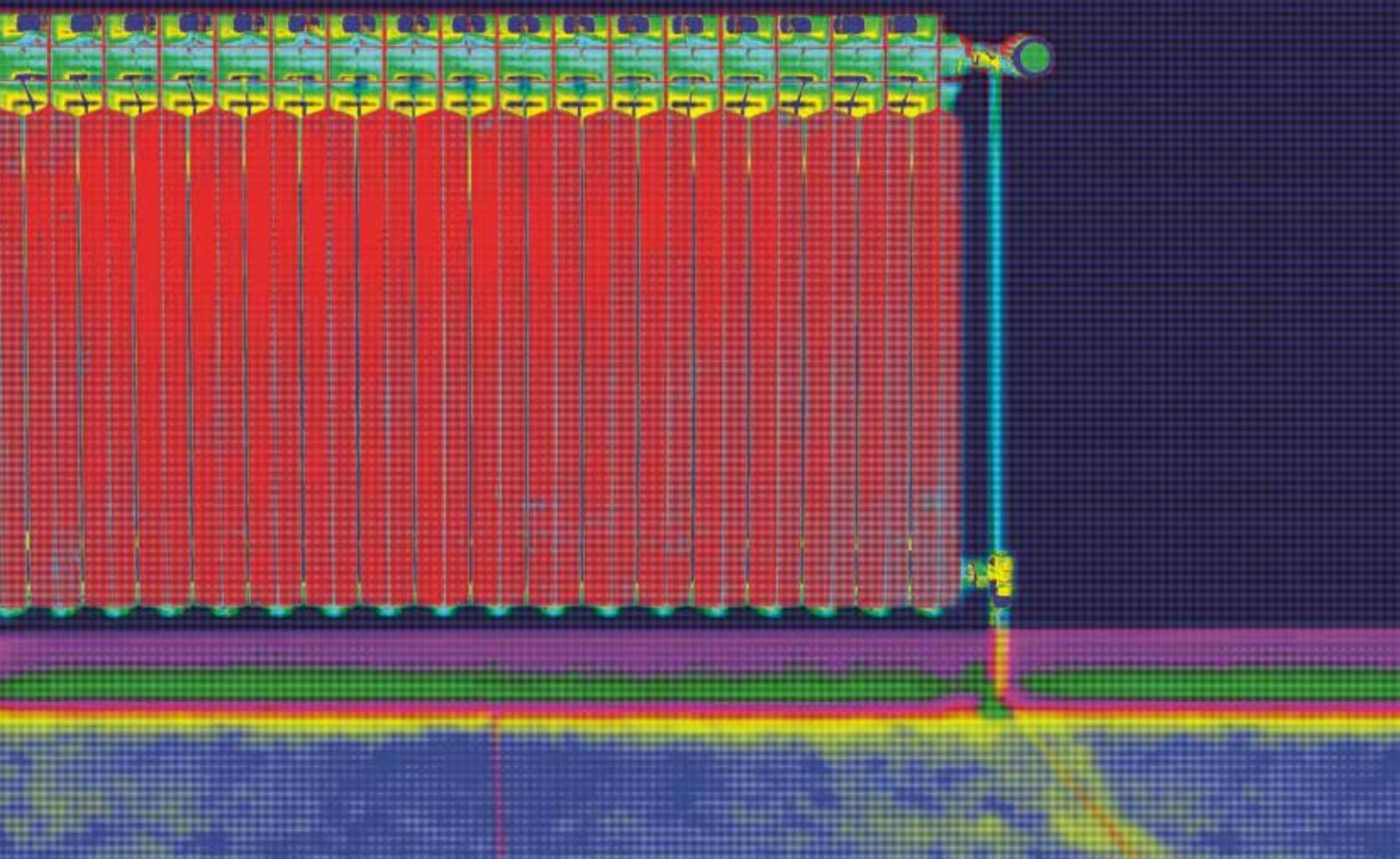


Reto von Euw (éd.)

