |
| Chauffage à granulés de bois | 8 | 13 | 17 | 9 | 14 |
| Chauffage à bûches | 8 | 11 | 14 | 7 | 13 |
| Chauffage à agents fossiles | – 4 | – 6 | – 8 | – 4 | 8 |
| Installation solaire thermique | | | | 10 | |
| Installation photovoltaïque (puissance de pointe par m ² SRE) | | | | Le rendement d'une installation photovoltaïque ne peut être pris en compte pour couvrir le besoin en chaleur | |
| 5 Wp/m ² | 10 kWh/(m ² a) | | | | |
| 10 Wp/m ² | 20 kWh/(m ² a) | | | | |
| 20 Wp/m ² | 40 kWh/(m ² a) | | | | |
| 30 Wp/m ² | 60 kWh/(m ² a) | | | | |

Remarques

Source: EnFK, groupe de travail MoPEC 2014, Olivier Brenner

Le tableau permet une estimation approximative de la couverture du besoin en chaleur des constructions nouvelles. Pour des estimations détaillées, il est recommandé d'utiliser l'outil de calcul EN-101c (voir «Justificatif simplifié»).

Les chiffres en kWh/(m²a) pour les «Mesures pour la technique du bâtiment» quantifient la réduction de la proportion d'énergie non renouvelable.

Coefficient d'enveloppe du bâtiment: Rapport entre la surface de l'enveloppe thermique du bâtiment et la surface de référence énergétique.

Les chiffres sont basés sur les données climatiques du Plateau suisse (SMA Zurich) ainsi que sur les niveaux d'utilisation normale et les coefficients de performance annuelle (COPA).

Besoin pour la production d'eau chaude sanitaire: correspond à l'utilisation standard selon la norme SIA 380/1 pour les immeubles d'habitation.

Valeur limite MoPEC 2014 Besoins énergétiques finaux pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation et la climatisation.

CSS: Combinaisons de solutions standard pour les constructions nouvelles selon le MoPEC 2014. Valeurs U en W/(m²K), Ventilation du logement 80 %: Récupération de chaleur de 80 %, PAC: Pompe à chaleur; 50 °C: Température de départ du chauffage 50 °C; 35 °C: Température de départ du chauffage 35 °C, Soth: Capteurs solaires (thermiques)

Les valeurs de référence tiennent compte des facteurs de pondération nationaux pour l'énergie finale: énergies fossiles 1; énergie électrique 2; biomasse 0,5; chaleur à distance 0,6 (part de la chaleur produite à partir de combustibles fossiles inférieure à 50 %).

Exemple à la page 105. Légende: page suivante.

Exemple de lecture du Tableau 4.3

Un immeuble collectif doté d'un coefficient d'enveloppe du bâtiment de 1,2 présente un déficit de 18,2 kWh/m² dans la couverture des besoins énergétiques pour le chauffage, l'ECS, la ventilation et la climatisation. Une PAC avec une sonde géothermique et fonctionnant à une température de départ de 35°C réduirait ce déficit de 19 kWh/m². Autre possibilité: opter pour les mesures appliquées à l'enveloppe du bâtiment conformément aux combinaisons de solutions standard (CSS) 4 et 6 ainsi que pour la même pompe à chaleur avec sondes géothermiques, mais avec une température de départ de 50°C (chauffage par radiateur) (baisse de 7 et de 12 kWh/m²).

Justificatif simplifié

La Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK) propose sur son site Internet un justificatif énergétique simplifié ainsi que des instructions (www.endk.ch → Professionnels → Justificatif énergétique → EN-101 à EN-141). Le justificatif concerne les besoins en énergie finale pour la couverture des besoins en chaleur des constructions nouvelles (base: valeur limite de 35 kWh/m²), ainsi que sur la protection thermique en hiver et en été. Il s'agit de formulaires, mais aussi d'un outil de justification pour bâtiments simples (ENteb) sous le sigle EN-101c. Peu de données sont à saisir. Il existe également les formulaires EN-101, EN-102 et EN-104. Le principal objectif est de simplifier la procédure de justification. Mais ce n'est pas le seul, car l'outil doit également identifier les corrélations importantes sur le plan énergétique entre l'enveloppe et les installations techniques du bâtiment, comme le montre le Tableau 4.3. De plus, la plausibilité d'un projet peut ainsi être établie à un stade très précoce. La variation des données clés permet de simplifier l'optimisation. Le justificatif est autorisé uniquement pour les ouvrages des catégories Habitat individuel et Habitat collectif. Les combinaisons de solutions standard (CSS) selon le MoPEC 2014 sont déterminantes pour la conception des installations techniques; ces CSS sont également représentées dans l'outil.

Tableau 4.3: Effet des mesures visant à réduire le besoin en énergie pour la chaleur dans les constructions nouvelles en kWh/(m²a) en utilisant l'exemple d'un immeuble collectif de compacité variable (interpoler les valeurs intermédiaires).

4.2 Chauffage et ECS

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 surtout aux pompes à chaleur. Lorsque la température de départ, p. ex. 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 COPA 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 aussi s'appliquer partiellement 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'appoint de chauffage et la production d'eau chaude sanitaire

Ne sont pas traités:

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

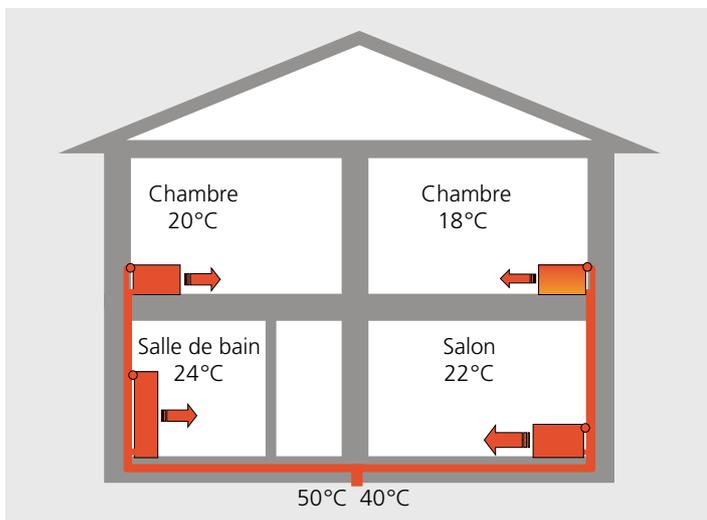
Des combinaisons de différents approvisionnements en chaleur sont représentées pour trois standards d'isolation thermique différents. Les valeurs du besoin en chaleur de chauffage s'appliquent à des bâtiments d'habitation du Plateau suisse dotés d'un facteur d'enveloppe d'environ 1,2 (maison d'habitation 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. 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 ajustée et réglée individuellement.
- L'émission de chaleur peut être rapidement modifiée.

Illustration 4.1:
Principe de chauffage à eau à l'aide de corps de chauffe.



Les inconvénients sont les suivants:

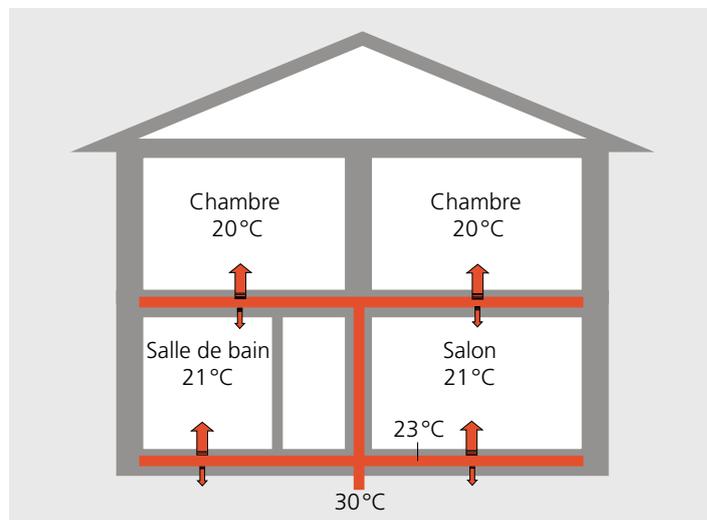
- Pour les bâtiments dotés d'un besoin en puissance de chauffage très bas, la distribution de chaleur est relativement complexe et ainsi assez onéreuse (investissements élevés pour chaque watt de puissance thermique).
- Les corps de chauffe peuvent restreindre les possibilités d'ameublement et sont parfois 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 à eau à l'aide d'un chauffage au sol ou de dalles thermostatives (TABS)

La distribution de chaleur sur une grande surface garantit de basses températures de départ. Dans les bâtiments neufs bien isolés, les valeurs sont de l'ordre de 30 à maximum 35 °C. Avec les TABS, des valeurs de départ encore plus basses sont possibles. 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

Illustration 4.2:
Principe de chauffage à eau à l'aide d'un chauffage au sol ou de TABS.



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 m² 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. Cela représente un inconvénient lorsque les pièces inférieures appartiennent à une autre unité d'utilisation ou à la cave.
- 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 10W/m² au maximum, la chaleur de chauffage peut être distribuée via une installation de ventilation mécanique. La température ambiante est généralement régulée en fonction d'une pièce de référence.

- Au prix de quelques équipements supplémentaires, une installation de ventila-

tion 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 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/m².
- 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 bain 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 rayon-

Illustration 4.3:
Principe de chauffage à l'aide de l'air pulsé.

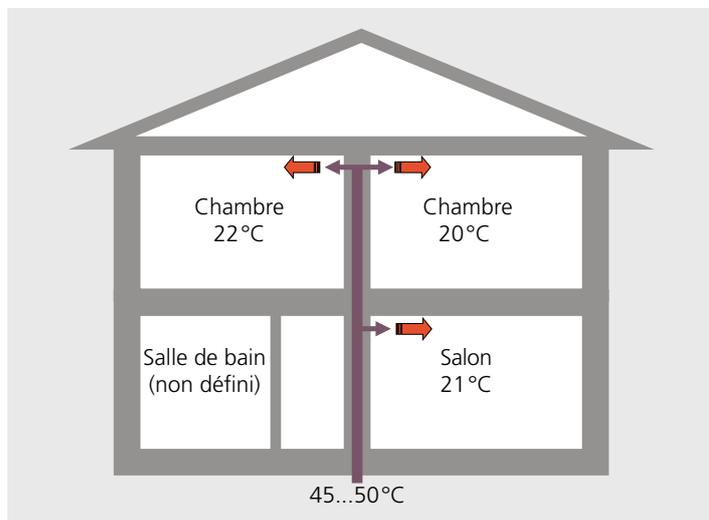
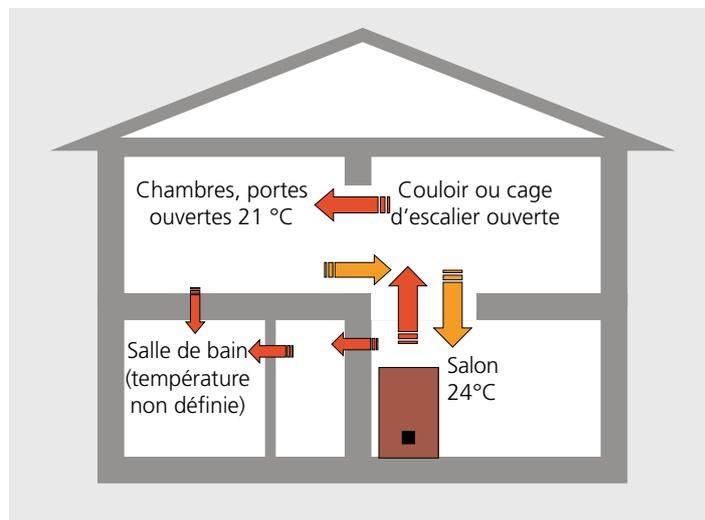


Illustration 4.4:
Principe du poêle avec distribution libre de la chaleur.



nement 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.

Systèmes mixtes

Dans les installations destinées aux bâtiments ayant un faible le 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 4.4 illustre les types d'approvisionnement en chaleur recommandés pour les différentes combinaisons de standards d'isolation thermique et de distribution de chaleur. Les points suivants sont à respecter:

- Dans les variantes avec chauffage à bois, une installation solaire thermique devrait être utilisée pour couvrir au moins 60 % du besoin annuel en chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire. 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 sanitaire une pompe à chaleur de production d'eau chaude séparée (chauffe-eau à PAC ou PAC raccordée à l'air repris).

Tableau 4.4:
Recommandations pour les combinaisons de standards d'isolation thermique et d'installation de chauffage.

| Standard d'isolation thermique → distribution de chaleur | Construction nouvelle MoPEC 2014 ou Minergie | Construction nouvelle Minergie-P |
|--|---|--|
| Chauffage de l'eau à l'aide de corps de chauffe | Dimensionnement sur le départ ≤ 45°C. Convient au chauffage à bois, à la chaleur à distance et au PAC eau glycolée-eau. | Dimensionnement sur le départ ≤ 40°C. Convient au chauffage à bois et au PAC eau glycolée-eau. |
| Chauffage au sol ou dalles thermoactives (TABS) | Dimensionnement sur le départ ≤ 35°C. Convient à tous les générateurs de chaleur. | Dimensionnement sur le départ ≤ 30°C. Convient à tous les générateurs de chaleur. |
| Chauffage à l'aide d'air pulsé | Ne convient pas | Convient lors d'une puissance de chauffage d'au max. 10 W/m ² . En combinaison avec une pompe à chaleur d'air évacué pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. |
| Poêle avec distribution libre de chaleur | Ne convient pas à l'habitat collectif. En combinaison avec une installation solaire thermique, convient à l'habitat individuel. | Ne convient pas à l'habitat collectif. En combinaison avec une installation solaire thermique, convient à l'habitat individuel. |

■ 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

Une basse température de départ est la clé d'un approvisionnement en chaleur efficace. De plus, 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, la température ambiante augmente de 20 à 22 °C, le chauffage au sol ne distribue plus de chaleur dans la pièce. Étant 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 ≤ 30 °C, aucune régulation technique des pièces individuelles. Cela permet de réaliser des installations simples et fiables sur le plan

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/m²
- Éventuellement optimiser la valeur U des fenêtres
- Éventuellement, pour les fenêtres non orientées vers le sud, vérifier les grandeurs (p. ex. balustrades dans les chambres à coucher)

Tableau 4.5:
Puissance de chauffage spécifique typique (basée sur la surface au sol) d'un système de chauffage au sol avec un parquet, température de départ 30 °C, température de retour 26 °C.

| Distance de pose | 5 cm | 10 cm | 15 cm | 20 cm |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Puissance de chauffage spécifique | 35 W/m ² | 33 W/m ² | 30 W/m ² | 28 W/m ² |

hydraulique. Une régulation peut encore être utile, par exemple avec une salle pilote dans des bâtiments bien isolés.

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/m². Pour les petites surfaces, telles que les salles de bain, des distances de pose de 10 cm ou moins peuvent éventuellement être réalisées (Tabl. 4.5).

Exemple

Un logement en attique d'un immeuble d'habitation Minergie possède un salon de 30 m² avec des données conformes au Tableau 4.6. Avec de bonnes fenêtres à triple vitrage, il est possible d'obtenir une valeur U de 0,9 W/m². Il en résulte un besoin spécifique de puissance de chauffage de 27 W/m² et la température de départ visée de 30 °C peut être atteinte sans problème. Avec une faible isolation ou des fenêtres moins performantes (valeur U: la puissance de chauffage requise est de 35 W/m². Une température de départ de 30 °C ne serait pas suffisante.

Eau chaude sanitaire: minimiser les pertes de distribution

Les déperditions thermiques des installations de production d'eau chaude sanitaire 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 sani-

Tableau 4.6:
Exemple d'un séjour dans un appartement en attique.

| Élément de construction | Surface A m ² | Valeur U W/(m ² K) | Puissance Φ W | Puissance relative |
|---|--------------------------|-------------------------------|---------------|--------------------|
| Murs extérieurs et toit | 37,0 | 0,20 | 207 | 25 % |
| Fenêtres | 21,6 | 0,9 | 544 | 67 % |
| Perte par ventilation | – | – | 67 | 8 % |
| Somme | | | 818 | 100 % |
| Besoin spécifique en puissance de chauffage 27 W/m ² | | | | |

taire est à peu près équivalent au besoin en chaleur de 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.

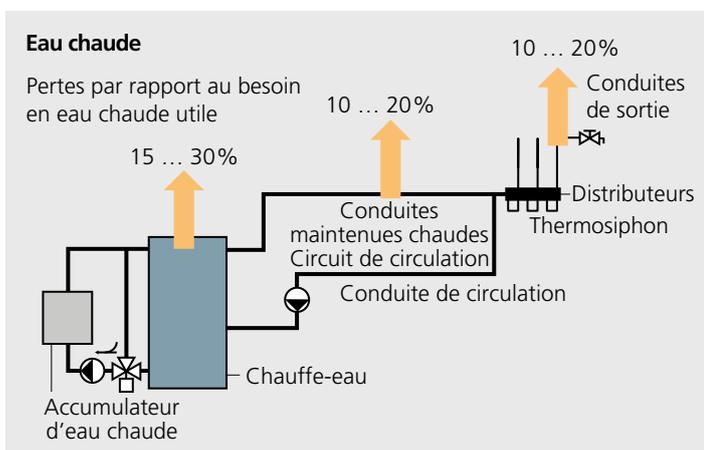
C'est notamment dans la première phase de planification qu'une grande vigilance est de mise. Ces pertes peuvent être maintenues à un faible niveau grâce aux mesures suivantes:

- 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.

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 sanitaire doivent s'effectuer de façon centralisée, ou décentralisée dans les différents logements. Dans le cas des installations centralisées, 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 55°C, sont admissibles. Une production d'eau chaude centralisée doit être choisie dans le cas d'une

Illustration 4.5: Pertes des installations de production d'eau chaude.



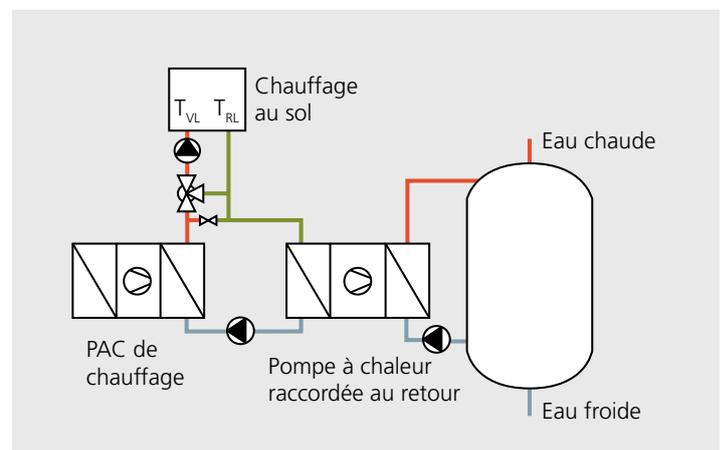
production d'eau chaude solaire ou d'un raccordement au chauffage à distance.