Installations du bâtiment

Planification interdisciplinaire



Contenu

1. Une technique du bâtiment intégrale	5	6. Eclairage	177
1.1 Les avantages du travail d'équipe	5	6.1 Efficacité énergétique de l'éclairage	177
1.2 Installations techniques et durabilité	8	6.2 Lumière du jour	178
1.3 Confort et bien-être	16	6.3 Lumière artificielle	180
1.4 Installations techniques et énergie	23	6.4 Eclairage, bases et grandeurs	182
		6.5 Lampes et luminaires	185
2. Installations de chauffage	33	7. Appareils et installations électriques	189
2.1 Composants d'une installation de chauffage	33	7.1 Importance grandissante de l'électricité	189
2.2 Hydraulique de la distribution de chaleur	36	7.2 Cahier technique SIA 2056 «Electricité dans les bâtiments»	189
2.3 Pompes à chaleur	45	7.3 Consommation d'électricité d'un ménage et d'un poste de travail types	191
2.4 Pompes à chaleur – exemples pratiques	56	7.4 Mesure de la consommation électrique	192
2.5 Chauffages au bois	67	7.5 Moteurs électriques et convertisseurs de fréquence	193
2.6 Chauffages au bois – exemple pratique	72	7.6 Optimisation globale des installations techniques	194
2.7 Réseaux thermiques	74		
2.8 Réseaux thermiques – exemples pratiques	75	8. Automation du bâtiment	196
2.9 Couplage chaleur-force	77	8.1 Structure	197
2.10 Couplage chaleur-force – exemples pratiques	78	8.2 Fonctions	199
2.11 Installations solaires thermiques	80	8.3 Communication entre systèmes	199
2.12 Installations solaires thermiques – exemples pratiques	84	8.4 Mise en œuvre de l'automatisation du bâtiment	201
2.13 Emission de chaleur	92		
3. Froid climatique	95	9. Photovoltaïque	203
3.1 Signification, termes	95	9.1 Exigences générales	203
3.2 Fluides frigorigènes	99	9.2 Modules PV	203
3.3 Charges frigorifiques	105	9.3 Systèmes de montage	205
3.4 Production de froid	109	9.4 Câbles solaires	205
3.5 Emission de froid dans les locaux	120	9.5 Connecteurs	206
3.6 Tendances dans la technique frigorifique	125	9.6 Coffrets de raccordement	206
		9.7 Onduleurs	207
4. Renouvellement d'air	127	9.8 Dispositifs de protection et fusibles	208
4.1 Délimitation	127	9.9 Dispositifs de sectionnement et de commutation	208
4.2 Prescriptions et normes	127	9.10 Dispositifs de mesure	209
4.3 Qualité de l'air intérieur et débits d'air	128	9.11 Systèmes de communication	210
4.4 Termes, composants et fonctions	130	9.12 Accumulateurs (batteries)	210
4.5 Energie pour la ventilation et pertes de charge	136	9.13 Régulateurs de la consommation propre	211
4.6 Récupération de chaleur et taux de fuites	139	9.14 Rendement énergétique d'une installation PV	211
4.7 Types d'installation	146	9.15 Consommation propre	212
4.8 Systèmes de ventilation	149		
5. Alimentation d'eau chaude sanitaire	155	10. Annexe	215
5.1 Structure et composants	155	10.1 Auteurs	215
5.2 Indications générales pour la production d'eau chaude	158	10.2 Abréviations	216
5.3 Intégration hydraulique d'installations de production d'eau chaude	160	10.3 Index	219
5.4 Echangeurs de chaleur et production indirecte	161		
5.5 Concepts de charge	163		
5.6 Production d'eau chaude par des rejets thermiques	169		
5.7 Légionelles	172		

Impressum

Installations du bâtiment – Planification interdisciplinaire

Editeur: Reto von Euw

Auteurs: Reto von Euw, Zoran Alimpic,
Heinrich Huber, Björn Schrader,
Jürg Nipkow, Olivier Steiger et
Christof Bucher

Avec des contributions de:
Gianrico Settembrini, Marvin King et
René Mosbacher

Traduction:
Anna Piguët, Piguët architectes Sàrl

Rédaction et mise en page:
Faktor Journalisten AG, Zurich;
René Mosbacher, Christine Sidler,
Noemi Bösch

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

Commande: à télécharger gratuitement
sous www.suisseenergie.ch

2^e édition actualisée, novembre 2023

Avant-propos

Penser le système dans sa globalité

L'un des principaux objectifs de la première édition de cet ouvrage, parue en 2012, était de familiariser les concepteurs dans le domaine de la technique du bâtiment avec le «bâtiment comme un tout». Il faisait notamment référence à la représentation modulaire de la technique du bâtiment, telle qu'elle était décrite dans le projet de norme SIA 411 de l'époque.

Depuis, la technique du bâtiment s'est développée à une vitesse fulgurante, et les prescriptions légales et les normes ont également été adaptées aux exigences actuelles, dont la protection du climat est probablement l'exemple le plus marquant. L'environnement de travail des spécialistes de la technique du bâtiment est devenu plus complexe, mais aussi plus intéressant. Ils peuvent bénéficier de nouvelles solutions techniques, de nouveaux outils de travail et concepts qui leur permettent de mieux exploiter les synergies entre les différents corps de métier. Les coûts d'investissement et d'exploitation ainsi que les besoins en énergie s'en trouvent ainsi réduits et le confort des utilisateurs amélioré. En ce qui concerne ce domaine en particulier, face à la multiplication des vagues de chaleur, les bâtiments offrant un climat intérieur agréable même en été sont de plus en plus demandés.

Ce qui était vrai il y a dix ans l'est encore plus aujourd'hui: pour assurer une planification, une mise en œuvre et une exploitation optimales de la technique du bâtiment, il convient de l'appréhender comme un système global. Cela suppose de travailler de manière interdisciplinaire. C'est une condition qui ne peut être remplie que si tous les professionnels impliqués disposent d'une compréhension minimale des autres corps de métier. C'est cette compréhension que la nouvelle édition de cet ouvrage s'efforce toujours de transmettre en priorité. Il s'adresse aux professionnels de terrain et à ceux qui souhaitent le devenir. Le contenu a été entièrement remanié et mis à jour en fonction de l'état actuel de la technique et des normes. Les bases des différentes disciplines sont exposées de manière compacte dans les différents chapitres. Dès que cela s'avérait utile et possible, les chapitres ont été enrichis de valeurs caractéristiques, d'exemples, de solutions typiques et de conseils pour la planification. Cela permet d'obtenir une vue d'ensemble d'un corps de métier particulier ou de rechercher de manière ciblée un terme technique ou une valeur caractéristique.

Une technique du bâtiment intégrale

Reto von Euw
Gianrico
Settembrini
Heinrich Huber
Marvin King
René Mosbacher

1.1 Les avantages du travail d'équipe

«Construire» signifie allier forme, construction, matériaux et installations du bâtiment de manière à obtenir un résultat visuellement élégant et fonctionnel. Cela nécessite une équipe interdisciplinaire capable de s'entendre au-delà des frontières de chaque métier. La qualité de cette collaboration permet de créer une valeur ajoutée pour l'ensemble de ses participants. Celle-ci se traduit notamment par un confort accru pour les utilisateurs, une baisse des besoins en énergie et une diminution des coûts de fonctionnement et d'entretien. Atteindre ces objectifs implique de travailler à une nouvelle compréhension de la planification, de la construction et de l'exploitation de bâtiments. Les concepteurs sont chargés d'associer architecture, organisation des espaces et technique du bâtiment, et d'assurer la communication entre les différents corps de métier. Ils doivent être en mesure de proposer au maître d'ouvrage un projet global. Ils sont ainsi amenés à se confronter au «bâtiment comme un tout», à comprendre le concept et à le considérer dans le contexte de l'utilisa-

teur ou du maître d'ouvrage (figure 1.1). Les objectifs et le programme du projet, élaborés en équipe, sont à ajuster progressivement en intégrant judicieusement les outils modernes de simulation dynamique et les possibilités de la régulation automatique.

Des solutions appropriées

Les concepts et le savoir-faire actuels dans le secteur du bâtiment nous permettent de résoudre des problèmes complexes. Non pas dans le sens d'une multiplication des techniques utilisées, mais plutôt de l'application pertinente de techniques et de solutions appropriées. Pour cela, les spécialistes doivent rester conscients des interdépendances entre architecture et technique du bâtiment (tableau 1.1). Nous continuons à tendre vers des bâtiments de forme simple optimisant l'apport de lumière naturelle, l'orientation des façades, leur part vitrée, la masse thermique, l'étanchéité à l'air, la protection phonique, la sécurité, sans oublier l'agrément et la convivialité. Cela requiert une itération constante des différentes étapes de planification de la part de l'équipe tout en tenant compte des souhaits du maître d'ouvrage.

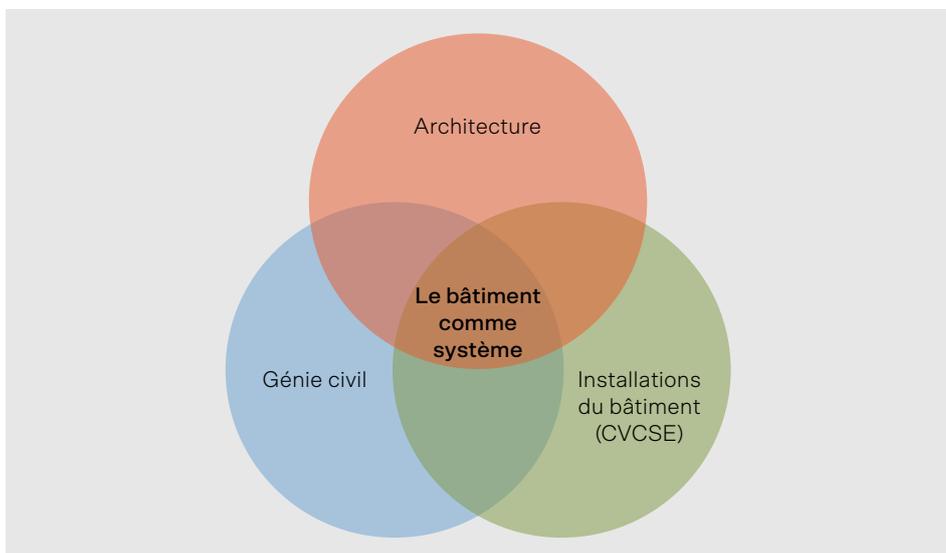


Figure 1.1: Le bâtiment comme système.

Une équipe interdisciplinaire doit donc prendre en charge la totalité d'un bâtiment. Le maître d'ouvrage, l'architecte, le concepteur financier, l'ingénieur civil ainsi que les ingénieurs spécialisés doivent, dans le cadre d'un partenariat coopératif, définir la charte de l'utilisateur, les objectifs ainsi que le projet. À chaque phase du projet, il doit être possible de remettre en question un élément, de l'optimiser et d'en assumer la responsabilité. La représentation modulaire de la technique du bâtiment est décrite dans la norme [SIA 411]. Elle s'applique aux bâtiments existants comme aux constructions nouvelles et a pour but, en qualité de norme de compréhension interdisciplinaire et intégrale, d'établir des passerelles entre les maîtres d'ouvrage, les architectes et les ingénieurs. L'idée est qu'une équipe interdisciplinaire utilise une terminologie commune facilitant ainsi la compréhension mutuelle (tableau 1.2). La méthode ne pose aucune exigence quant aux installations.