Les chauffe-eau ne doivent pas être chauffés 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 (COPA) jusqu'à 3,5. 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 chauffage. 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?

Étant 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).

Illustration 4.6: Schéma d'une PAC raccordée au retour.



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 PAC prend en charge la totalité de l'approvisionnement en chaleur pour le chauffage et l'ECS.

Pour la comparaison, on suppose que:

- Le besoin en chaleur pour l'eau chaude sanitaire correspond à l'utilisation standard selon la norme SIA 380/1 de 21 kWh/m².
- Le coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur pour la production d'eau chaude est d'environ 2,8.
- La comparaison est réalisée pour un logement avec une surface de référence énergétique de 100 m².
- La consommation d'électricité nette est identique dans les deux variantes.

Avec un prix du PV élevé pour les conditions actuelles de 2500 francs par kWc, on obtient dans cet exemple un investissement de seulement 1500 francs par logement (SRE 100 m²). 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 avec 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.

| Variante | Solaire thermique | Solaire électrique |
|--|--|---|
| Rendement solaire spécifique | 450 kWh d'énergie thermique par m ² de capteur (par an) | 900 kWh d'énergie électrique par kW de puissance installée (par an) |
| Capteurs resp. panneaux installés | 2,8 m ² | 0,56 kW _p (env. 4 m ²) |
| Rendement solaire absolu | 1250 kWh thermique | 504 kWh électrique |
| Production d'eau chaude sanitaire <ul style="list-style-type: none"> • Installation solaire • Pompe à chaleur | 1250 kWh 833 kWh | 0 kWh 2083 kWh |
| Énergie électrique <ul style="list-style-type: none"> • Consommation pompe à chaleur • Production photovoltaïque | 298 kWh 0 kWh | 744 kWh 504 kWh |

Tableau 4.7: Comparaison d'une production d'eau chaude solaire thermique avec une production électrique, pour un appartement de 4 pièces (100 m²) dans un habitat collectif.

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

Avec des pompes à chaleur avec sondes géothermiques il est possible d'atteindre des coefficients de performance de 3,5 à 5,0 sur toute l'année. Dès qu'il y a un besoin de refroidissement, les pompes à chaleur avec sondes géothermiques sont la priorité, même pour les petits bâtiments, car la sonde géothermique permet de rafraîchir les pièces de manière rentable et très efficace en été.

■ 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 adaptées à une exploitation hivernale. Toutefois, lorsqu'elles doivent être utilisées en été pour la production d'eau chaude sanitaire, 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 sanitaire.

■ 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.

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. 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, par exemple 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.

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 et combinés avec un déclenchement automatique («Timer»). Pour plus de détails à ce sujet, reportez-vous à l'Aide à l'exécution EN-103 du MoPEC 2014.

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, on a rapidement les pieds froids. 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'entre-saison et en dehors de la saison de chauffage, 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'entre-saison 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. La présence d'un tel conduit 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 dépres-

sion, 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. Une dépression non admissible peut être empêchée par les mesures suivantes:

- 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, p.ex. entraînements automatiques de fenêtres.

- Surveillance contrôlée de la dépression, proposée par les fournisseurs des modules chauffage.

- En présence de ventilation douce, les appareils utilisés doivent être conçus pour fonctionner avec des chauffages (pas de protection contre le gel via la commande du 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 non séparée 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 corridor. 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 de telles chambres, le rendement baisse également. De plus, l'étanchéité à l'air du logement est nettement réduite. Les pertes par la ventilation augmentent alors considérablement.

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 maintenance 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.

4.3 Ventilation, climatisation et refroidissement

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 (CO₂) 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 CO₂ 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 CO₂ inférieure à 1000 ppm. Selon la norme SIA 382/1, cette valeur correspond à une qualité moyenne de l'air ambiant (RAL 2) et devrait être modifiée lors de la révision de cette norme.

Le CO₂ 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. En revanche, 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, conformément au Cahier technique SIA 2023 pour les bureaux, écoles et surfaces de vente, un débit de 25 m³/h est requis.

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 m³/heure pour chaque chambre à coucher. Un dimensionnement différencié s'effectue selon le Cahier technique SIA 2023 (après 2021, selon la norme SIA 382/5).

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:



Illustration 4.7: Maintenance d'un appareil de ventilation douce. (Source: Ramoneur Suisse)

■ 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 50 % à l'aide de filtres de classe ISO ePM1 (ce qui correspond à l'ancienne 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, au niveau 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 les inspections doivent, pour les installations moyennes et grandes sans humidification, être effectués 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 dé-

termine 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 d'effectuer une première inspection après le montage. Le contrat d'entreprise doit donc définir comment les coûts de l'inspection et des éventuels nettoyages seront réglés.

Aspects particuliers des installations d'air repris

Pour les bouches d'air neuf (BAN) des installations d'air repris, le filtre F7 n'est pas nécessaire si la qualité de l'air extérieur est bonne. À cet égard, il est prévu de renforcer cette exigence en exigeant des filtres de classe ISO ePM₁₀ 50 % au moins pour tous les systèmes de ventilation, y compris le BAN des systèmes d'air repris. Si nécessaire, des filtres d'une classe supérieure ou des pré-filtres peuvent être utilisés.

Les conduits des installations d'air repris s'encrassent autant que les conduits d'air repris des aérations douces. Par conséquent, même dans les installations d'air repris, 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 notam-

ment, 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'humidité relative de l'air baisse d'environ 5 %.

- On peut 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

Tableau 4.8:
Coefficients de performance de générateurs de froid.

*Départ: température de départ,
Retour: température de retour
** COPA: Coefficient de performance annuel;
AET: Amplificateur électrothermique

| Systeme | Température de l'eau froide départ/retour en °C * | COPA resp. AET ** |
|--|---|-------------------|
| Dalles thermoactives ou convecteurs sans freecooling | 18 °C/22 °C | 5 à 7 |
| Dalles thermoactives ou convecteurs avec freecooling | 20 °C/23 °C | 8 à 15 |

nouvelles installations de ventilation, aucun mode de recyclage de l'air n'est prévu. 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 la norme SIA 180 montre qu'un refroidissement est nécessaire, celui-ci devant s'effectuer via des systèmes de conduction d'eau. Dans le cas de ce refroidissement, on peut souvent utiliser les mêmes éléments de construction que pour le chauffage des locaux: 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 des locaux, 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 des locaux 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 des locaux) 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.

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 climatiques 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.

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 P et la hauteur de la pièce H:

- Aération unilatérale: P/H inférieur à 2,5
- Aération transversale: P/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 aération intense de courte durée. 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. Les normes SIA 382/1 et SIA 180 définissent des exigences quantitatives en termes de bruit et de polluants.

Installation d'air repris

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 bouches d'air neuf (BAN). En raison de la protection phonique, de l'encrassement, de la filtration, de la dépression ou du confort thermique, les bouches d'air neuf ne sont pas simplement des trous dans le mur, mais sont des composants relativement complexes. Pour les installations

d'air repris, les points suivants doivent être tout particulièrement pris en compte:

- Les bouches d'air neuf doivent être dimensionnées de manière à ce que la dépression dans la pièce ne dépasse pas 4 à 5 Pa. (Seulement 4 Pa, conformément à la norme SIA 382/5 prévue) Cette exigence ne peut être satisfaite, dans la pratique, que si aucun filtre F7 (ISO ePM₁ 50 %) n'est requis (voir le paragraphe sur l'hygiène). En d'autres termes, les installations de d'air repris ne doivent être envisagées que dans des régions où la qualité de l'air extérieur est bonne (valeur moyenne annuelle PM10 maximum 20 mg/m³).

- 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 d'air repris est environ 30 à 40 % supérieur à celui des ventilations douces.

- Malgré le débit volumique d'air extérieur plus élevé, une installation d'air re-

pris 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.

- Même les poêles peuvent être impactés par la dépression. Des foyers dépendants de l'air ambiant ne doivent donc pas être utilisés dans des logements dotés d'installations de d'air repris. Il est également déconseillé d'utiliser des foyers indépendants de l'air ambiant.

- Lorsque les fenêtres sont ouvertes relativement longtemps, une installation de d'air repris ne fonctionne plus correctement. L'air neuf 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 bouches d'air neuf.

Ventilation douce

Grâce à la récupération de chaleur, les pertes de chaleur par l'aération peuvent être réduites d'environ 80 % avec une ventilation douce par rapport à une aération

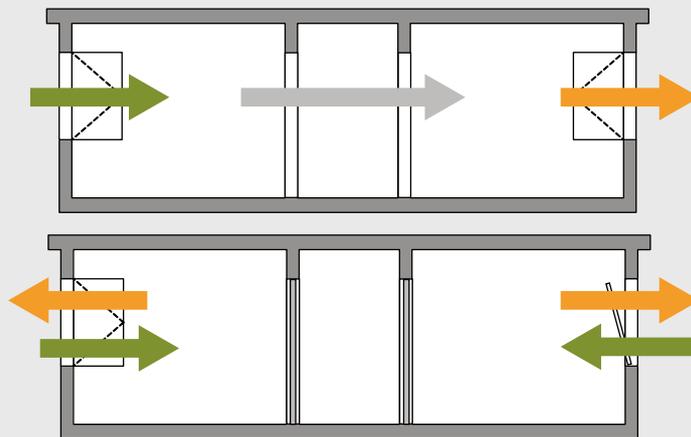


Illustration 4.8:
Aération transversale et unilatérale par les fenêtres.

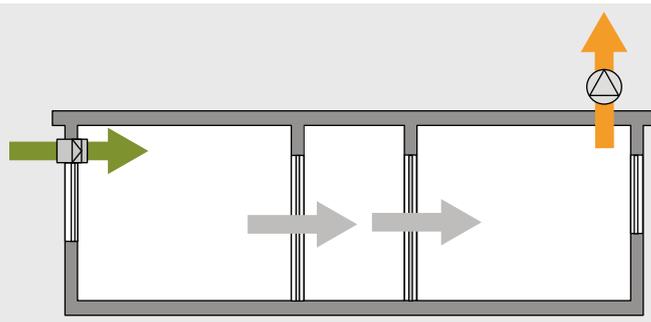


Illustration 4.9:
Schéma d'une installation de ventilation.

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.

La ventilation douce s'est bien établie en Suisse. La qualité des installations réalisées est toutefois encore variable. 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 succinct 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 du poste de cuisson dans les logements

L'extraction d'air du poste 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 (gaines 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 purifient 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.

Des informations complémentaires figurent dans la brochure «Kochstellenlüftung» de SuisseEnergie.

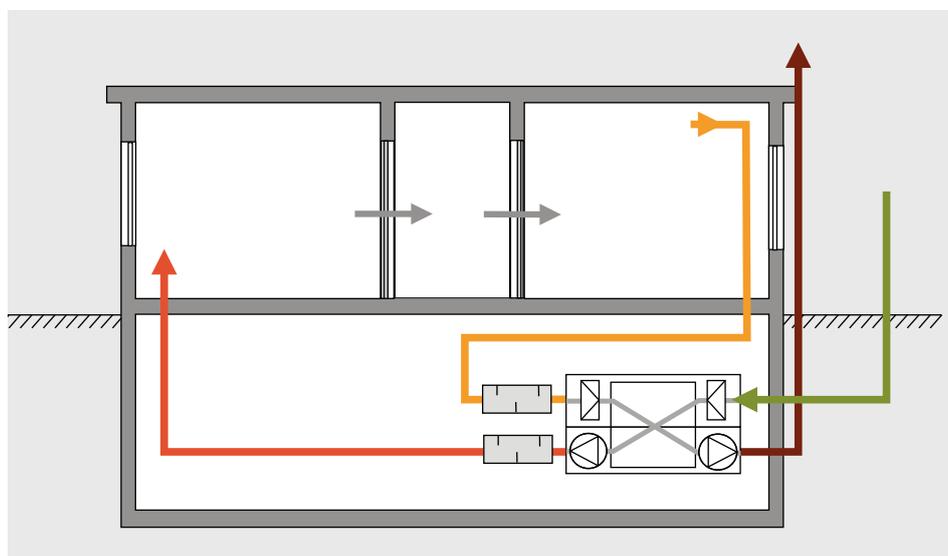


Illustration 4.10:
Principe d'une ventilation douce.

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. Étant donné que la transition est progressive et que la zone proche des bouches 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 bouches d'air maximum 40 m³/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 bouches 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 bouches d'air. 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 bouches d'air fourni ne sont présentes que dans les chambres à coucher mais pas dans le salon ni dans la salle à manger. Étant 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 CO₂ représentée dans l'illustration 4.14 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 bouches d'air en raison de la qualité de l'air ambiant.

Illustration 4.11:
Mouvement de l'air
dans les pièces d'habitation.

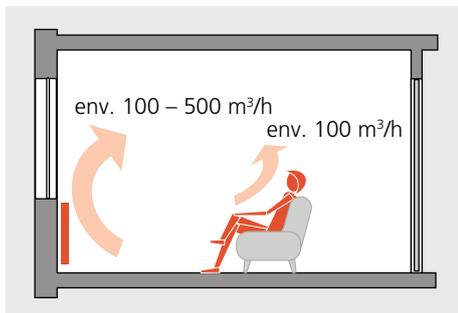


Illustration 4.12:
Position des passages d'air fourni; le flux d'air fourni ne doit pas être orienté dans la zone de séjour.

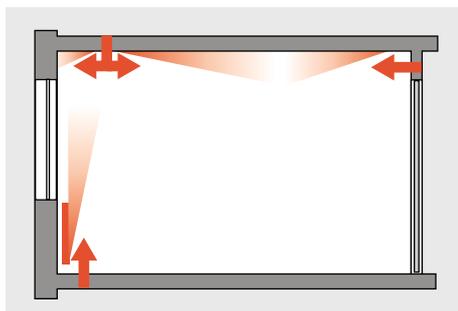


Illustration 4.13:
Exemples de passages d'air fourni.

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 éventuelle-

ment influencer l'écoulement de l'air ambiant, ainsi le placement et le choix des bouches d'air fourni requièrent nettement plus de connaissances spécialisées que dans les bâtiments d'habitation.

En général, on différencie la ventilation mixte et la ventilation source ou par déplacement d'air (Illustr. 4.15). Avec la ventilation mixte, l'air soufflé est mélangé le mieux possible avec l'air ambiant. Ce système présente l'avantage de permettre le placement des bouches 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 quasiment 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/absorbent» 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 mixte

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

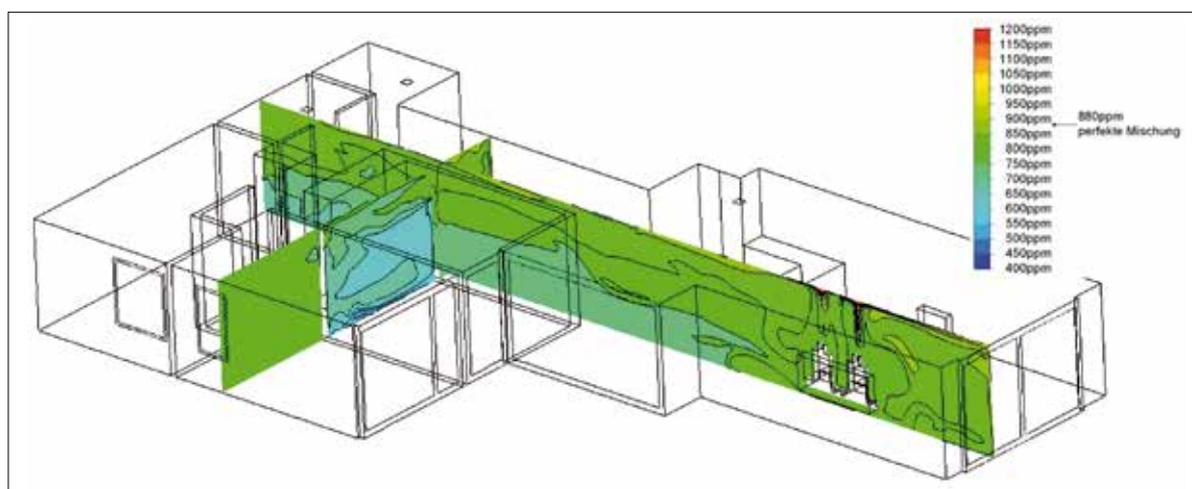


Illustration 4.14:
Concentration de CO_2 pour un écoulement libre de l'air dans le salon.
(Source: AHB 09)

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 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 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 mixtes. 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 mixtes.

- Étant 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 mixte.

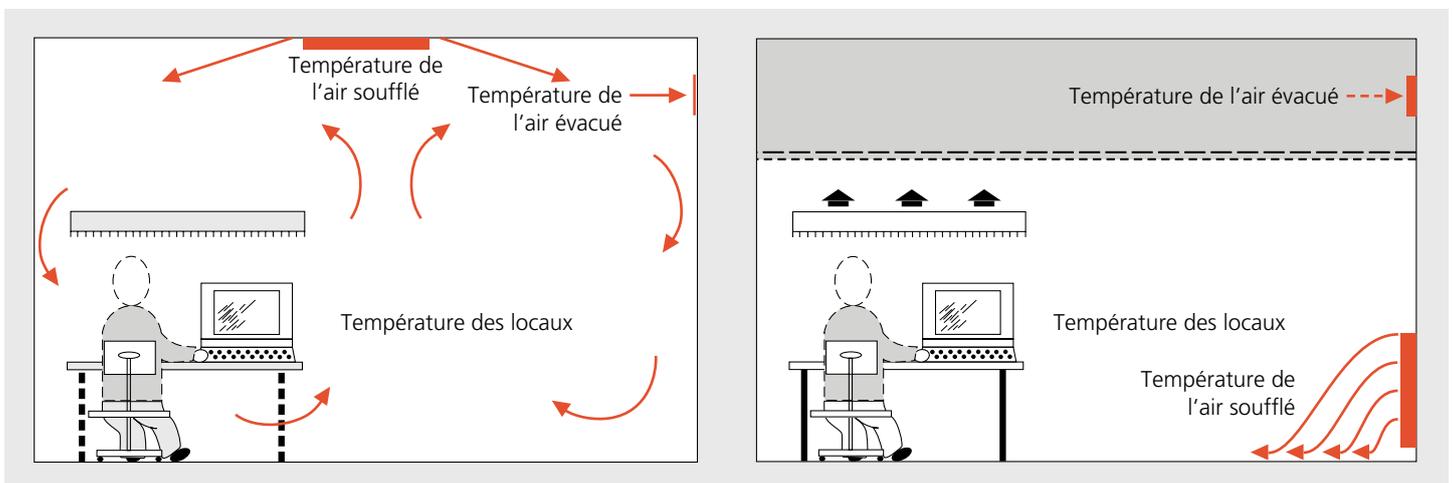
Dans les logements, il s'agit notamment des odeurs de cuisine. Il est donc recommandé d'équiper les ventilateurs par mélange des différentes pièces de programmeurs: lorsqu'un programmeur est actionné, l'échange d'air avec le couloir est interrompu pendant environ une demi-heure. Les odeurs de cuisine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

- Les ventilateurs mixtes produisent des bruits d'écoulement d'air et peuvent affaiblir 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 mixtes 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 CO₂ 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 mixtes 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

Illustration 4.15:
Ventilation mixte
(à gauche) et ventilation transversale
(à droite).
(Quelle: Lindab)



sont des pièces rotatives dont la durée d'utilisation s'élève à environ 10 à 15 ans.