Les installations techniques du bâtiment courantes à savoir le chauffage, la ventilation, la climatisation, les installations sanitaires et électriques et l'automatisation du bâtiment (C-V-C-S-E-GTB) sont de

plus en plus interconnectées. C'est pourquoi il est essentiel d'avoir une compréhension globale de ces disciplines, et de les appréhender aussi bien comme des fonctions individuelles que comme un système technique global.

Pour les concepteurs, les différences entre constructions nouvelles et rénovations s'amenuisent. Dans les deux cas, les mêmes règles de planification intégrale s'appliquent. Dans les bâtiments administratifs de haute qualité, il convient de garantir la flexibilité de transformation et d'adaptation. Cela signifie que des espaces sous les planchers ou dans les plafonds et parois doivent permettre une adaptation simple des installations techniques du bâtiment. Pour la planification, le mode de valorisation et la disponibilité des ressources énergétiques du site sont déterminants. Ces dernières peuvent être consultées, entre autres informations, sur des géoportails numériques.

Exemple: utilisation de l'énergie solaire

L'exposition au soleil varie fortement en fonction du lieu, du moment de la journée, des conditions météorologiques et de l'orientation de la surface exposée.

Tableau 1.1: Relations entre architecture et technique du bâtiment.

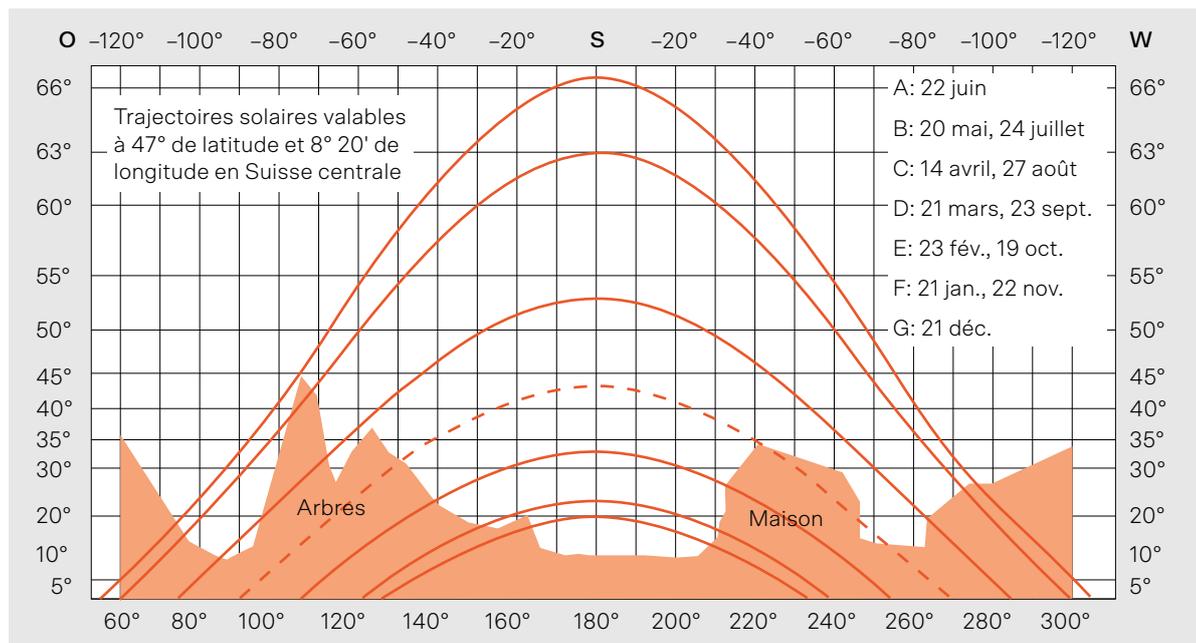
Utilisation de la lumière naturelle	Utilisation de la lumière naturelle versus compacité, c'est-à-dire une profondeur des locaux allant jusqu'à 6 m (fenêtres: transmission de lumière)
Orientation des façades	Prise en compte des apports solaires passifs. Orientation selon l'utilisation (p. ex. habitation sud-ouest/nord-est, bureau sud/nord)
Parts de surfaces vitrées optimisées pour chaque façade	Les façades entièrement vitrées ne sont pas confortables: échange de rayonnement trop important, influence négative des températures de surface, etc.
Masse thermique	Effets d'autorégulation, effet d'atténuation des influences du froid et de la chaleur (de l'intérieur et de l'extérieur)
Étanchéité à l'air	Barrière à un échange d'air non souhaité et ainsi à un flux d'énergie incontrôlé
Protection phonique	Limitation ciblée des immissions sonores
Protection thermique	Objectif: confort élevé et bilan énergétique optimal
Choix des matériaux	Prise en compte de l'énergie grise et des influences nocives pour la santé, préservation des ressources
Périmètre d'isolation	Définition la plus simple possible du périmètre d'isolation, en minimisant les ponts thermiques
Bilan des flux d'énergie	La puissance installée et la consommation d'énergie sont à calculer et à optimiser avec des logiciels de simulation dynamique si possible
Sécurité	Sécurité d'exploitation, prévention des accidents, protection contre l'incendie, etc.
Compatibilité sociale	Bâti pour des êtres humains, beau et juste, convaincant dans sa fonctionnalité

En outre, un ombrage inadéquat peut affecter l'utilisation de l'énergie solaire. La figure 1.2 montre comment représenter l'ombre portée d'un emplacement sous forme d'un diagramme.

Lors de la planification des installations techniques du bâtiment, il faut toujours essayer de trouver le compromis optimal entre l'utilisation de l'énergie solaire et la

protection des espaces intérieurs contre la surchauffe. Seule une véritable coordination entre les corps de métier concernés, tels que le chauffage, le refroidissement, la protection solaire, l'éclairage et la technique solaire peut permettre d'y parvenir.

Figure 1.2: Exemple d'un diagramme de la position du soleil avec le masque de l'horizon.



Systèmes partiels	Source/puits	Transformation	Stockage	Distribution	Local/transmission
Systèmes					
Installations de chauffage	Apport d'énergie	Génération de chaleur	Accumulation de chaleur	Distribution de chaleur	Dégagement de chaleur
Installations de ventilation et de climatisation	Air neuf/air rejeté	Traitement de l'air	Accumulation de la chaleur de l'air	Distribution d'air	Pulsion d'air
Installations frigorifiques	Apport d'énergie/puits de chaleur	Génération de froid/refroidissement	Accumulation de froid	Distribution de froid	Emission de froid
Installations sanitaires					
Installation d'alimentation en eau	Source d'eau	Traitement de l'eau	Stockage de l'eau	Distribution d'eau	Point de soutirage
Installation d'évacuation de l'eau	Eaux usées	Installation de décantation	Stockage des eaux usées	Conduites d'eaux usées	Objet avec évacuation d'eau
Installation d'approvisionnement en gaz	Source de gaz	Traitement du gaz	Réservoir de gaz	Distribution de gaz	Appareil consommateur de gaz
Installations électriques et de communication					
Installation électrique	Ligne de raccordement courant fort	Génération de courant fort	Accumulateur d'énergie	Installations (courant fort ou faible)	Consommateur
Installation de communication	Raccordement aux réseaux	Source de données	Mémoire de données	Installation de données et de communication	Consommateurs de données et de communication
Systèmes d'automatisation du bâtiment		Niveau terrain	Niveau automation		Niveau gestion

1.2 Installations techniques et durabilité

Agenda 2030 et ODD

Avec l'Agenda 2030, la communauté internationale s'est fixé pour la première fois des objectifs globaux pour un développement durable mondial. Les 17 «objectifs de développement durable» (ODD) et leurs 169 sous-objectifs en forment la clé de voûte (figure 1.3). Ils ont été adoptés par l'assemblée générale des Nations Unies en 2015.

La politique de l'environnement et des ressources est touchée par 11 des 17 objectifs et par 86 des 169 sous-objectifs. Voici les ODD les plus pertinents à cet égard:

- ODD 6: garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau
- ODD 12: établir des modes de consommation et de production durables
- ODD 13: prendre des mesures immédiates relatives à la lutte contre les changements climatiques et leurs effets
- ODD 15: préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, soutenir leur gestion durable

Les effets du changement climatique

Le terme «changement climatique» désigne la modification mondiale du climat, c'est-à-dire un réchauffement à l'échelle mondiale. Il est surtout dû à une modification des conditions de rayonnement dans l'atmosphère, qui résulte

principalement de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES) tels que le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et la vapeur d'eau (H_2O). Selon les scénarios climatiques [CH2018] et si les émissions de GES continuent d'augmenter, il pourrait faire jusqu'à 4,5°C plus chaud en Suisse au milieu du siècle pendant l'été d'une année moyenne comparé à aujourd'hui.

Changement climatique et construire

Dans ce contexte, la construction doit répondre à deux exigences (figure 1.4): d'une part, il s'agit de lutter contre les causes, c'est-à-dire de réduire les émissions de GES. D'autre part, les effets négatifs du changement climatique sur les utilisateurs et sur les alentours d'un bâtiment doivent être réduits. Il faut donc construire en adaptant les bâtiments aux futures conditions climatiques.

Climat et stratégie énergétique

Le Conseil fédéral a formulé l'objectif de la «neutralité climatique de la Suisse d'ici 2050» dans le cadre de la stratégie d'adaptation aux changements climatiques. Les objectifs d'efficacité énergétique y relatifs ont été fixés dans la Stratégie énergétique 2050 de la Confédération. La Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA) soutient cette stratégie. Son document de position «Protection du climat, adaptation climatique et énergie» [SIA 2020] définit à cet effet les principes directeurs suivants:

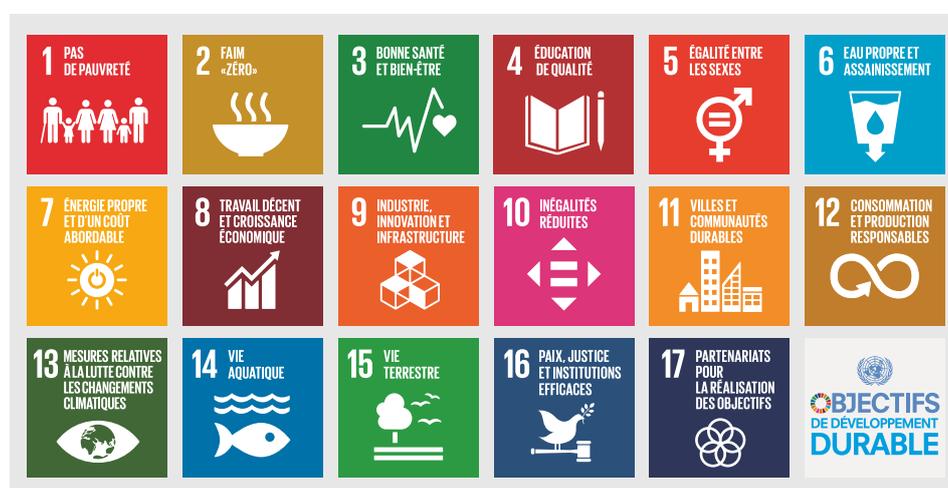


Figure 1.3: Les «Objectifs de Développement Durable» des Nations Unies.
(Source: <https://sdgs.un.org/goals>)

- La SIA revendique un parc immobilier et des infrastructures à grande efficacité énergétique et à zéro émission nette de gaz à effet de serre.
- La SIA soutient l'usage parcimonieux des ressources et le développement d'une économie circulaire.
- Le parc immobilier et les infrastructures contribuent à la production d'énergies renouvelables et à la sécurité de l'approvisionnement.
- La priorité est donnée à des usages efficaces et au principe de sobriété.
- Le climat du futur est dès aujourd'hui pris en compte dans les études pour la construction.
- La SIA participe activement aux transformations exigées par le changement climatique.

Décarbonisation du parc immobilier

Les émissions annuelles de GES de la Suisse représentent environ 45 mio. de tonnes de CO₂, dont près de 40 % sont générées par le parc immobilier; 24 % sont dus à l'exploitation des quelque 2,3 millions de bâtiments, c'est-à-dire à la consommation d'énergie pour la climatisation, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage ou d'autres installations techniques du bâtiment. 16 % sont des émissions «grises» de GES, qui résultent notamment de la construction des bâtiments ainsi que de la production et du

transport des matériaux et des éléments de construction [OFEV 2020].

L'importance de ces émissions grises de GES est confirmée dans le cahier technique [SIA 2040] Voie SIA vers l'efficacité énergétique. Celui-ci fixe des valeurs cibles en fonction de chaque catégorie de constructions pour des bâtiments faibles en émissions, compatibles avec la société à 2000 watts. La norme [SIA 2040] fournit des valeurs indicatives pour leur exploitation et leur construction ainsi que pour la mobilité induite. Aujourd'hui, la charge environnementale pour la construction est en général nettement plus élevée que pour l'exploitation. Pour les nouveaux bâtiments d'habitation, la valeur indicative actuelle des émissions de GES est de 9,0 kg/m² par an pour la construction, 4,0 kg/m² par an pour la mobilité et 3,0 kg/m² par an pour l'exploitation.

Construction de bâtiments

La charge environnementale pour la construction d'un bâtiment correspond à la somme des écobilans de tous les éléments ou matériaux de construction utilisés dans le bâtiment. L'écobilan est obtenu en multipliant les quantités des éléments évalués par l'écofacteur des éléments de construction correspondant (figure 1.5).

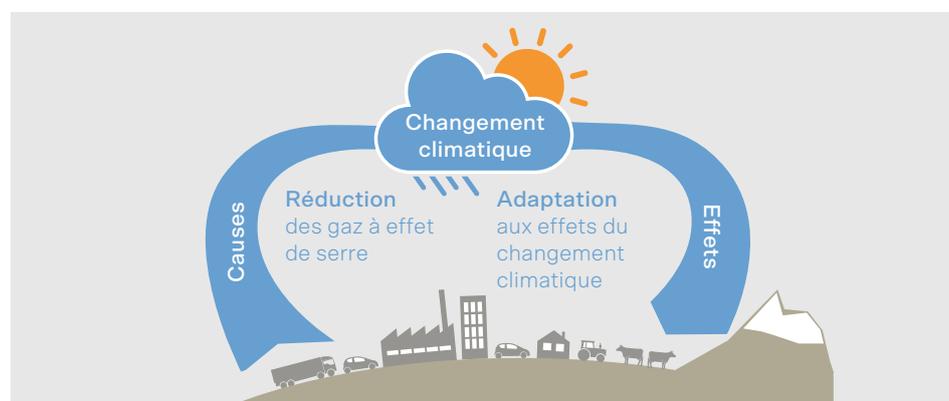


Figure 1.4: Interaction entre parc immobilier et climat: les bâtiments sont à la fois responsables du changement climatique et affectés par celui-ci. (Source: [OFEV 2019])

Grille quantitative Façade opaque [unité] Façade fenêtre [unité] Piliers [unité]	×	Ecofacteur UBP/[unité] MJ/[unité] kg CO ₂ /[unité]	=	Ecobilan Ecopoints (UBP) Energie grise (PEne) Emissions grises de GES
--	----------	---	----------	---

Figure 1.5: Méthodologie pour le calcul de l'écobilan des bâtiments. L'écofacteur est défini par matériau de construction dans la recommandation [KBOB 2022].