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 pré-

suppose 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.

Déperditions thermiques des conduits et des canalisations

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 récupé-

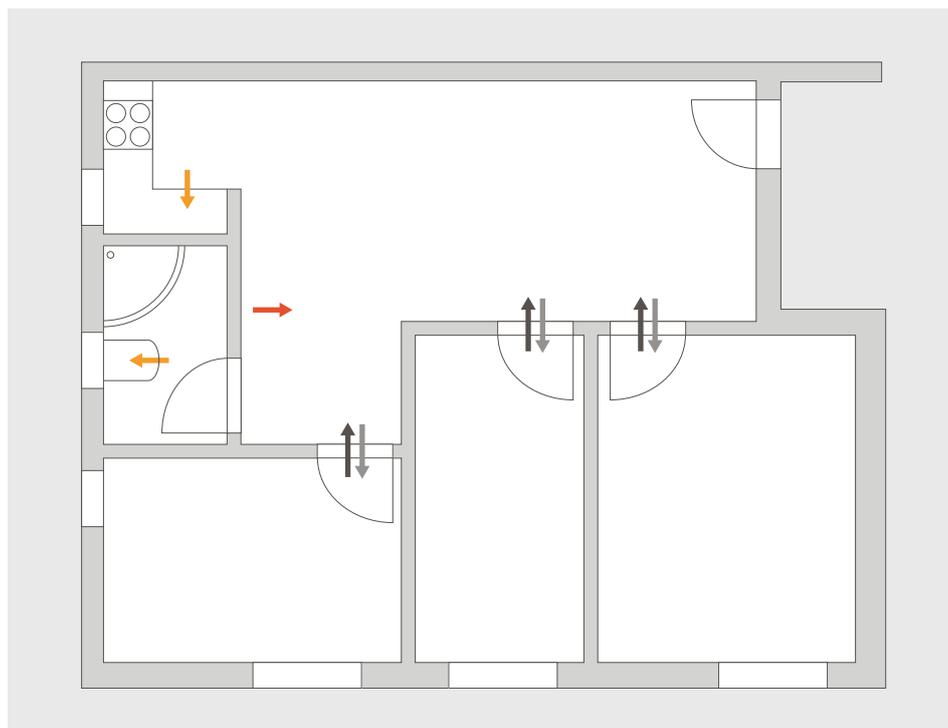
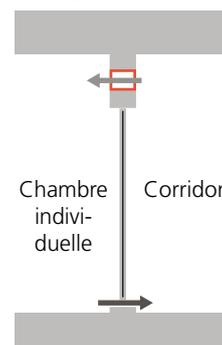


Illustration 4.16:
Principe de la ventilation mixte dans un logement.



ration 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. 4.17). Si cela n'est pas possible, une épaisseur d'isolation de 100 mm est exigée, conformément aux prescriptions énergétiques cantonales.

Planification correcte/professionnelle

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, par exemple, de centaines d'appareils de pièces indivi-

duelles, 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 onéreuses 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 soigneusement 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 multi-logements, 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.

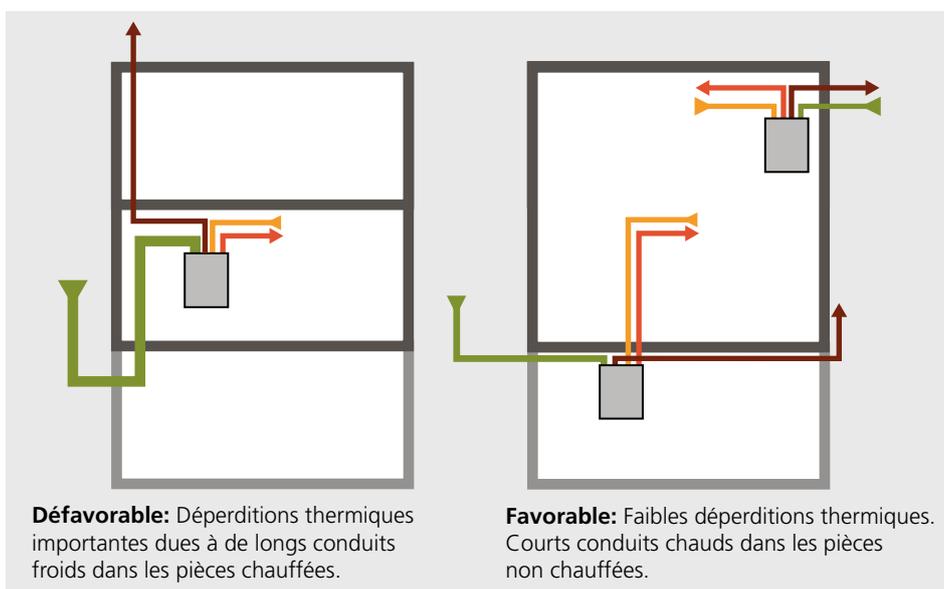


Illustration 4.17:
Schéma avec agencement favorable et défavorable.

Alimentation en air efficace

Dans de nombreuses installations de ventilation, la puissance du ventilateur ne répond pas aux exigences de la norme SIA 382/1. Une ventilation douce doit présenter, pour un débit volumique d'air de 100 m³/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 minimum 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 par 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.

L'étiquette-énergie

De nombreux appareils d'aération douce doivent comporter des étiquettes-énergie. Il est recommandé d'utiliser uniquement les appareils de classe A ou A+. L'inconvénient est que les étiquettes-énergie ne tiennent pas compte de l'antivibrage. Il convient donc d'opter pour des solutions conformes au Cahier technique SIA 2023 et à la norme SIA 382/5.

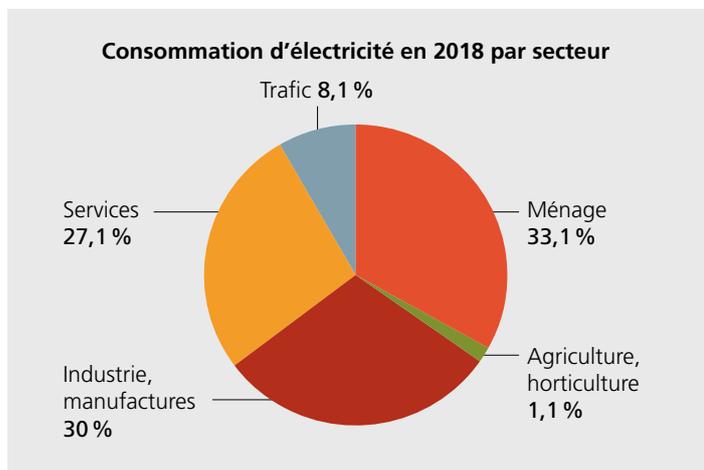
Beate Weickgenannt 4.4 Appareils ménagers

Classification des appareils

Le développement des appareils électriques est étroitement lié à l'utilisation du courant électrique au début du siècle dernier. Les tâches domestiques principalement réalisées à la main ou à l'aide d'ustensiles mécaniques simples furent simplifiées et raccourcies au fil de l'évolution des appareils électriques [4]. Les appareils électriques étant très nombreux, il est nécessaire de les classer en différentes catégories. On les différencie en fonction de la couleur de leur boîtier:

- **Produit blanc:** appareils ménagers tels que les réfrigérateurs, les lave-linge, les sèche-linge, mais aussi les cuisinières électriques etc.
- **Produit gris:** appareils d'information et de communication, tels que les ordinateurs, téléphones portables, smartphones etc.
- **Produit brun:** appareils électroniques de loisirs, tels que le téléviseur, la radio, la chaîne stéréo etc.

Illustration 4.18: Consommation d'électricité en 2018 par secteur. (Source: Office fédéral de l'énergie OFEN, Statistique de l'électricité suisse 2018)



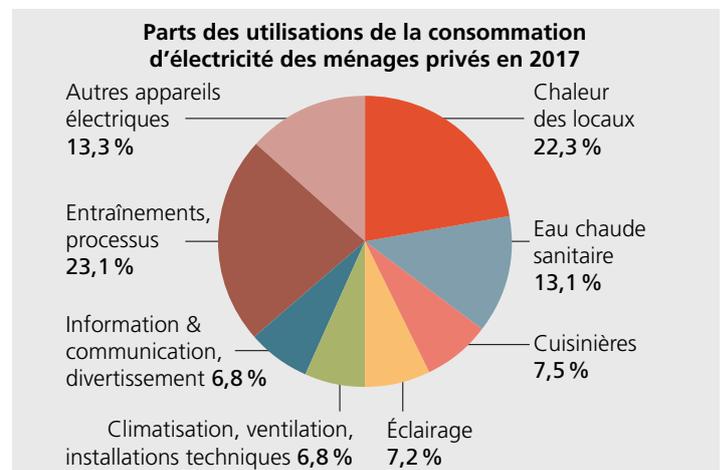
Si, par le passé, la délimitation entre les différentes catégories était claire, elle a tendance à disparaître avec la hausse de la multifonctionnalité et le degré de technicité croissant des appareils. Ainsi, il est aujourd'hui normal de regarder un film sur son smartphone ou de commander à distance ses appareils ménagers en réseau.

Consommation d'électricité des appareils en général

Dans le contexte actuel de sortie du nucléaire et de hausse de la consommation d'électricité, il est indispensable de se pencher de plus près sur le thème des appareils ménagers. Ce n'est pas un hasard si l'un des axes prioritaires de la Stratégie énergétique 2050 de la Confédération est, outre le développement des énergies renouvelables, l'augmentation de l'efficacité énergétique. Tout comme les secteurs du bâtiment, de la mobilité et de l'industrie, celui des appareils doit également bénéficier d'une amélioration de l'efficacité énergétique [5]. De nos jours, il existe un

Illustration 4.19: Parts des utilisations de la consommation d'électricité des ménages privés en 2017. (Source: [7])

Tableau 4.9 (en bas): Consommation d'électricité des ménages privés selon l'usage en TWh de 2000 à 2017 (Source: [7])



| Usage | 2000 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | Différence 2000-2017 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|----------------------|
| Chauffage des locaux | 3,4 | 3,7 | 4,1 | 4,6 | 3,6 | 4,0 | 4,3 | 4,2 | +25,4 % |
| Eau chaude sanitaire | 2,3 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,5 | +6,4 % |
| Cuisinières | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | +6,7 % |
| Éclairage | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | -13,8 % |
| Climatisation, ventilation, installations techniques | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | +28,4 % |
| Information et communication y c. divertissement | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,4 | 1,3 | 1,3 | -14,5 % |
| Entraînements, processus | 3,6 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,4 | 4,4 | +21,1 % |
| Autres appareils électriques | 1,3 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,5 | +95,0 % |

grand nombre d'appareils qui facilitent notre travail au quotidien.

L'illustration 4.18 montre que le secteur des ménages représente la part la plus importante de la consommation d'électricité (33,1 % ou 19,1 milliards de kWh) [6]. Si l'on observe de plus près la consommation d'électricité, on constate une répartition selon l'illustration 4.19 et le Tableau 4.9 [7]. L'usage ayant le pourcentage le plus important (23,1 %) correspond aux «Entraînements, processus». Il comprend le lavage et le séchage, la réfrigération et la congélation, le lavage de la vaisselle et les appareils auxiliaires. Le Tableau 4.10 montre les consommations de ces processus.

Heureusement, la consommation d'électricité liée à l'éclairage, à l'information et à la communication, aux loisirs ainsi qu'à la réfrigération et à la congélation pendant la période de référence de 2000 à 2017 a chuté. L'instauration de mesures, telles que l'interdiction des lampes à incandescence ou la réglementation relative à la mise sur le marché d'appareils de réfrigération de la classe d'efficacité A++ ou A+++ , semble être efficace. On enregistre, en revanche, une hausse substantielle de la consommation pour les usages «Lavage et séchage» ainsi que les «Autres appareils électriques». Raison probable: davantage de ménages disposent désormais de leurs propres lave-linge et sèche-linge (évolution structurelle: les buanderies communes disparaissent au profit de l'installation de machines individuelles dans les ménages). La hausse de la consommation des autres appareils électriques s'explique par l'augmentation constante du nombre d'appareils électriques auxiliaires dans les ménages.

Tableau 4.10:
Consommation d'électricité pour l'éclairage, les cuisinières et les appareils électriques en 2017 et différence entre 2000 à 2017 en %. (Source: compilé à partir de [7])

| Usage | 2017 | Différence 2000–2017 |
|--|---------|----------------------|
| Cuisinières | 1,4 TWh | + 6,7 % |
| Éclairage | 1,4 TWh | – 13,8 % |
| Information et communication y c. divertissement | 1,3 TWh | – 14,5 % |
| Refroidir et congeler | 1,7 TWh | – 12,4 % |
| Lavage et séchage | 1,4 TWh | + 97,7 % |
| Autres appareils électriques | 2,5 TWh | + 95,0 % |

L'étiquette-énergie

L'étiquette-énergie introduite dans l'UE depuis 1996 et en Suisse depuis 2002 informe sur les besoins en énergie et d'autres caractéristiques d'utilisation (p. ex. la consommation d'eau ou le niveau sonore) des appareils (Illustr. 4.20). L'étiquette permet au consommateur de comparer les appareils entre eux et facilite la décision d'achat. Elle est composée de sept niveaux d'efficacité énergétique, allant de G (consommation d'énergie la plus élevée) à A (consommation d'énergie la plus faible). En raison du progrès technologique, les catégories A+, A++ et A+++ ont été créées pour les appareils dont la consommation d'énergie est encore nettement plus faible. L'amélioration permanente des appareils entraîne l'évolution régulière des étiquettes (nouvelle étiquette-énergie prévue à partir de mars 2021 [8]). L'étiquette-énergie permet également de réglementer la mise sur le marché des appareils ou sert d'instrument de l'économie de marché. L'interdiction depuis 2009 de la vente d'ampoules inefficaces (lampes à incandescence) en est un exemple. Depuis, l'étiquette-énergie est apposée sur un grand nombre d'appareils et éléments de construction (fenêtres, robinets etc.) L'illustration 4.21 présente un aperçu des appareils ménagers dotés de l'étiquette-énergie.

Illustration 4.20:
Étiquette énergétique d'un lave-vaisselle à titre d'exemple. (Source: SuisseEnergie)

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 réglementation



Le label énergétique Energy Star pour les appareils de bureau

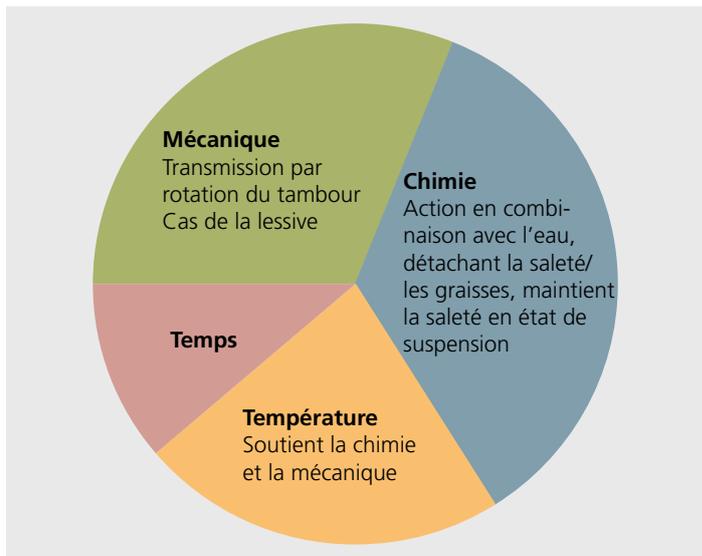
Le label «Energy Star» distingue les appareils des technologies de l’information et de la communication efficaces sur le plan énergétique. Il doit faciliter la décision d’achat des consommateurs. Ce programme volontaire est soutenu par la Confédération (SuisseEnergie). Fabricants, importateurs et revendeurs peuvent inscrire leurs appareils en ligne s’ils sont conformes aux exigences minimales établies. Seul un quart des appareils disponibles sur le marché satisfont ces exigences [10].

Comportement des utilisateurs

Choisir un appareil efficace sur le plan énergétique, c’est faire un premier pas vers une utilisation rationnelle de l’électricité. Cependant, le bon choix quant à la taille des appareils et à leur lieu d’installation et le comportement des utilisateurs ont également une influence importante sur la consommation d’électricité. Un lave-linge efficace sur le plan énergétique, qui n’est rempli qu’à moitié, mais fonctionne par

conséquent plusieurs fois par semaine peut, dans certains cas, consommer plus d’énergie qu’une machine moins efficace, remplie de manière optimale et qui n’est donc utilisée qu’une fois par semaine. Cette situation est particulièrement vraie pour les appareils utilisés toute la journée (réfrigérateur) ou très fréquemment (cuisine électrique, four). Le choix du pro-

Illustration 4.22: Cycle de lavage selon Sinner, à l’exemple d’un lave-linge. (Source: [11])



| CLASSE | A+++ | A++ | A+ | A | B | C | D | E | F | G | Remarques |
|--|------|-----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Appareils ménagers | | | | | | | | | | | |
| Appareils de réfrigération et de congélation | ■ | ■ | | | | | | | | | Armoires à vin: A autorisés, appareils non compresseurs jusqu’à 60 litres: A+++ à D autorisés Machines avec volumes < 4 kg: A+++ à A autorisés |
| Lave-linge | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | |
| Tumblers | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | |
| Sèche-linge | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | |
| Fours | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | |
| Lave-vaisselle | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | |
| Hottes d’aspiration | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | Classe E interdite à partir de février 2019 |
| → à partir de 2020 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |
| Machines à café | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | |
| Climatiseurs | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | |
| Aspirateurs | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | |
| Déshumidificateurs | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | sur base volontaire |
| LUMINAIRES | | | | | | | | | | | |
| | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | |
| TÉLÉVISEURS | | | | | | | | | | | |
| | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | |
| → à partir de 2020 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | |

Illustration 4.21: Appareils électroménagers avec étiquette-énergie et leur classe d’efficacité. (Source: SuisseEnergie)

gramme adapté est tout aussi important. Beaucoup d'utilisateurs se demandent pourquoi les programmes dits «Eco» durent très longtemps (2 à 3 heures). Le cercle de Sinner (Illustr. 4.22) en apporte la réponse. Le résultat de lavage est influencé par quatre facteurs: la température, le temps d'action, l'action chimique et l'action mécanique. Une grande part de la consommation d'énergie est consacrée au chauffage de l'eau. Si l'on diminue ce facteur, il faut modifier au moins l'un des autres facteurs (dans certains cas le temps d'action).

Certains appareils disposent d'un raccordement à l'eau chaude, ce qui permet également d'économiser de l'énergie. Pour cela, il est toutefois impératif que le chauffe-eau ne soit pas trop éloigné de l'appareil ménager et que l'eau chaude sanitaire ne soit pas chauffée électriquement [12]. Il existe une multitude d'autres mesures d'économie d'énergie, comme par exemple:

- Mettre un couvercle sur la casserole pendant la cuisson
- Utiliser la chaleur résiduelle des cuisinières électriques à plaques en fonte ou des filaments de chauffage
- Ne pas mettre d'aliments chauds au réfrigérateur
- Décongeler les aliments congelés dans le réfrigérateur etc.

Consommation en veille

Le mode veille dont disposent de nombreux appareils électroniques de loisirs ainsi que de plus en plus d'appareils ménagers en réseau ne doit pas être négligé. L'affichage de l'heure et de l'état de l'appareil ou la disposition à recevoir un signal radio émis par la télécommande signifient que les appareils consomment de l'électricité même éteints. Des dispositions légales limitent la valeur de veille des appareils neufs entre 0,3 et 1 W. Pour les appareils à réseaux de communication filaires ou sans fil, la limite se situe entre 3 et 8 W. Ces puissances semblent relativement faibles, mais elles sont applicables 24h/24 et 365 jours par an. En théorie, on pourrait économiser 700 millions de kWh par an en réduisant la consommation en veille dans toute la Suisse [13] (Illustr. 4.23). Les utilisateurs peuvent diminuer la consommation en veille grâce à des prises multiples et des prises à interrupteur ou des minuteries (à faible consommation en veille). Débrancher la fiche secteur est une mesure peu pratique mais très efficace.

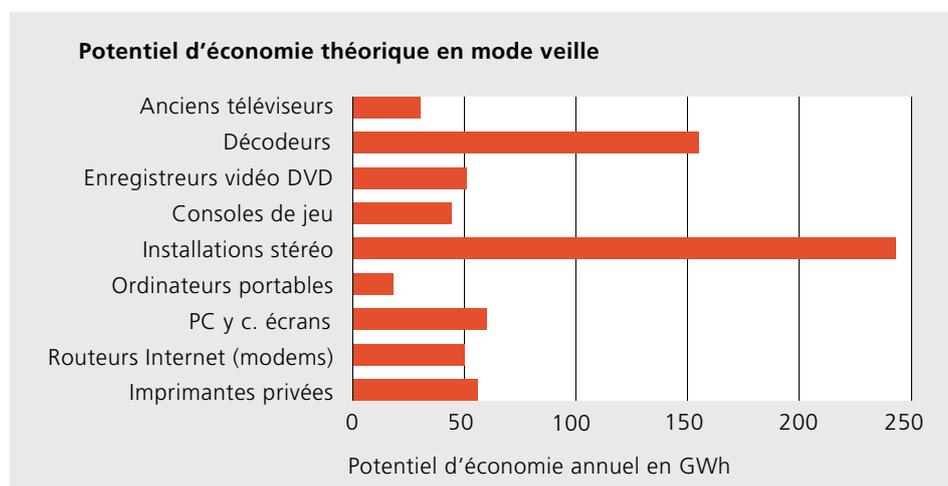


Illustration 4.23: Potentiel d'économie théorique en mode veille [13].

4.5 Éclairage

Grandeurs relatives à la technique d'éclairage

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 du rayonnement électromagnétique. Les quatre principales grandeurs relatives à la technique d'éclairage, qui permettent de planifier les installations d'éclairage, les lampes et les luminaires et de les évaluer tant sur le plan qualitatif qu'énergétique, sont présentées dans le Tableau 4.11.

Exigences techniques de l'installation d'éclairage

L'être humain qui réalise certaines activités dans les espaces intérieurs devrait être au centre de la planification d'une installation d'éclairage. La norme SN EN 12464-1 définit les critères qualitatifs et quantitatifs de

l'éclairage [14] qui permettent de satisfaire aux besoins de confort visuel (bien-être et disponibilité au travail), de performance visuelle (exécution de la tâche visuelle) et de sécurité des personnes (Illustr. 4.24).

Dans un second temps, l'éclairage d'une pièce peut participer à son aménagement, à la création d'une ambiance et mettre en valeur l'architecture. Dans l'idéal, ces deux points de vue (besoins des personnes et aménagement) sont pris en compte dans

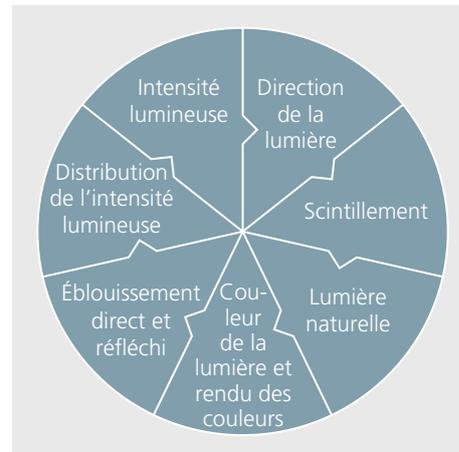


Illustration 4.24: Caractéristique de la qualité de l'éclairage selon SN EN 12464-1:2011. (Source: Trilux)

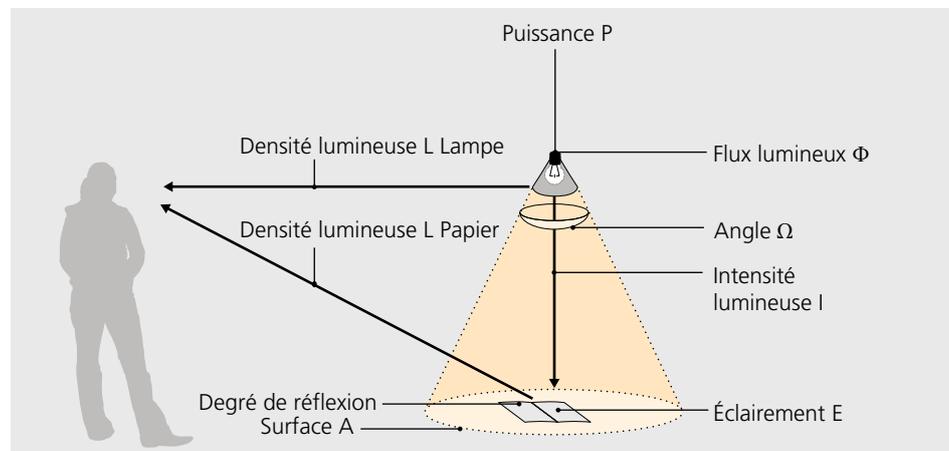


Illustration 4.25: Relation entre les grandeurs relatives à la technique d'éclairage. (Source: vdf Hochschulverlag)

| | | | |
|----------------------------|--------|--|---|
| Flux lumineux | Φ | Lumen (lm) | Quantité de lumière émise par une lampe. La quantité de lumière émise dépend de la quantité d'énergie électrique qui est mise dans la lampe et de l'efficacité avec laquelle le processus de conversion a lieu. |
| Intensité lumineuse | I | Candela (cd) | Le flux lumineux émis dans une direction spécifique (angle solide). |
| Éclairement | E | Lux (lx) | Le flux lumineux incident sur une surface A donnée. L'éclairement est défini pour les zones de travail intérieures dans la norme SN EN 12464-1 (Lumière et éclairage – Éclairage des lieux de travail – Partie 1: Lieux de travail intérieurs). |
| Densité lumineuse | L | Candela par surface (cd/m^2) | C'est la luminosité perçue par l'œil d'un objet auto-lumineux (lampe ou luminaire) ou d'une surface éclairée. |

Tableau 4.11: Relation entre les grandeurs relatives à la technique d'éclairage.

la planification de l'éclairage. À ceux-là viennent s'ajouter les exigences en matière d'efficacité énergétique de l'installation d'éclairage.

Consommation électrique de l'éclairage

En 2017, l'éclairage représentait 12,2 % de la consommation d'électricité de la Suisse, soit 7,03 milliards de kWh. Cela concerne l'éclairage intérieur comme extérieur [7]. Si l'on observe la répartition par secteur de la consommation électrique de l'éclairage, on constate avec plaisir que la part des ménages privés a reculé (Illustr. 4.26; -13,8 % entre 2000 et 2017), ce qui est dû à l'interdiction progressive des lampes inefficaces.

La situation est toute autre dans le secteur des services (Illustr. 4.27), puisque la part de l'éclairage (23,8 %, 4,2 milliards de kWh) est presque aussi importante que la part de la climatisation, de la ventilation et des installations techniques. Il faut toutefois noter qu'elle intègre également la part de l'éclairage du secteur des transports (éclairage des routes et des gares).

Le développement des lampes et luminaires dotés de la technologie LED efficace sur le plan énergétique représente une avancée importante en matière d'économie d'énergie dans le domaine de l'éclairage. La simple utilisation de la technologie LED ne suffit toutefois pas toujours à garantir automatiquement un

éclairage efficace sur le plan énergétique, comme le montre ce qui suit. La consommation d'électricité des installations d'éclairage est calculée lors de la phase de planification de la manière suivante [15]:

$$E_L = \frac{p_L \cdot t_L}{1000}$$

E_L besoin spécifique en électricité pour l'éclairage en kWh/(m²a)

p_L puissance spécifique pour l'éclairage en W/m²

t_L heures à pleine charge de l'éclairage en h/a

Le besoin en électricité est égal au produit de la puissance spécifique multipliée par les heures à pleine charge. Pour planifier et exploiter une installation d'éclairage dans les conditions d'efficacité énergétique les plus optimales, il faut garantir que la puissance électrique appelée soit faible et que l'installation d'éclairage soit allumée le moins souvent possible. L'appel de puissance est principalement influencé par l'efficacité des lampes et des luminaires, mais aussi par l'aménagement de la pièce et le niveau d'éclairement souhaité. Lorsqu'aucun réglage ou aucune commande de l'éclairage n'est prévu, la durée de commutation dépend de l'utilisateur.

Illustration 4.26:
Parts en pour cent des utilisations de la consommation d'électricité 2017.
(Source: [7])

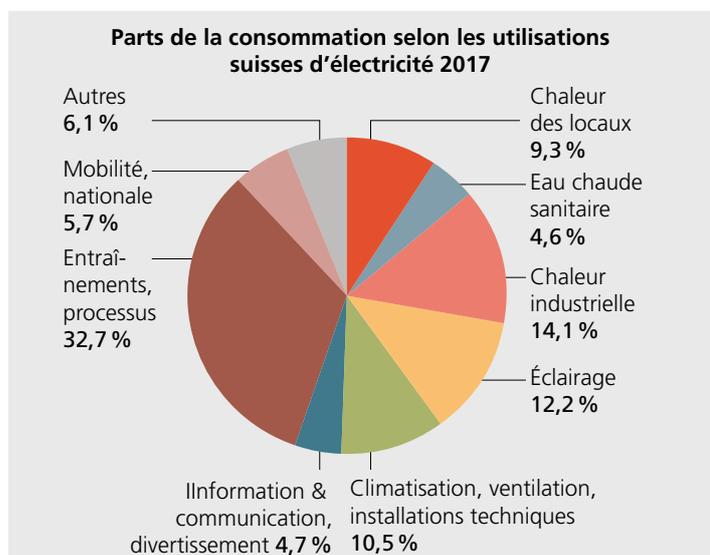
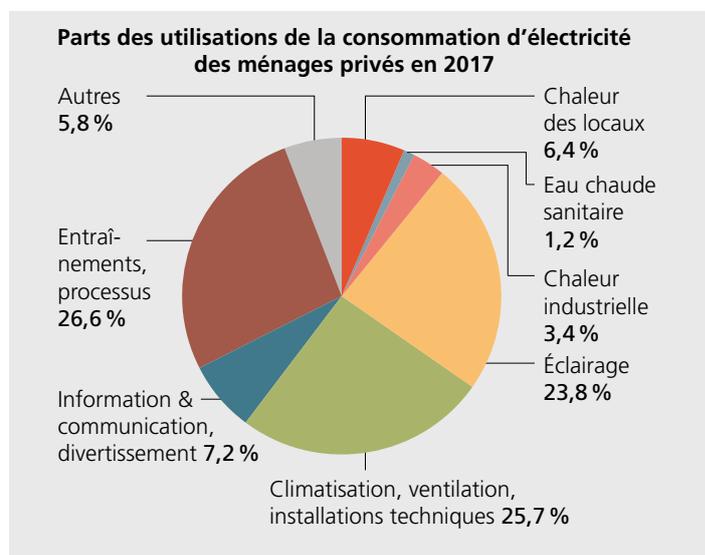


Illustration 4.27:
Parts en pour cent des utilisations de la consommation d'électricité du secteur des services en 2017. (Source: [7])



Efficacité énergétique des lampes et luminaires

Trois technologies permettent de générer de la lumière:

- le rayonnement thermique (lampes à incandescence, lampes halogènes etc.)
- la décharge de gaz (lampes fluorescentes, lampes à économie d'énergie etc.)
- l'électroluminescence (LED; OLED).

L'efficacité énergétique d'une lampe est déterminée par le rapport entre le flux lumineux produit et la puissance électrique absorbée et est appelée efficacité lumineuse.

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

Le Tableau 4.12 montre à quel point l'efficacité lumineuse des lampes diffère selon les technologies employées. Ainsi, la lampe LED d'une puissance électrique d'un watt produit environ 8 fois plus de lumière qu'une lampe halogène et est donc nettement plus efficace sur le plan énergétique. Cependant, les données des lampes

ou des luminaires méritent d'être étudiées plus attentivement, comme le montre l'illustration 4.28. La technologie LED n'est pas toujours efficace sur le plan énergétique. Si, pour la lampe à incandescence, les puissances étaient encore attribuées à une clarté (ou un flux lumineux) définie, une lampe LED de 6 W par exemple peut générer un flux lumineux plus élevé ou plus faible.

La technologie LED a permis un autre progrès: les luminaires et les lampes ne sont plus séparés les uns des autres par un culot et une douille. Les modules LED (ou platines et puces) sont intégrés dans le luminaire. L'efficacité énergétique des luminaires est donc également caractérisée par l'efficacité lumineuse. Le rendement anciennement utilisé est désormais insuffisant pour décrire cette qualité. L'efficacité lumineuse d'un luminaire est le rapport entre son flux lumineux et sa puissance (puissance absorbée de la lampe et des appareils de fonctionnement, P_{sys}). Les luminaires dotés d'efficacité lumineuses supérieures à 100 lm/W sont désormais courants.

Tableau 4.12:
Comparaison de l'efficacité lumineuse des lampes disponibles dans le commerce; le flux lumineux et la puissance sont les spécifications du fabricant sur l'emballage de la lampe.

| Technologie | Lampe à incandescence | Décharge de gaz | Électroluminescence |
|----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------|
| Type de lampe | Lampe à incandescence halogène | Lampe économique | Lampe LED |
| Flux lumineux | 850 lm | 810 lm | 806 lm |
| Puissance | 53 W | 15 W | 6 W |
| Efficacité lumineuse | ~16 lm/W | ~54 lm/W | ~134 lm/W |

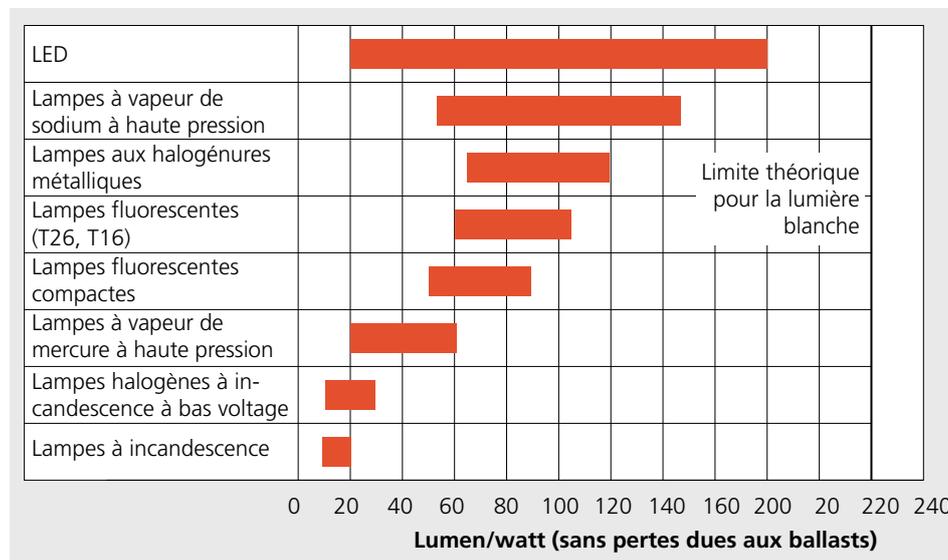


Illustration 4.28:
Efficacités lumineuses de différents luminaires.
(Source: Licht.de)

Influence de la pièce et du luminaire

De par sa géométrie (longueur, largeur et hauteur), son aménagement (degré de réflexion) et son utilisation, la pièce a également une influence sur l'efficacité énergétique de l'installation d'éclairage. Il est évident que les grandes surfaces nécessitent davantage de luminaires (et par conséquent plus de puissance électrique) pour obtenir une certaine clarté, que les surfaces plus petites. La loi de la distance photométrique indique que l'éclairement est réduit d'un quart, lorsque la distance entre la source lumineuse et la surface éclairée est doublée. La hauteur de la pièce

et, par conséquent, la distance entre le luminaire et la surface à éclairer constituent donc aussi un facteur d'influence considérable. La luminosité des surfaces de délimitation de l'espace, telles que le sol, le plafond et les murs, permet de bien réfléchir la lumière émise et d'éviter les déperditions. La caractéristique de rayonnement du luminaire joue également un rôle important à cet égard. Par exemple, si celui-ci éclaire le plafond avec une proportion élevée de lumière indirecte, le plafond devra être le plus clair possible pour réfléchir un maximum de lumière (Tabl. 4.13).

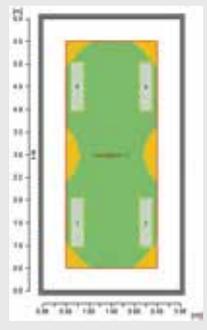
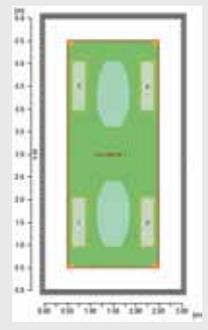
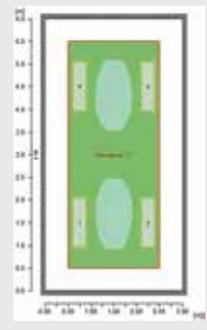
| Réflexions dans la pièce | sombres | normales | claires |
|-------------------------------|--|---|--|
| |  |  |  |
| Plafond | 30 % | 70 % | 80 % |
| Murs | 30 % | 50 % | 50 % |
| Plancher | 10 % | 20 % | 30 % |
| Intensité d'éclairage moyenne | 575 lx | 638 lx | 650 lx |

Tableau 4.13: Influence des réflexions sur l'intensité d'éclairage (même grandeur de pièce et même luminaire; calcul à l'aide de Relux Desktop).