Pour représenter la qualité écologique, la recommandation [KBOB 2022] Données des écobilans dans la construction fournit les facteurs environnementaux des matériaux de construction et des composants techniques du bâtiment dans trois grandeurs caractéristiques:

- Energie grise
- Emissions de gaz à effet de serre
- Ecopoints UBP (ou unités de charge écologique, UCE)

L'énergie grise et les émissions grises de GES représentent respectivement l'énergie primaire non renouvelable dépensée et les GES émis pour la production et l'élimination des matériaux de construction. Les unités de charge écologique sont égales à la quantité d'une substance multipliée par l'écofacteur respectif issu de la «méthode de la saturation écologique». Depuis 2022, les données des écobilans comprennent l'hydrate de carbone biogène contenu dans les matériaux et les éléments de construction. De manière analogue à l'analyse des coûts, l'écobilan d'un bâtiment peut être déterminé au moment de sa construction, c'est-à-dire en tant que total de l'énergie grise des éléments de construction apportés lors de la construction (coûts d'investissement) ou sur toute la durée de vie du bâtiment (coûts du cycle de vie). Dans la deuxième méthode, la détermination de la durée d'utilisation du

bâtiment, respectivement des différents éléments de construction, joue un rôle essentiel. Le cahier technique [SIA 2032] «Energie grise – Etablissement du bilan écologique pour la construction des bâtiments» fournit à cet égard des bases uniformes. Il fixe à 60 ans le cycle de vie normalisé des bâtiments et définit la durée de vie des différents éléments de construction (durées d'amortissement). Cela signifie qu'un élément de construction ayant une durée de vie de 30 ans (p. ex. des capteurs solaires) est fabriqué deux fois et éliminé deux fois au cours du cycle de vie du bâtiment.

Energie grise dans les installations techniques

Outre la forme, l'enveloppe et la structure porteuse, les installations techniques déterminent aussi dans une large mesure l'énergie grise d'un bâtiment. Par exemple, dans le cas du bâtiment commercial et résidentiel de 7 étages nommé «Sihlbogen» (tableau 1.3), construit en 2012 sur un site 2000 watts, la part de l'énergie grise imputable à la technique du bâtiment atteint 23%. La part des émissions de GES s'élève quant à elle à 18%. Etant donné que la tendance est à une plus grande technicité des bâtiments, ce pourcentage peut être encore plus élevé aujourd'hui.

La figure 1.6 présente la répartition de l'énergie grise de différentes installations et différents composants techniques issus d'exemples de bilans. Il est frappant de constater que, dans les bâtiments résidentiels, administratifs et scolaires étudiés, les installations de chauffage, de ventilation et électriques représentent chacune environ 30% de l'énergie grise. Les installations sanitaires sont responsables des 10% restants.

Installations de chauffage: ce sont surtout les systèmes de distribution (corps de chauffe, chauffages au sol, plafonds chauffants et réfrigérants) qui contribuent de manière significative à l'énergie grise. L'élément déterminant pour le bilan est à chaque fois la présence ou non

Tableau 1.3:
Caractéristiques de
l'objet Sihlbogen.
(Source: Basler &
Hofmann Ingenieure
und Planer AG)

Caractéristiques de l'objet	
Localisation	Zurich-Leimbach
Type de bâtiment	Bâtiment commercial et résidentiel de 7 étages
Année de construction	2012
Coût total de la constr. (CFC 2)	env. 90 mio. de francs
Surface de plancher	9860 m ²
Surface de plancher extérieure des balcons	1326 m ²
Surface de référence énergétique	8583 m ²
Surface d'enveloppe du bâtiment	8149 m ²
Facteur d'enveloppe	0,95
Besoin en énergie calorifique Q _n	56 MJ/m ² a
Energie grise pour la réalisation	3590 MJ/m ² SRE
Energie grise pour l'élimination	627 MJ/m ² SRE
Total de l'énergie grise par an	102 MJ/m ² a

de sondes géothermiques. Elles représentent jusqu'à plus de 60 % de l'énergie grise pour la construction d'un système de chauffage. En revanche, le type de générateur de chaleur et la distribution de la chaleur sont moins décisifs.

Installations de ventilation: l'énergie grise est majoritairement occasionnée par les conduites de ventilation galvanisées (env. 30 à 40 %) et les appareils de ventilation (env. 20 à 30 %). Les conduites de ventilation en PE jouent un rôle moins important dans l'écobilan – leur utilisation présente toutefois des inconvénients dans une perspective globale: noyées dans du béton, elles vont à l'encontre du principe de séparation des systèmes. Sinon, elles sont généralement posées dans un faux-plafond. Quel que soit le système, la distribution de l'air est responsable d'environ 50 à 65 % de l'énergie grise pour la construction des installations de ventilation. Cela montre l'importance des concepts dotés de conduites courtes, tels ceux qui peuvent être mis en

œuvre avec des éléments actifs de transfert d'air ou par la circulation de l'air à travers les portes ouvertes (démarches low-tech). Les registres terrestres engendrent beaucoup d'énergie grise pour la construction, notamment s'ils sont construits avec du béton.

Installations sanitaires: l'énergie grise des installations sanitaires dépend essentiellement de la distribution de l'eau et du niveau d'équipement; elle est donc variable. La disposition judicieuse des colonnes montantes et le nombre d'appareils jouent un rôle déterminant dans le bilan. Une utilisation de l'eau grise ou de l'eau de pluie occasionne une dépense supplémentaire en énergie grise, mais réduit la consommation d'eau propre.