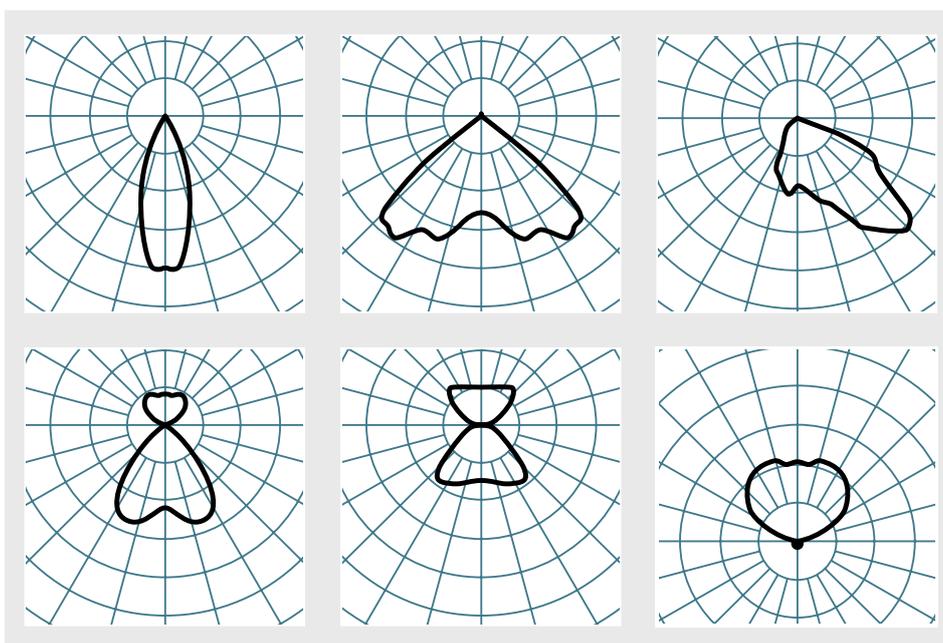


Illustration 4.29: Exemples de différentes courbes de distribution de l'intensité lumineuse (de haut en bas, de gauche à droite): rayonnement étroit, rayonnement large, rayonnement asymétrique; en bas, de gauche à droite: principalement rayonnement direct, rayonnement uniforme, rayonnement indirect. (Source: Trilux)

La caractéristique de rayonnement des luminaires est représentée par la courbe de répartition de l'intensité lumineuse. L'intensité lumineuse mesurée dans des conditions normalisées (p. ex. position d'utilisation, température ambiante) est intégrée dans un système de coordonnées polaires. Pour pouvoir comparer les courbes de répartition de l'intensité lumineuse de tous les luminaires, l'intensité lumineuse est appliquée aux 1000 lumens des lampes installées dans les luminaires. L'illustration 4.24 montre différentes courbes de répartition de l'intensité lumineuse de divers luminaires. Lorsque cette courbe est représentée sur la fiche technique du luminaire, le concepteur d'éclairage sait en un coup d'œil comment le luminaire rayonne sa lumière et peut ainsi choisir, selon les besoins, un luminaire d'une certaine caractéristique de rayonnement.

L'éclairage à atteindre est déterminé par l'utilisation de la pièce. Un bureau a besoin, par exemple, de 500 lx, alors qu'une kitchenette n'exige que 200 lx. Naturellement, la production de 500 lx nécessite davantage de puissance électrique que pour 200 lx (avec un luminaire identique). Du fait de l'encrassement des pièces et des luminaires ainsi que de la perte de flux lumineux des lampes pendant la durée de fonctionnement (vieillesse) et des pannes de certaines lampes, le flux lumineux produit de l'installation d'éclairage diminue au fil du temps, et avec lui l'éclairage. Cet aspect est pris en compte dans la planification de l'éclairage grâce à un facteur de maintenance (FM ou Main-

tenance Factor MF). Il s'agit, en principe, d'une marge de sécurité afin que l'éclairage ne descende pas en dessous de la valeur recommandée par la norme pendant un certain intervalle de maintenance. D'un point de vue énergétique, il est judicieux de réduire au maximum l'intervalle de maintenance, car cela permet d'installer un système d'éclairage ayant une valeur à neuf plus faible (Illustr. 4.30). De même, une faible valeur à neuf de l'éclairage signifie aussi moins de puissance nécessaire.

Gestion de l'éclairage

Une installation d'éclairage ne fonctionne pas toujours à la puissance maximale (Illustr. 4.31). Cela signifie que la lumière est éteinte ou que son intensité varie en fonction de la lumière naturelle disponible. Les heures à pleine charge sont les heures pendant lesquelles l'installation d'éclairage fonctionne à pleine charge (à consommation d'énergie identique). Le carré gris dans le graphique de l'illustration 4.31 présente ainsi la même surface que la surface rouge sous la courbe.

La réduction du temps de fonctionnement est un facteur déterminant pour économiser de l'énergie au niveau de l'éclairage. L'utilisation de la lumière naturelle ou la réaction à la présence des personnes peut être garantie grâce à une commande et un réglage adaptés de l'éclairage via des capteurs. La quantité d'énergie ainsi économisée dépend énormément de la qualité de l'approvisionnement en lumière naturelle de l'espace intérieur. Le facteur de lumière

Illustration 4.30: Évolution de l'intensité lumineuse d'une installation sur la durée d'exploitation. (Source: Trilux)

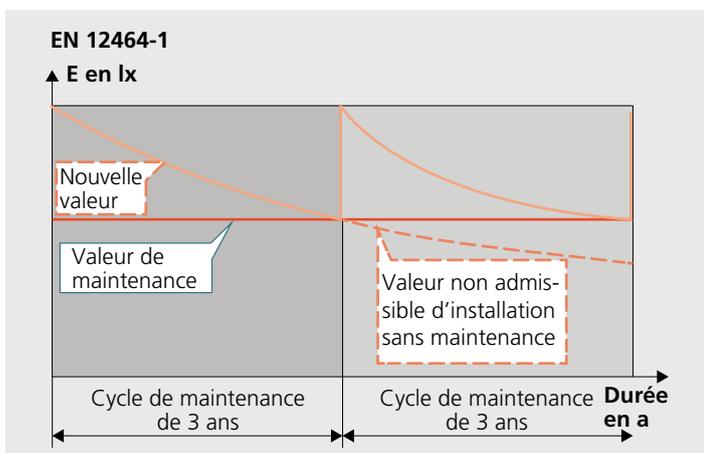
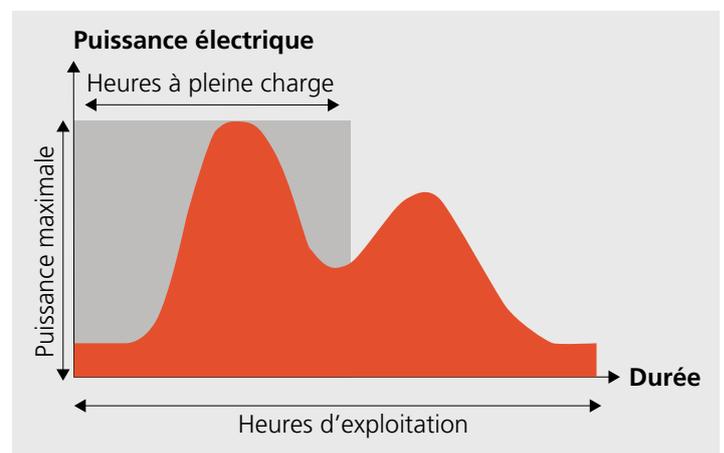


Illustration 4.31: Heures à pleine charge selon SIA 387/4.



naturelle D est l'indicateur communément employé de l'approvisionnement en lumière naturelle. Il est défini comme le rapport entre l'éclairement reçu en un point dans une pièce ($E_{\text{intérieur}}$) et l'éclairement à l'extérieur.

$$D = \frac{E_{\text{intérieur}}}{E_{\text{extérieur}}} \cdot 100$$

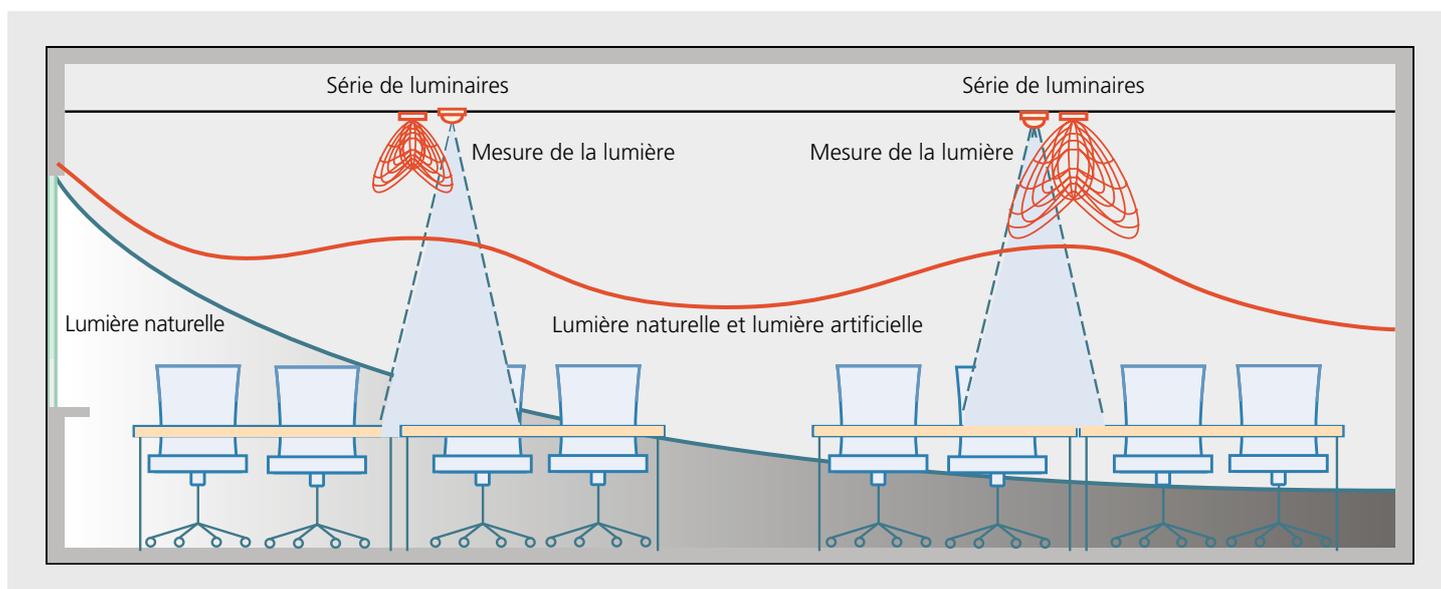
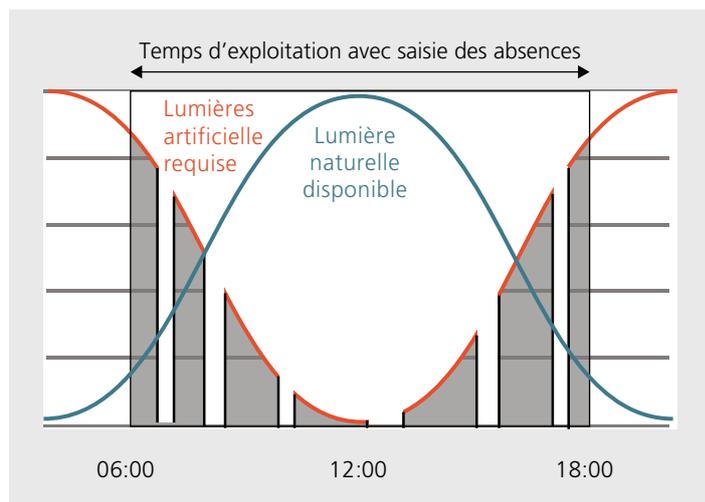
Un facteur de lumière naturelle inférieur à 2 % est considéré comme insuffisant dans les espaces de travail [16]. La taille des surfaces vitrées et leur positionnement, le degré de transmission lumineuse des vitres, l'ombrage lointain de l'édifice ainsi que la qualité de la protection solaire et sa commande influencent l'utilisation de la lumière naturelle dans les bâtiments.

L'illustration 4.32 montre l'interaction entre la lumière naturelle (courbe bleue: tracé du facteur de lumière naturelle) et l'éclairage électrique (courbe rouge). La rangée de luminaires près de la fenêtre doit émettre moins de lumière que la rangée de luminaires au fond de la pièce où la lumière naturelle parvient moins. L'utilisation de la lumière naturelle dans les espaces intérieurs permet de réaliser jusqu'à 70 % d'économie d'énergie [17]. Parallèlement à l'utilisation de la lumière naturelle, des capteurs permettent également de détecter la présence ou l'absence de personnes dans une pièce et ainsi d'allumer ou d'éteindre la lumière. Ces deux mesures

Illustration 4.32:
Évolution de l'intensité d'éclairage de la lumière naturelle (en bleu) et de l'éclairage électrique rajouté (en rouge) d'une salle de classe munie de fenêtres. (Source: Trilux)

conduisent à des économies d'énergie considérables au niveau de l'éclairage (Illustr. 4.33).

Illustration 4.33:
Une gestion appropriée de la lumière permet d'économiser beaucoup d'énergie. (Source: Trilux)



Armin Binz 4.6 Photovoltaïque

Le photovoltaïque en plein boom

Le photovoltaïque est en passe de devenir l'un des piliers de l'approvisionnement en électricité de demain. Deux raisons en sont à l'origine:

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 p.ex. 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 standard 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. 4.34). Étant 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 modèles de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC 2014). Sous le titre «Autoproduction d'électricité dans les nouvelles constructions», il est demandé: «Les nouvelles constructions produisent elles-mêmes une partie de l'électricité dont elles ont besoin.» Et sous forme quantifiée: «Le sys-

tème de production d'électricité installé dans, sur ou autour du bâtiment dans le cas de nouvelles constructions doit être d'au moins 10 W par m² SRE, et jamais de 30 kW ou plus.» Ceci permet de concrétiser les objectifs, publiés auparavant dans les lignes directrices de la Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK) où il a été admis qu'à partir de 2020, les nouvelles constructions devraient «pouvoir au maximum à leur propre approvisionnement en chaleur et à une part adéquate de leur électricité, sur toute l'année». Les systèmes photovoltaïques ont donc une place de choix dans la construction efficiente de l'avenir.

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 16 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.

Prix moyen des modules PV en Europa/Wp, 2018 (euro par watt)

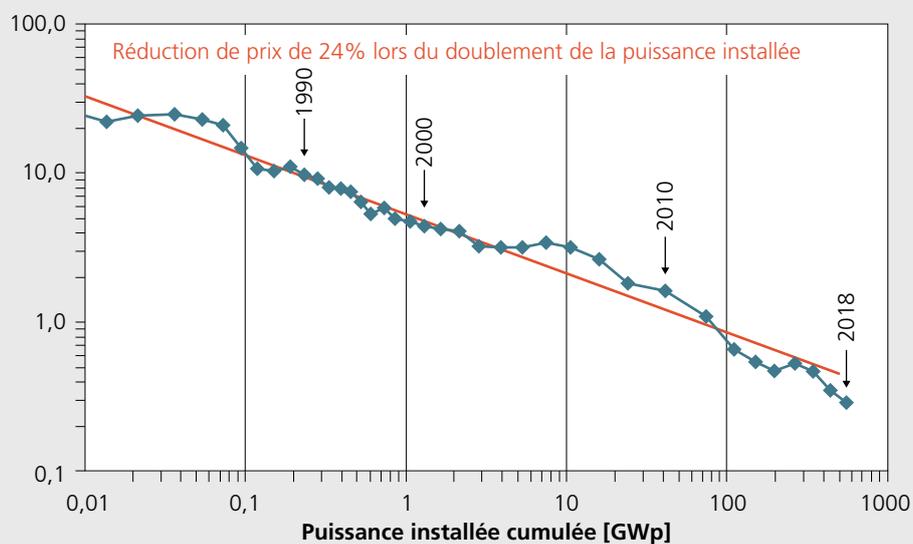


Illustration 4.34:
Évolution des prix
des modules PV
(marché mondial)
en euro par watt.
La droite montre la
tendance de l'évo-
lution des prix.
(Source: ISE 2019)

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. 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 15 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 4.36 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, ces états de fait ne sont pris en compte ni dans la subvention, par exemple la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RCP), ni dans la rétribution d'injection normale. Si l'inclinaison et l'orientation des modules PV peuvent s'écarter considérablement de l'orientation optimale vers le sud avec une inclinaison de 45°, l'ombrage présente un sérieux problème. Même s'il est possible aujourd'hui de procéder à des commutations qui n'entraînent plus la défaillance de zones entières de l'installation si seule une partie de celle-ci est ombragée, il convient d'éviter autant que possible les ombrages partiels par des parties de bâtiments (superstructures, saillies

4.35:
L'installation PV
typique raccordée
au réseau sur le
bâtiment. (Source:
Swissolar)

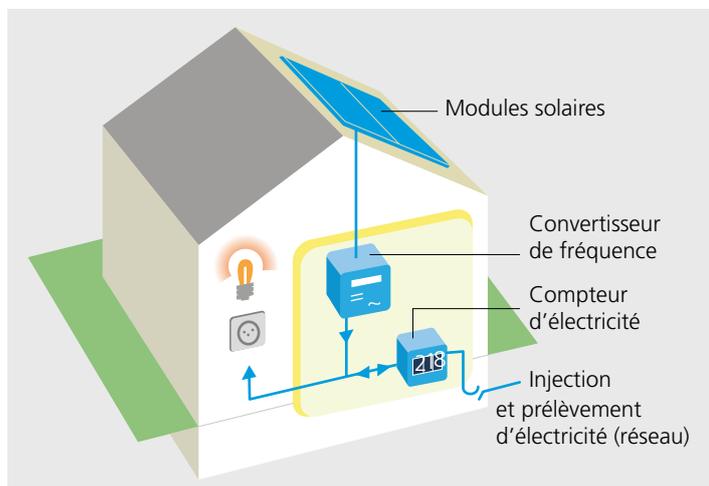
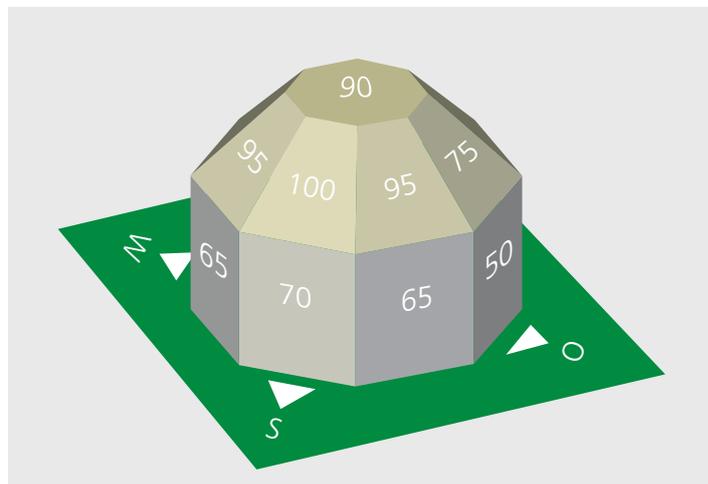


Illustration 4.36:
Dépendance de la
production d'élec-
tricité des modules
PV par rapport à
l'orientation et
l'angle d'inclinaison. (Source:
Swissolar)



etc.). La neige n'est pas un problème qui mérite d'être mentionné dans les endroits situés à moins de 1000 m d'altitude. Même à des altitudes plus élevées, la proportion de la production annuelle qui est réduite par la neige stagnante dans le sol n'est pas très importante. Toutefois, comme il s'agit d'une électricité particulièrement bienvenue en hiver, il convient de veiller, lors de la conception du système photovoltaïque, à ce que le glissement de la couche de neige ne soit pas entravé par des arêtes transversales, des marches ou d'autres obstacles. Il va cependant de soi que les blessures corporelles dues aux chutes de neige doivent être évitées.

BiPV – Building-integrated Photovoltaic

Illustration 4.37:
L'immeuble résidentiel Solaris à Zurich-Wollishofen von huggenbergerfries est orné d'une façade PV rouge foncé. (Photo: Beat Bühler)



La chute massive des prix a permis aux modules PV de devenir concurrentiels en remplacement de couches de protection contre les intempéries traditionnelles. Dans les façades, ils constituent une alternative à des plaques de pierre, des panneaux métalliques ou des vitres. Sur le toit, ils rem-

placent, sous forme d'«installations intégrées», la couverture traditionnelle. Ainsi, les modules PV sont également perçus comme un élément architectural. Preuve en sont les modules PV disponibles depuis quelque temps dans toutes les teintes de couleur possibles (Illustr. 4.37). Tandis que la palette de couleurs des cellules en silicium traditionnelles s'étend du noir à différentes teintes de bleu en passant par l'antracite, les cellules à couches minces permettent également d'obtenir des tons de vert et de rouge foncé. L'extension de cette palette à presque toute la gamme de couleurs est également possible, au prix toutefois d'une réduction du rendement, car cela implique une modification de la couche de réflexion des cellules, des applications de couleur ou des éléments de support colorés. Grâce à sa double utilisation en tant qu'élément d'enveloppe du bâtiment producteur de courant et élément décoratif, cette nouvelle génération de produits photovoltaïques possède un grand potentiel sur le marché. On remarquera en outre que le photovoltaïque est de plus en

Illustration 4.38:
Ombrage d'un parvis à l'aide de modules PV, centre communautaire de Ludesch, Autriche. (Source: Ertex Solar, Amstetten, Autriche)



Autoconsommation et degré d'autarcie

Du point de vue du maître d'ouvrage et des résidents (ou de l'utilisateur professionnel d'un bâtiment du tertiaire), l'installation photovoltaïque montée sur son propre immeuble représente souvent plus qu'un simple fournisseur d'énergie, comme c'est le cas pour la chaudière à gaz ou la pompe à chaleur qui chauffent l'édifice. L'électricité autoproduite est bien perçue et on a généralement un rapport positif à son égard. L'autoproduction réduit la dépendance et représente un petit (mais aussi parfois un grand) pas vers l'autarcie énergétique. L'importance du degré d'autarcie et de la part d'autoconsommation dépend d'abord de la taille de l'installation PV, mais pas seulement. Le volume de la consommation d'électricité joue également un rôle, tout comme les possibilités de stocker

l'électricité autoproduite pendant quelques heures afin de pouvoir également l'utiliser la nuit par exemple. L'illustration 4.40 présente ces corrélations de manière schématique. Le courant provenant de l'installation PV du bâtiment peut être directement fourni à l'utilisateur. La quantité actuellement en excédent est stockée dans la batterie où elle pourra être prélevée ultérieurement par l'utilisateur. Lorsque la batterie est pleine, l'électricité excédentaire est injectée dans le réseau, d'où l'on peut également prélever du courant lorsque ni l'installation PV ni la batterie ne peuvent fournir de l'électricité solaire.

Le degré d'autarcie et la part des besoins propres évoluent en sens contraire: plus le degré d'autarcie doit être élevé, plus l'installation PV doit être grande. Il faut néanmoins s'accommoder plus souvent du fait que le courant excédentaire doit être in-

Illustration 4.40:
Autoproduction
d'électricité et utilisation. (Source:
HTW Berlin)

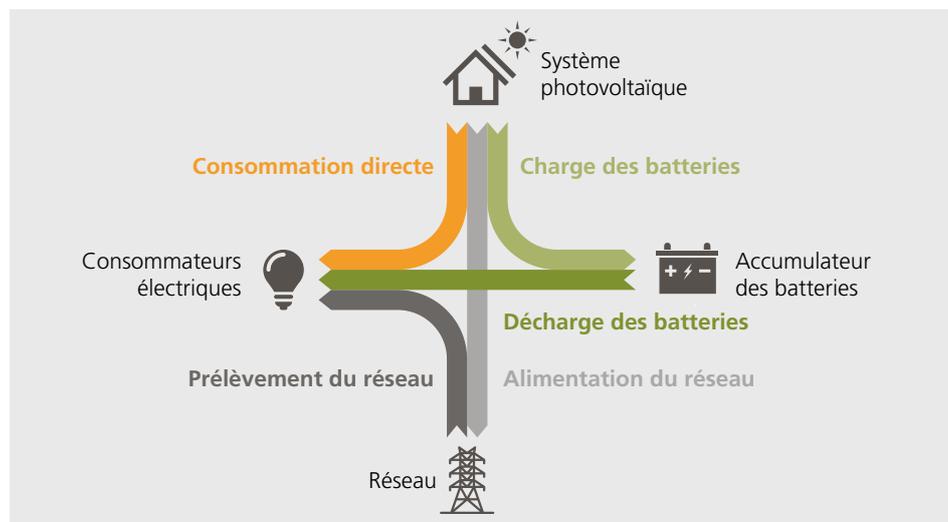
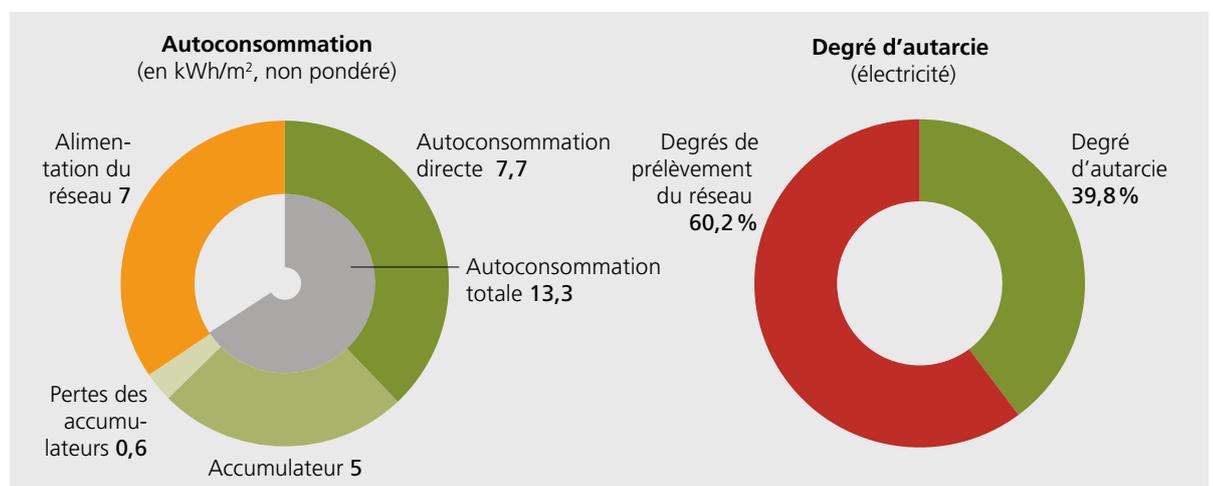


Illustration 4.41:
Autoconsommation
et degré d'autarcie
d'une maison individuelle sur le Plateau suisse avec une surface de référence énergétique de 200 m², une installation photovoltaïque à orientation optimale de 25 m² avec accumulateur de batterie d'une capacité de 5 kWh. (Source: calculé avec l'outil Minergie PVopti)



jecté dans le réseau. Cela signifie que la part du courant que l'on peut consommer soi-même par rapport à l'électricité photovoltaïque autoproduite totale diminue. L'outil de calcul PVopti de Minergie, téléchargeable gratuitement permet d'évaluer facilement l'impact de la baisse de la consommation, de la taille de l'installation, de la batterie de stockage et d'autres facteurs d'influence sur le degré d'autarcie et le taux d'autoconsommation. Cet outil met aussi rapidement en évidence le fait que la taille de l'installation est ce qui influence le plus fortement le taux d'autoconsommation. Ce n'est pas une surprise. Une petite installation produit tellement peu d'électricité que l'on peut presque toujours l'autoconsommer. Plus l'installation est grande, plus il est fréquent que l'électricité autoproduite ne puisse pas être autoconsommée et doive être injectée dans le réseau.

Quelle doit-être la taille de l'installation photovoltaïque?

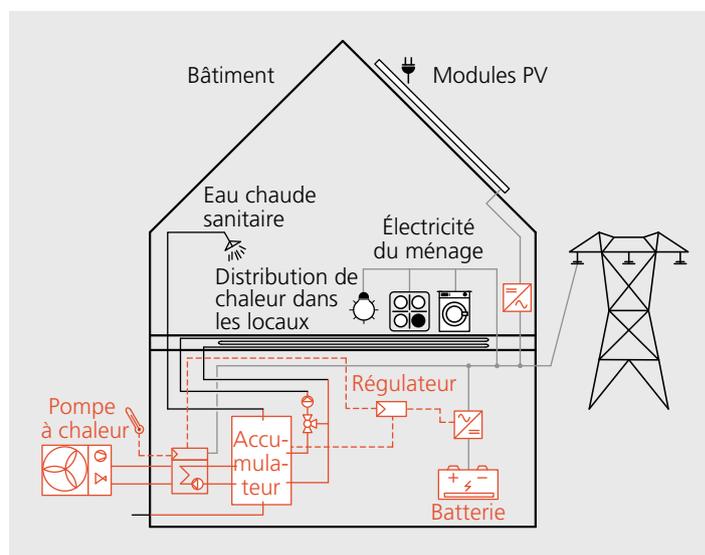
Le photovoltaïque est la technologie clé de l'approvisionnement en énergie du futur. Toutes les surfaces des nouvelles constructions susceptibles d'être utilisées par le photovoltaïque devraient donc pouvoir l'être. Mais, d'un point de vue économique, cela semble ne pas être le cas et surtout être compliqué à mettre en œuvre. Même si le coût de l'électricité produite par les installations PV est aujourd'hui relativement avantageux, le côté financier dépend considérablement du niveau des différents tarifs, notamment du montant de la rémunération du courant injecté dans le réseau et du coût du courant prélevé du réseau. En 2019, les installations photovoltaïques utilisées dans la construction d'habitations ont été subventionnées par des aides à l'investissement uniques (rétribution unique, RU). L'électricité autoconsommée n'étant soumise à aucun supplément réseau, l'électricité solaire de sa propre installation est nettement moins coûteuse que le courant fourni par le réseau. Cela encourage à maintenir la part de l'autoconsommation au niveau le plus élevé possible. La gestion de la charge (lavage du linge et de

la vaisselle, production d'eau chaude sanitaire etc. pendant les heures d'ensoleillement), les batteries de stockage, voire même les stations de charge solaires pour véhicules électriques contribuent à atteindre cet objectif.

Le second effet est cependant moins positif, car on veille à ce que les installations restent petites. Cela signifie que les surfaces disponibles sur les bâtiments ne sont pas entièrement utilisées, mais qu'une partie seulement d'entre elles sont équipées d'installations PV.

De manière générale, les adaptations de la loi sur l'énergie et de son ordonnance de 2014 et surtout de 2018 ont toutefois apporté des améliorations considérables pour l'utilisation adaptée des installations PV. Cependant, les problèmes actuels laissent à penser que les conditions ont été tellement modifiées par d'autres changements apportés à la législation sur l'énergie que l'incitation à l'autoconsommation la plus élevée possible est complétée par des mécanismes incitatifs pour l'utilisation la plus complète possible des surfaces de l'enveloppe du bâtiment par le photovoltaïque. Pour atteindre les objectifs du tournant énergétique, il est impératif que les grandes surfaces de toit, comme celles des bâtiments du tertiaire, soient également utilisées par des installations PV. Ces édifices ayant rarement des besoins propres importants, il est absolument nécessaire de proposer des incitations complémentaires (et

Illustration 4.42: Un bâtiment résidentiel avec tous les composants pour l'approvisionnement en énergie avec une forte proportion d'autoconsommation (régulateur, accumulateur, batterie, pompe à chaleur, installation PV et connexion au réseau). (Source: SPF Institut für Solartechnik)



la sécurité juridique) aux investisseurs de ces grandes installations. On discute p. ex. de procédures d'appel d'offres pour les approvisionnements en électricité solaire.

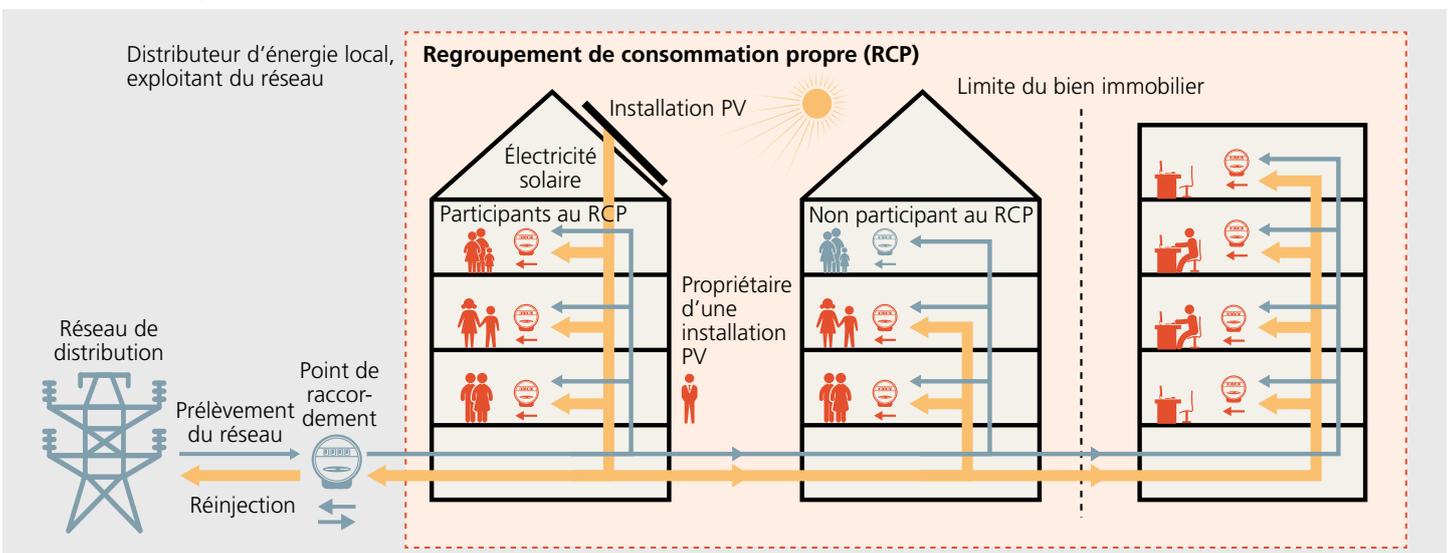
Modèles de réalisation

Les principales améliorations des conditions relatives aux installations PV sur les bâtiments ont été basées sur les règlements juridiques précis concernant l'autoconsommation de l'électricité solaire produite, parmi lesquels la possibilité de former des regroupements de consommation propre (RCP). Depuis 2018, la loi fixe des règles sur la manière dont des exploitants d'installations voisines peuvent se regrouper pour consommer directement l'électricité solaire d'une installation. Cela accroît davantage encore les possibilités d'augmenter la part d'autoconsommation. L'ensemble du réseau interne au RCP est raccordé au gestionnaire du réseau de distribution local (GRD) par le biais d'un compteur unique (point de mesure), ledit gestionnaire étant généralement le fournisseur d'électricité local. Le raccordement correspond à l'ancien système des communautés d'autoconsommation, à la seule différence que, dans un RCP, le client n'est plus seulement sa propre maison mais aussi plusieurs voisins ou locataires d'un immeuble collectif. Le modèle est très apprécié, car il est aussi intéressant sur le plan financier grâce à l'extension de l'autoconsommation d'électricité solaire. Par

ailleurs, le cadre juridique est formulé de manière assez ouverte. Ainsi, certains RCP comptent d'ores et déjà plusieurs centaines de membres. L'organisation et l'exploitation de regroupements de cette taille représentent des défis juridiques comme techniques. Les solutions sont apportées sous la forme de différents services, car certains propriétaires d'immeubles et locataires ne souhaitent pas établir et exploiter ce genre de modèles par eux-mêmes. Il semble que l'on soit au tout début de cette évolution. Les modèles, dans lesquels on peut acheter de l'électricité pour son propre ménage au sein du RCP via des bourses d'électricité – disponibles grâce à une application sur smartphone – sont déjà à l'essai. L'électricité de jour est alors nettement moins chère que l'électricité de nuit et la gestion de la charge est réalisée à des fins personnelles, ce qui est également judicieux du point de vue de l'exploitation du réseau.

Bien entendu, le modèle traditionnel de la communauté d'autoconsommation, dans laquelle tous les consommateurs d'électricité solaire (p. ex. d'une installation PV dans un immeuble collectif) sont clients du fournisseur d'électricité local et ce dernier en tant que gestionnaire du réseau de distribution (GRD) mesure et facture les quantités d'électricité solaires fournies aux résidents à l'aide de compteurs intelligents, existe toujours.

Illustration 4.43:
Un regroupement pour la consommation propre (RCP) est une association juridiquement contraignante de plusieurs parties (propriétaires de biens immobiliers, copropriétaires, locataires) d'un ou de plusieurs bâtiments consommant conjointement de l'électricité solaire. Ceci est également possible au-delà des limites de la propriété. (Source: Faktor Verlag)



Jürg Nipkow **4.7 Installations techniques générales**

Les dernières technologies en matière d'entraînements électriques (convertisseurs de fréquence, moteurs EC et leurs commandes) et de gestion de l'énergie sont très importantes pour garantir une utilisation rationnelle de l'électricité dans les bâtiments. L'automatisation du bâtiment est utilisée de manière standard dans les grands immeubles commerciaux et de bureaux, dans les bâtiments d'habitation et connaît un succès commercial croissant sous la dénomination «Smart Home». Si l'automatisation du bâtiment est la condition essentielle à une bonne gestion de l'énergie, sa consommation d'électricité est cependant à considérer d'un œil critique et doit être prise en compte lors des appels d'offres (voir également le Chapitre 4.8 Automatisation du bâtiment).

Les moteurs électriques dans les installations techniques du bâtiment

Les entraînements électriques sont des consommateurs d'électricité importants dans les installations techniques du bâtiment. Ils sont non seulement présents dans les entraînements bien visibles des ventilateurs ou des grandes pompes, mais aussi souvent cachés dans les stores, les portes automatiques, les ascenseurs, les circulateurs des appareils de chauffage, les petits ventilateurs des appareils etc. Aujourd'hui, presque tous les entraînements de petite et de moyenne taille peuvent disposer de moteurs EC hautement efficaces (moteurs à aimant permanent à commutation électronique sur le plan technique) présentant des rendements de plus de 80 % contre 10 à 30 % pour les anciens moteurs.

Circulateurs

La technique efficace pour une catégorie importante d'entraînement est prescrite depuis 2009: les circulateurs sans presse-étoupe d'une puissance hydraulique maximale de 2500 W doivent respecter la prescription européenne et suisse d'efficacité minimale de l'EEL (indice d'efficacité énergétique) pour être autorisés à la vente.

Jusqu'en 2019, la valeur de l'EEL ne devait pas dépasser 0,23, après la révision prévue, la valeur maximale sera de 0,20. Il est également prévu d'étendre cette exigence aux circulateurs d'eau potable. La directive européenne représentant une autorisation de commercialisation, les planificateurs et installateurs ont juste besoin de s'assurer qu'ils n'utilisent pas de produits bon marché illégaux. Cependant, le bon dimensionnement des pompes, c'est-à-dire le plus juste, doit comme toujours être respecté: On pense souvent qu'un surdimensionnement n'est pas problématique en raison de la régulation automatique de la vitesse. Mais dans ce cas, la régulation fonctionne si possible à la butée inférieure et ne peut pas remplir correctement sa fonction.

Ventilateurs

Concernant les ventilateurs d'aération, les très gros appareils à moteurs séparés sont également soumis à des prescriptions sur l'efficacité du ventilateur et des moteurs. Pour les appareils plus petits, prenant généralement la forme de ventilateurs compacts, il n'existe pour l'instant aucune prescription de ce genre. Cependant, il est important d'utiliser des ventilateurs vraiment efficaces, le plus souvent commercialisés sous la désignation «ventilateur EC». «EC» signifie «à commutation électronique» et implique généralement la présence d'un moteur à aimant permanent efficace.

Entraînements de stores

Beaucoup d'entraînements de stores possèdent toujours des moteurs tubulaires inefficaces dotés de puissances absorbées entre 100 et 300 W par exemple. Les durées de fonctionnement étant très limitées, la consommation d'électricité qui en résulte n'est toutefois pas extrêmement élevée. La commande à distance sans fil de ce genre d'applications peut, en revanche, être plus critique, car leurs éléments récepteurs présentent souvent une puissance absorbée en veille de quelques watts, ce qui représente une consommation d'énergie considérable pour 8760 heures de fonctionnement. Cela s'applique naturelle-

ment à tous les appareils connectés à l'IdO (Internet des Objets). Souvent, les valeurs de consommation d'énergie correspondantes ne sont pas affichées. Il revient donc au planificateur de les demander.

Considérer les systèmes d'installations techniques du bâtiment dans leur ensemble

L'approche globale devrait impérativement commencer dès l'étape de l'étude préliminaire, car des jalons importants pour la future consommation d'énergie pourraient ainsi déjà être posés. Une collaboration précoce entre le chef de projet, l'architecte et le planificateur des installations techniques est nécessaire, mais n'est toujours pas systématique. La procédure de planification doit prévoir cette collaboration ainsi que des contrôles ultérieurs réguliers.

Quelques exemples

■ **Conduits d'aération:** La conception des conduits (et même celle de l'emplacement prévu à cet effet par l'architecte) a une influence considérable sur la consommation d'énergie du transport de l'air. Elle peut également entraîner d'éventuels problèmes de bruit. Lorsque l'on opte pour des sections transversales de conduits rectangulaires à la place des rondes et des coudages trop marqués (en équerre et non arqués) par manque de place, les conséquences sont souvent graves.

■ **Ventilateurs d'aération à entraînement direct:** Ils remplacent une transmission à courroie et nous en épargnent tous

les inconvénients. De plus, les entraînements directs sont généralement équipés de moteurs EC efficaces, ce qui permet le bon réglage. Ces ventilateurs existent aussi souvent pour des puissances plus élevées. Les coûts d'investissement peuvent être un peu supérieurs mais sont presque toujours amortis sur la durée d'utilisation.

■ **Moteurs efficaces:** Les très grands entraînements des installations techniques, telles que les ventilateurs, les pompes et les ascenseurs, possèdent déjà la plupart du temps des moteurs efficaces conformément aux directives. Le moteur disponible le plus efficace étant presque toujours avantageux quand les coûts du cycle de vie sont pris en compte, il convient de vérifier au moment de l'achat si l'offre correspond également. Des types de moteur à prix plus avantageux peuvent être judicieux uniquement pour des durées de fonctionnement de quelques centaines d'heures par an. Les moteurs asynchrones monophasés, voire à bague de déphasage ne devraient être utilisés qu'en l'absence d'alternative.

Ascenseurs

La technologie des convertisseurs de fréquence est devenue la norme pour les entraînements d'ascenseurs, d'autant plus en raison de la régulation précise des arrêts. La consommation en veille joue un rôle important en ce qui concerne les ascenseurs. Elle est régie sur l'étiquette-énergie de l'industrie des ascenseurs (norme VDI 4707, partie 1). La norme VDI 4707 définit 7 types de consommation énergétique (de

Tableau 4.14:
Catégories d'utilisation des ascenseurs.

| Directive VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 4707, fiche 1: Catégories d'utilisation des ascenseurs | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|
| Catégorie d'utilisation | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Intensité | très faible | faible | moyenne | élevée | très élevée |
| Fréquence | très rare | rare | occasionnelle | fréquente | très fréquente |
| Trajets moyens par jour | 0,2 h/d | 0,5 h/d | 1,5 h/d | 3 h/d | 6 h/d |
| Temps d'arrêt moyen par jour | 23,8 h/d | 23,5 h/d | 22,5 h/d | 21 h/d | 18 h/d |
| Bâtiment typique | <ul style="list-style-type: none"> Maison avec jusqu'à 6 appartements Petit immeuble de bureaux avec peu d'activité | <ul style="list-style-type: none"> Maison avec jusqu'à 20 appartements Petit immeuble de bureaux avec 2 à 5 étages | <ul style="list-style-type: none"> Maison avec jusqu'à 50 appartements Immeuble moyen de bureaux jusqu'à 10 étages | <ul style="list-style-type: none"> Maison avec plus de 50 appartements Immeuble de bureaux avec plus de 10 étages | <ul style="list-style-type: none"> Immeuble de bureaux avec plus de 100 m de hauteur Grand hôpital |

A à G) pour les fonctions «arrêt» et «course». La classe A détermine des prescriptions extrêmement exigeantes en matière d'efficacité, mais les ascenseurs de classe B sont également efficaces sur le plan énergétique. Selon Lift-Report (www.lift-report.de), les besoins en énergie d'un ascenseur représentent 3 à 8 % de l'ensemble des besoins d'un immeuble. La plus grande partie toutefois en veille, comme le montre clairement le Tableau 4.14. Par exemple, un ascenseur de la catégorie d'utilisation 1 reste environ 99 % du temps à l'arrêt. C'est pourquoi les besoins en mode veille ont une grande influence sur la classe d'efficacité. La consommation d'électricité totale annuelle est déterminée par trois facteurs (Öko-Institut):

- la catégorie d'utilisation et la fréquence de l'utilisation
- la puissance absorbée en mode veille
- la consommation d'énergie pendant les courses

Jürg Bichsel 4.8 Automation du bâtiment

Qu'est-ce que l'automation du bâtiment?

L'automation du bâtiment est en charge de la surveillance, de la commande, de la régulation et de l'optimisation de toutes les installations techniques dans les bâtiments (Illustr. 4.4). 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.

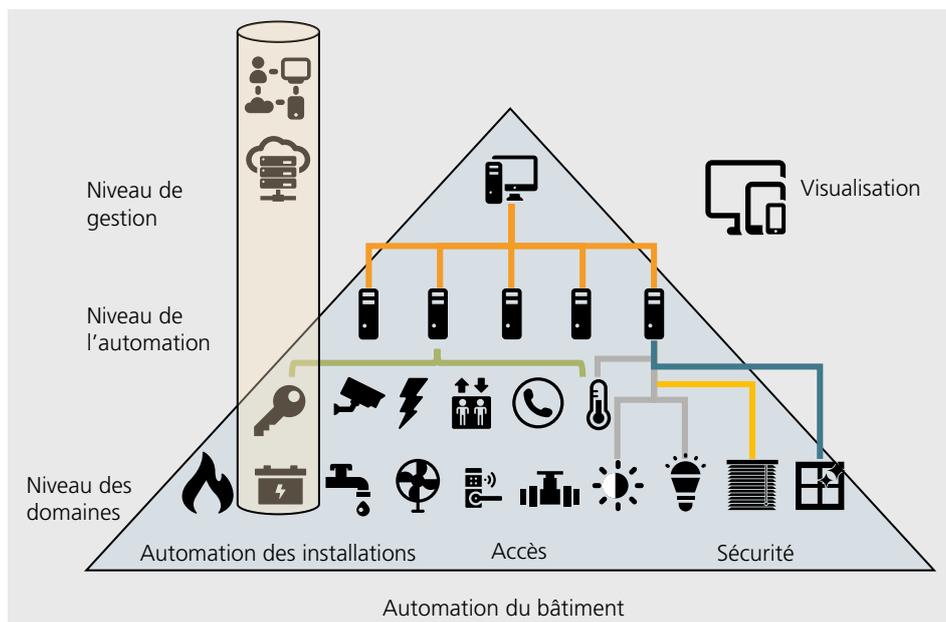
Illustration 4.44: Selon la norme EN 16484, l'automation des bâtiments est divisée en trois niveaux: le terrain, l'automation et la gestion. Cela s'applique individuellement, par exemple pour la sécurité et le système de chauffage. Dans les bâtiments résidentiels, les différents corps de métier n'interagissent pas entre eux. Cela entraîne des solutions non optimales du point de vue de l'«optimisation de la demande d'énergie». Aujourd'hui, la visualisation est souvent externalisée vers un nuage (cloud) et les données sont donc disponibles dans le monde entier; cette partie est surlignée en jaune. (Graphique: D. Kunz, FHNW)

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 CO₂, ni la pollution environnementale, ni l'énergie auxiliaire (entraînements, pompes, régulateurs) ne sont indiqués et optimisés. En principe, un système d'automation du bâtiment serait capable de déterminer les points de fonctionnement optimaux. Étant 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?

Les installations techniques doivent être paramétrées correctement pour une exploitation optimale. L'efficacité des pompes à



chaleur baisse fortement à des températures de départ élevées, tant pour le circuit de chauffage que pour l'eau chaude (maximum 60°C). Si ces systèmes ne sont pas utilisés (p. ex. en été), ils doivent être complètement éteints et ne pas être laissés en mode veille.

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 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 en rouge, la quantité d'énergie consommée est trop importante. L'utilisateur peut lui-même amener le témoin de l'état «rouge» à l'état «vert» en réglant le bouton de valeur de consigne de la température (Illustr. 4.45).

Sans connaissance de la consommation d'énergie, aucune optimisation énergé-

tique à long terme d'un bien immobilier ne peut être réalisée. Cette surveillance nécessite des capteurs qui mesurent les conditions du bâtiment (flux d'énergie, températures etc.) et les affichent ensuite visuellement pour l'utilisateur. Le module Minergie Monitoring répond à ces exigences et soutient l'exploitant d'un immeuble. 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, ce qui permet de reconnaître rapidement des erreurs. Les maisons familiales sont commandées par les résidents, les immeubles d'habitation parfois par des sociétés indépendantes (technical facility management).

Outre les possibilités techniques, les résidents peuvent 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



Illustration 4.45: 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.

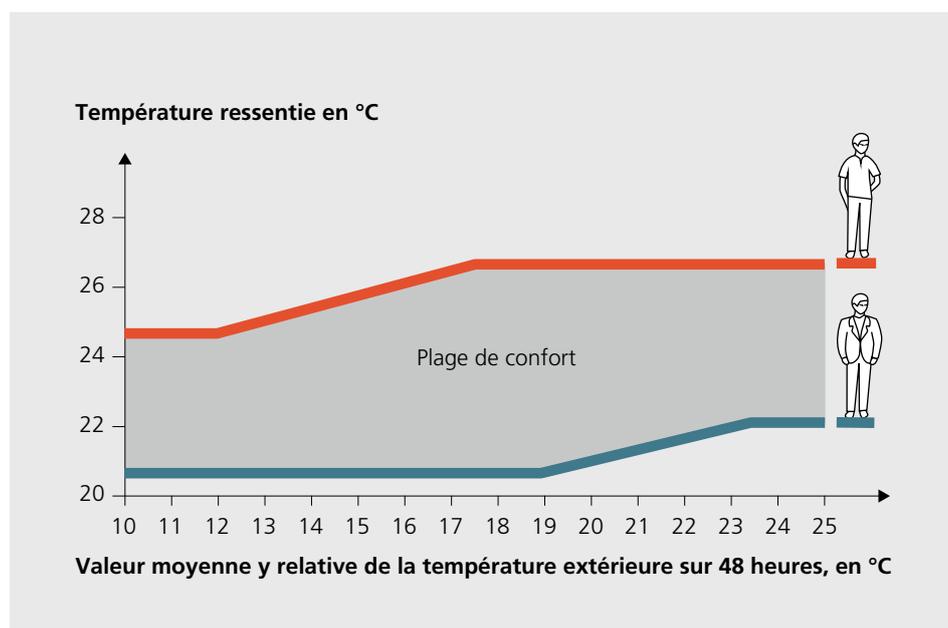


Illustration 4.46: Norme SIA 382/1:2014 et norme SIA 180:2014, plages de confort (Graphique: FHNW, J. Bichsel). Exemple: Avec une moyenne mobile de la température extérieure sur 48 heures de 23,5°C, la fourchette de confort de la température se situe entre 22°C (vêtements: costume d'affaires avec cravate) et 26,5°C (vêtements: pantalon long et chemise à manches courtes)

température extérieure, entre une limite supérieure et une limite inférieure. Ceci, à condition que les résidents aient la possibilité d'adapter leur tenue vestimentaire (Illustr. 4.46). 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.

Sur la base des appareils installés, la norme SIA 386.110 (Tabl. 4.15) répartit les systèmes d'installations techniques dans les classes A à D, en fonction de l'efficacité énergétique. Par exemple, le potentiel d'économie d'un immeuble non automatisé (classe D) et d'un immeuble complètement automatisé (classe A) s'élève à 26% d'énergie thermique et à 15% d'énergie électrique. La classe A exige au moins un détecteur de mouvement et de température avec un circuit de contrôle de la température dans les différentes pièces. Cela permet de réaliser automatiquement des économies d'énergie. Ici aussi, le potentiel théorique d'économies d'énergie ne peut être exploité que si les systèmes de gestion des bâtiments sont correctement paramétrés et mis en service.

Tableau 4.15:
Norme SIA 386.110:2012, classes d'efficacité énergétique de l'automatisation du bâtiment. Exemple: Les constructions nouvelles ne devraient être réalisées que dans les classes A et B (les bâtiments existants typiques en Suisse se trouvent dans la classe C); pour atteindre la classe A, une optimisation énergétique durable est nécessaire. Le monitoring énergétique Minergie comprend quatre niveaux: «Light», «Standard», «Plus» et «Automation avec monitoring». Seul le niveau Automation avec surveillance» répond aux exigences de la norme SIA 386.110 (surligné en vert).

Nouvelles exigences définies par le MoPEC 2014

Le modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC 2014) a été élaboré dans la perspective de la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050 de la Confédération et doit être transposé dans les réglementations cantonales d'ici à 2020. Certaines exigences en matière d'optimisation énergétique doivent être impérativement appliquées. En font partie:

■ **Le décompte individuel des frais de chauffage et d'eau chaude sanitaire** dans les constructions nouvelles comportant 5 logements ou plus (cela concerne surtout les immeubles collectifs).

■ **Les gros consommateurs énergétiques**, qui définissent des mesures (économiquement) raisonnables pour pouvoir diminuer la consommation d'énergie.

En parallèle, des modules facultatifs ont été définis et peuvent être appliqués au niveau cantonal; ils deviennent dans ce cas juridiquement contraignants. Citons par exemple:

■ **Module 4:** Possibilité de réguler la température ambiante dans les résidences secondaires et les logements de vacances neufs à au moins deux niveaux au moyen

Classes d'efficacité énergétique selon SIA 386.110

| Système d'automatisation du bâtiment | Monitoring | Optimisation énergétique | Exigences posées à l'automatisation et à la maintenance |
|--|--------------|----------------------------------|---|
| Efficacité énergétique très élevée A Classe A | Oui, mensuel | Oui, par des spécialistes formés | <ul style="list-style-type: none"> • Automatisation du bâtiment de l'installation primaire, en réseau • Automatisation des locaux avec saisie automatique des besoins, en réseau • Maintenance régulière |
| Efficacité énergétique élevée B Classe B | Oui, annuel | Non | <ul style="list-style-type: none"> • Automatisation du bâtiment de l'installation primaire, en réseau • Automatisation des locaux sans saisie automatique des besoins, en réseau |
| Efficacité énergétique moyenne C Classe C | Non | Non | <ul style="list-style-type: none"> • Automatisation du bâtiment de l'installation primaire, en réseau • Pas d'automatisation électronique des locaux, p. ex. vannes thermostatiques sur les radiateurs |
| Efficacité énergétique faible D Classe D | Non | Non | |

d'une commande à distance; cette règle s'applique également en cas de remplacement du générateur de chaleur d'un immeuble existant. Cela permet de maintenir à un niveau faible la température dans les résidences secondaires lorsqu'elles sont inoccupées, puisque la température peut être augmentée rapidement grâce au réglage à distance du chauffage.

■ **Module 5:** Obligation d'équiper les constructions nouvelles de systèmes d'automatisation du bâtiment (à l'exception des habitations individuelles et collectives et des petits immeubles); cela correspond à la classe d'efficacité B de la norme SIA 386.110.

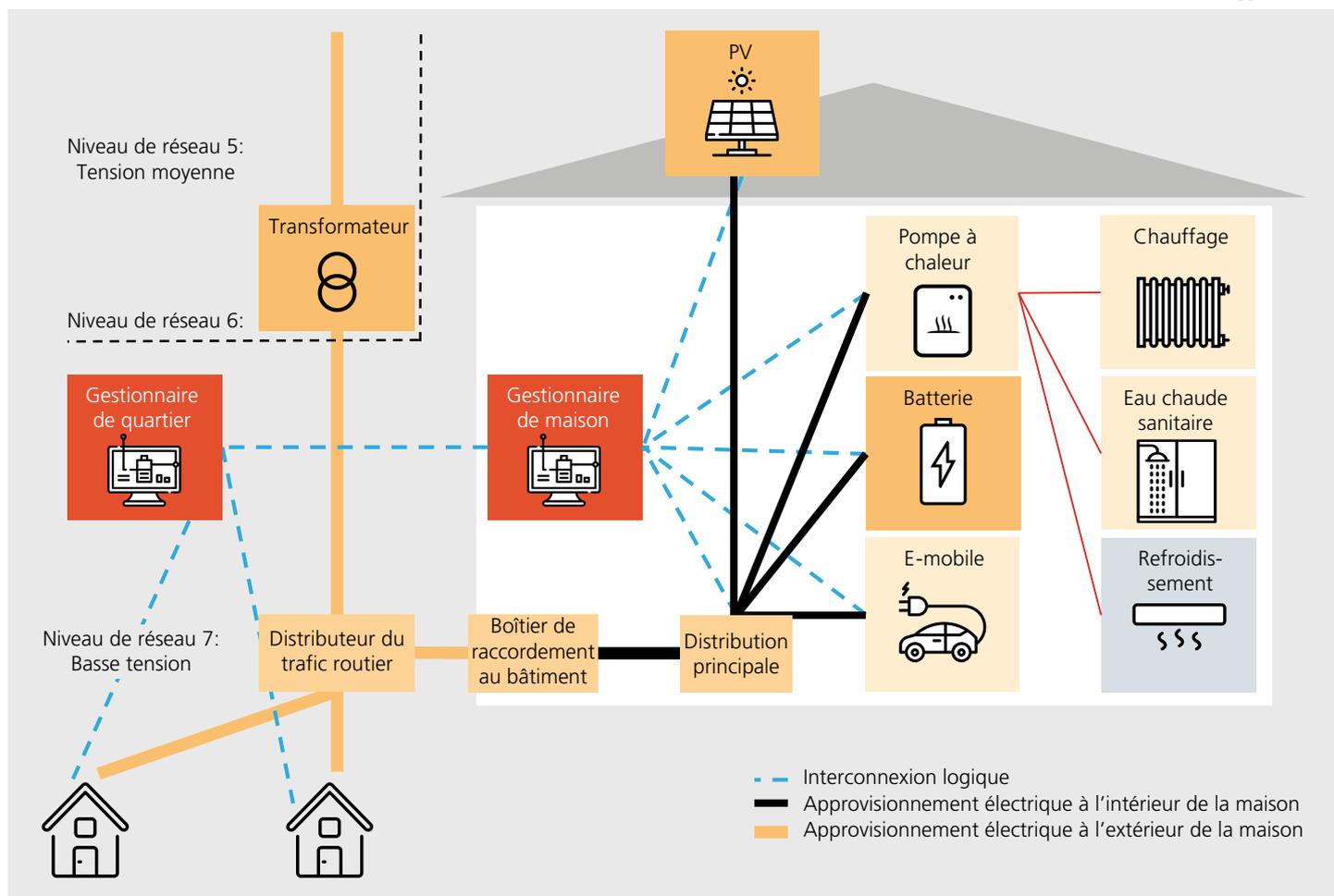
■ **Module 8:** Optimisation de l'exploitation pour les bâtiments à consommation d'électricité élevée (à l'exception des habitations individuelles et collectives); cela correspond à la classe d'efficacité A de la norme SIA 386.110.

À ce jour (fin 2019), le module 4 a été appliqué dans les cantons de Berne, Uri, Zoug, Fribourg, St-Gall, du Tessin, du Valais et de Neuchâtel et les modules 5 et 8 dans les cantons de Berne et de Bâle-Ville.

Activités de recherche

Dans l'avenir, les thèmes de l'automatisation du bâtiment seront étudiés pour déterminer la façon dont la consommation d'énergie peut être mieux utilisée grâce à la connaissance des états de charge des accumulateurs thermiques et électriques ainsi que de l'occupation attendue et de l'évolution météorologique. Grâce à un déplacement énergétique du stockage dans le bâtiment vers l'accumulateur d'eau chaude ou vers l'accumulateur géothermique ainsi que par l'utilisation intelligente du photovoltaïque et des accumulateurs électriques, il sera possible d'optimiser la consommation d'énergie totale d'un bâtiment.

Illustration 4.47: L'optimisation hiérarchique est effectuée de manière décentralisée dans chaque maison par un gestionnaire du bâtiment. Les objectifs supérieurs du quartier sont optimisés par un gestionnaire de quartier, et les signaux d'incitation correspondants sont transmis aux gestionnaires des maisons. (Source: D. Kunz, FHNW, projet de recherche Energy Chance)



Cela permettra également d'intégrer l'apport d'énergie solaire instantanée dans le calcul. 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 du bâtiment, car le photovoltaïque présent sur le bâtiment fournit le 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 prévisions météorologiques, car l'accumulateur d'eau chaude et du bâtiment pourront être chargés au maximum en période de beaux temps, avant une dégradation météorologique.

Les nouveaux bâtiments résidentiels devraient déjà être équipés d'accumulateurs, de systèmes de production d'énergie, de capteurs et d'entraînements avec des interfaces ouvertes. Cela facilite l'installation et l'utilisation des logiciels d'optimisation qui seront disponibles à l'avenir.

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. Pour ce faire, un gestionnaire de maison sera engagé dans la maison individuelle pour optimiser économiquement et écologiquement les flux d'énergie (photovoltaïque, batterie, pompe à chaleur et voiture électrique) dans la maison (Illustr. 4.47). Ces incitations externes seront fixées par un responsable de quartier qui optimisera le niveau de la zone à un niveau supérieur. Outre l'efficacité économique, l'un des principaux objectifs sera d'utiliser l'énergie autoproduite dans le voisinage et de ne pas surcharger l'infrastructure électrique.

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. Aujourd'hui, nous nous rapprochons de ce rêve grâce à la planification du modèle de construction numérique. L'expérience pratique montrera si ces systèmes peuvent dépasser les coûts de la planification actuelle avec la robustesse et la stabilité à long terme correspondantes.

4.9 Sources

- [1] Huber, H.: Planungshandbuch Komfortlüftung, Faktor Verlag, Zurich 2010.
- [2] Garantie de performances Aération douce. SuisseEnergie, Berne 2019. Commande sous www.garantie-de-performance.ch
- [3] Office cantonal de l'industrie des bâtiments de la ville de Zurich Projekt Luftaustausch. Diverses publications relatives au projet, (Syntheserapport), Zurich 2009. Commande sous www.stadt-zuerich.ch/nachhaltigesbauen → 2000-Watt-Gesellschaft → Technik
- [4] M. Hessler: «Mrs. Modern Woman»: zur Sozial- und Kulturgeschichte der Haushaltstechnisierung, Campus Verlag, 2001.
- [5] Office fédéral de l'énergie (OFEN): Stratégie énergétique 2050 après l'entrée en vigueur de la nouvelle loi sur l'énergie, 2018.
- [6] Office fédéral de l'énergie (OFEN): Statistique suisse de l'électricité 2018, 2019.
- [7] Prognos AG, Infrac AG, TEP Energy GmbH: Analyse de la consommation énergétique suisse 2000 – 2017 en fonction de l'application, Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2018.
- [8] ec.europa.eu. [accès le 26 août 2019]
- [9] F. Vuille, D. Favrat et S. Erman: Energiewende? Antworten auf 100 brennende Fragen, Bern: hep verlag ag, 2015.
- [10] www.energystar.ch. [accès le 3 septembre 2019]
- [11] G. Wegner, Elektrische Hausgeräte, München/Heidelberg: Hüthig & Pflaum Verlag GmbH & Co. Fachliteratur KG, 2008.
- [12] www.topten.ch. [accès le 3 septembre 2019]
- [13] www.suisseenergie.ch. [accès le 4 septembre 2019]
- [14] SN EN 12464-1, Lumière et éclairage – Éclairage des lieux de travail – Partie 1: Lieux de travail intérieurs, Beuth-Verlag, 2011.
- [15] SIA 387/4, Électricité dans les bâtiments – Illumination: Calcul et exigences, Zurich: Société suisse des Ingénieurs et des Architectes, 2017.
- [16] Haas-Arndt et Ranft: Tageslicht in Gebäuden, Heidelberg. C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 2007.
- [17] Trilux GmbH & Co. KG, Beleuchtungspraxis, 2019.

Annexe

5.1 Auteurs

Armin Binz, Prof. architecte dipl. EPF/SIA; jusqu'à fin 2012 directeur de l'Institut Énergie dans la construction à la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (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 Énergie dans la construction à la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW). Auparavant, responsable du développement chez Sauter AG (automation du bâtiment).

Achim Geissler, Prof. Dr, ing. chimiste dipl., directeur du groupe Construction de l'Institut Énergie dans la construction à la Haute école d'architecture, de construction et de géomatique à la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW). Chargé de cours pour la construction durable et l'efficacité énergétique, physique du bâtiment et simulation d'appareils à la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW).

Monika Hall, Dr en physique du bâtiment, ing. chimiste dipl. ET. Collaboratrice scientifique et chargée de cours à la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW), Institut Énergie dans la construction.

Heinrich Huber, Prof., ing. mécanicien dipl. et ing. CVC HES, MAS FHNW Construction durable. Chargé de cours en technique du bâtiment à la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW), directeur de l'Agence Minergie Bâtiment.

Jürg Nipkow, ing. dipl. ETH/SIA; propriétaire de Arbeitsgemeinschaft Energie-Alternativen ARENA, président de la Commission SIA 385 Eau chaude sanitaire, Expert en efficacité énergétique, en particulier des appareils et entraînements électriques ainsi que de l'eau chaude sanitaire .

Marco Ragonesi, architecte HTL / Bauphysiker; Mitinhaber RSP Bauphysik AG

Gregor Steinke, ing. dipl., architecte ET, études post-grade Energie HES; chargé de cours et collaborateur scientifique à la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW) dans le domaine de la construction durable.

Beate Weickgenannt, ing. en technique du bâtiment dipl. TU; collaboratrice scientifique à la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW).

5.2 Normes et règlements

Normes et cahiers techniques SIA

Norme SIA 112/1, Construction durable – Bâtiment, 2017

Norme SIA 180, Protection thermique, protection contre l'humidité et climat intérieur dans les bâtiments, 2014

Norme SIA 181, Protection contre le bruit dans le bâtiment, 2006

Norme SIA 232/1, Toitures inclinées, 2011

Norme SIA 232/2, Bardages, 2000

Norme SIA 243, Isolations thermiques extérieures crépies, 2008

Norme SIA 271, Étanchéité des bâtiments, 2007

Norme SIA 279, Matériaux de construction isolants, 2018

Norme SIA 331, Fenêtres et portes-fenêtres, 2012

Norme SIA 380, Base pour les calculs énergétiques des bâtiments, 2015

Norm SIA 380/1, Besoins de chaleur pour le chauffage, 2016

Norm SIA 382/1, Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises, 2014

Norme SIA 382/2, Bâtiments climatisés – Puissance requise et besoins d'énergie, 2011

Norme SIA 386.110, Performance énergétique des bâtiments – Impact de l'automatisation, de la régulation et de la gestion technique, 2012.

Norme SIA 387/4, Électricité dans les bâtiments – Illumination, 2017

Cahier technique SIA 2028, Données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et les installations du bâtiment, 2010

Cahier technique SIA 2031, Certificat énergétique des bâtiments, 2016

Cahier technique SIA 2032, L'énergie grise des bâtiments, édition

Cahier technique SIA 2040, La voie SIA vers l'efficacité énergétique, 2017

Autres réglementations

■ MoPEC 2014 www.endk.ch

■ Facteurs de pondération nationaux, 2017, www.endk.ch

■ Guide pratique de la consommation propre, version 2.0; sur mandat de SuisseEnergie, 2019

5.3 Index des mots clés

A

Absorbent 123
Absorption 59, 62
Aération par les fenêtres 119
Aérogel 48
Agents énergétiques primaires 10
Amortissement énergétique 36
Appareils 7, 9
Appareils de pièces individuelles 126
Appareils ménagers 128
Apports solaires passifs 75, 77
Apports thermiques 64
Approvisionnement en lumière naturelle 70
Ascenseurs 146
Autoconsommation 142
Automatisation du bâtiment 148
Autonomie en lumière naturelle 72
Autoproduction 7

B

Bâtiment Minergie-A 36
Bâtiments à énergie positive 29
Bâtiments du tertiaire 23
Bâtiment zéro énergie 36
Besoin en puissance de chauffage 106
Bouches d'air neuf 119
BREEAM 31
Building-integrated Photovoltaic 140

C

Capacité d'accumulation thermique 66
Capteurs solaires 108
Cave 45
Cellules cristallines 138
Centrale de chauffage 12
Chaleur à distance 103
Chape en mortier de ciment 68
Charbon actif 121
Chauffage à bois 103, 105
Chauffage à bûches 103
Chauffage au sol 45
Chauffage des locaux 7
Chauffe-eau à PAC 108
Cheminées 113
Choix des matériaux 34
Circulateurs 145
Colonnes montantes 57
Combinaisons de solutions standard 103

Communautés d'autoconsommation (CA) 28
Commune 13
Compacité 43
Complément Eco 31
Comportement des utilisateurs 130
Confort acoustique 40
Confort olfactif 38
Confort thermique 38
Confort visuel 40
Consommation d'électricité 128
Construction 124
Construction en bois 50, 78, 97
Construction en bois massif 68
Construction légère 68
Construction mixte 97
Constructions massives 49, 97
Contacts Reed 113
Corps de chauffe 106
Couverture élevée des besoins 11

D

Décompte individuel des frais de chauffage et d'eau chaude sanitaire 150
Degré d'autarcie 26, 142
Degré d'éblouissement direct (UGR) 73
Déperditions par ponts thermiques 78
Déperditions par transmission thermique 75
Déverseurs 123
Dioxyde de carbone 115
Dispositif d'apport d'air 113
Dispositif de reprise d'air 113
Distribution de chaleur 106

E

Eau chaude sanitaire 7
Éclairage 7, 132
Éclairément 132
Effet d'autorégulation 109
Electricité hivernale 139
Éléments de construction transparents 94
Emissions de gaz à effet de serre 5
Énergie auxiliaire 112
Énergie finale 10
Énergie grise 7, 10, 33
Énergie primaire 18
Énergie utile 10

Entraînements de stores 145
 Entretoise 51
 Entretoises entre les vitres 58
 En veille 131
 Enveloppe du bâtiment 43
 Enveloppe thermique du bâtiment 44
 Etiquette-énergie 127, 129
 Exergie 16
 Exigences techniques 132
 Extraction d'air du poste de cuisson 121

F

Façade compacte 52
 Facteur de lumière naturelle 70
 Facteur des apports solaires 64
 Facteur de pondération 27
 Fenêtres 95

G

Gaz de remplissage 58
 Gestion de l'éclairage 136
 Gros consommateurs énergétiques 150

H

Habillage ventilé 88
 Hottes d'extraction d'air 121
 Hygiène 115

I

Infiltration 120
 Installations d'air repris 116
 Installations de couplage
 chaleur-force 103
 Installation solaire 105
 Installations techniques générales 145
 Intégration hydraulique 108
 Intensité d'éclairage 73
 Intervalles entre vitres 58
 Isolant 46
 Isolants thermiques à haute
 performance 48
 Isolation thermique extérieure enduite 88
 Isolation thermique intérieure 89

J

Justificatif par performances
 ponctuelles 45
 Justificatif simplifié 105

L

Label de durabilité 31
 Laine minérale 48
 LED 134
 LEED 31
 Life Cycle Energy 36
 Limite du bilan 27
 Logements à l'étage 126
 Lotissement 11, 13, 14

M

Maçonnerie apparente 87
 Maçonnerie monolithique 86
 Maçonneries enduites à double paroi 54
 Maçonnerie simple 53, 86
 Matériaux 35
 Matériaux d'isolation thermique 78
 Mesure de l'étanchéité à l'air 57
 Mobilité 8, 10
 Module Minergie 127
 Monitoring 150
 MoPEC 2014 22, 75, 103, 150
 Moteurs EC 127
 Mur à double paroi 87
 Mur extérieur 50
 Murs de construction en bois 89

N

Nanomousse 48
 Niveaux de transformation 10

O

Ombrage 43
 Optimisation de l'autoconsommation 28
 Optimisation énergétique 11

P

PAC raccordée 108
 Panneaux d'isolation sous vide 48
 Parc immobilier 5
 Part de vitrage 65
 Part d'ossature des fenêtres 64
 Perte de charge 127
 Photovoltaïque 11, 138
 Planchers au-dessus de la terre 92
 Planification de la lumière naturelle 71
 Planification énergétique 13
 Poêle à granulés 107
 Poêles à bois 113
 Pompe à chaleur à gaz 103
 Pompe à chaleur de production d'eau
 chaude 108

Pompes à chaleur 105
Pompes à chaleur air-eau 105
Pompes à chaleur à sondes géothermiques 112
Pompes à chaleur eau glycolée-eau 105
Ponts thermiques 56, 96
Ponts thermiques linéaires 56
Poste de cuisson 121
Poutres en bois 92
Prix coûtant du courant injecté 139
Probabilité d'éblouissement 73
Protection contre la foudre 138
Protection contre les bruits d'impact 45
Protection contre l'humidité 84
Protection solaire 65
Protection thermique 45
Protection thermique estivale 23, 65, 67
PUR 47

Q

Quartier 11, 13

R

Rafraîchissement nocturne 66
Rayonnement diffus 60
Rayonnement direct 60
Rayonnement global 60
Rayonnement solaire 60
Recommandations KBOB 31
Réflexion 59
Refroidissement nocturne 69
Regroupement de consommation propre (RCP) 28, 144
Régulateur de débit volumique variable 125
Régulation de puissance 111
Régulation selon les besoins 125
Rendements lumineux 134
Résistance à la conduction thermique 68
Revêtement 58
Revêtements sélectifs 62
Risque d'humidité 56
Risque sur le plan hygiénique 116

S

Site 11, 14
Site 2000 watts 14, 22
SNBS 31
Solaire électrique 110
Solaire thermique 105, 110
Sous-structure 51

Standard de Construction Durable Suisse 31
Standard de Construction Durable Suisse SNBS 22
Surface de référence énergétique 6, 80, 82, 84, 106, 107, 110, 115, 120, 122
Surface vitrée 43
Surveillance contrôlée de la dépression 113
Systèmes à auto-apprentissage 152
Systèmes de réseau de chauffage à distance 12

T

Taux de consommation propre 26
Technologie à couche mince 139
Technologie d'absorbeur 108
Toiture inclinée 84
Toiture inversée 83
Toiture plate 82
Toitures chaudes 49
Transmission 59

V

Valeur g 61
Valeur U_{cw} 64
Vapeur d'eau 115
Ventilateurs 145
Ventilateurs par mélange 124
Ventilation 66
Ventilation par mélange 123
Ville 11, 13, 14
Vitrages de protection solaire 62
Vitrages isolants 62
Vitres 58