Installations électriques: les câbles et les tuyaux d'installation représentent respectivement 40 à 60 % et 20 à 35 % de l'énergie grise. Les matières synthétiques et le cuivre influencent en conséquence l'écobilan. La part de cuivre, en

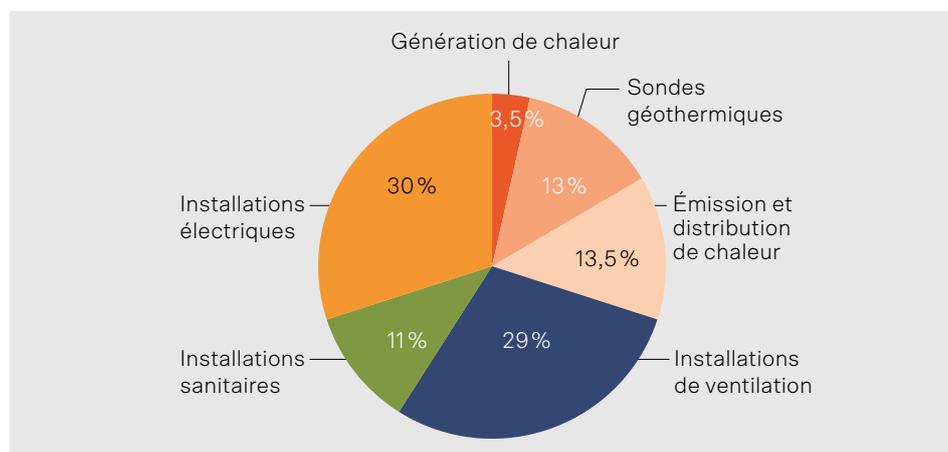


Figure 1.6: Energie grise des installations techniques répartie sur les différents systèmes et groupes d'éléments. Parts moyennes, arrondies à 0,5%, selon les inventaires de cycle de vie portant sur 16 bâtiments avec différentes affectations de [Klingler 2014], [Klingler 2011] et [Gugerli 2015].

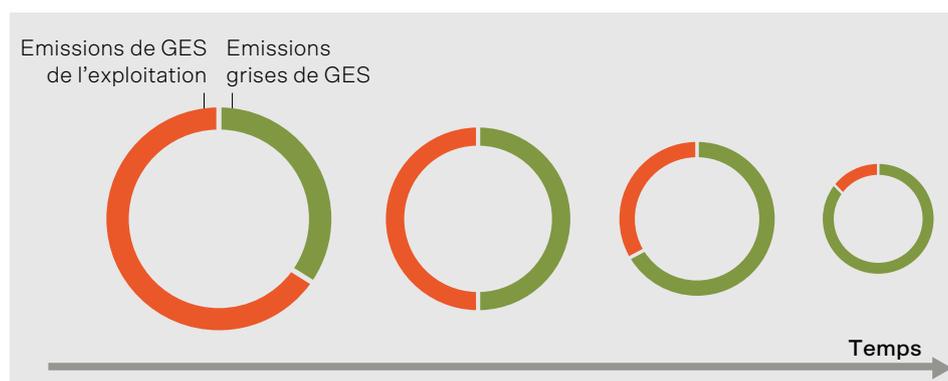


Figure 1.7: Tendances des émissions de GES au cours du cycle de vie d'un bâtiment, réparties sur l'exploitation et la réalisation (émissions grises de GES). (Source: [Bionova 2018])

particulier, a un impact important sur les écopoints. De manière générale, l'énergie grise pour la réalisation des installations électriques dépend du niveau d'équipement. Dans les bâtiments de haute technologie, leur part dans l'énergie grise totale peut atteindre plus de 10%.

Evolution de la décarbonisation

Au cours des 30 dernières années, les émissions totales de GES en Suisse ont diminué de 15% et de près du double dans le domaine de la construction [Stratégie climatique]. Néanmoins, pour respecter le Traité de Paris sur le climat (2015), les émissions de GES doivent être réduites de moitié d'ici 2030 par rapport à 1990.

La figure 1.7 montre qu'actuellement la décarbonisation du secteur de la construction se limite principalement à l'exploitation. Cependant, pour atteindre l'objectif de zéro émission nette, il faut également réduire les émissions grises de GES. Les chaînes d'approvisionnement des matériaux de construction utilisés, c'est-à-dire l'extraction des matières premières, la transformation et le transport, l'entretien des bâtiments et la déconstruction, jouent un rôle important à cet égard (figure 1.8).

La réduction des émissions grises de GES pour la construction d'un bâtiment est moins évidente que pour son exploitation. Des principes généraux peuvent toutefois être dégagés pour améliorer le bilan des GES à différents niveaux de planification:

Bâtiment: projet et mise en place; réduction de la part de constructions en sous-sol; suffisance et efficacité: sobriété et compacité; longue durée d'utilisation

Construction: construction légère; séparation des systèmes: gros œuvre, second œuvre et aménagements intérieurs en tenant compte de la durée de vie du composant; systèmes composites facilement séparables

Matérialisation: matériaux de construction minéraux ou renouvelables optimisés pour le climat; éléments de construction faisant office de stockage intermédiaire de carbone; réutilisation d'éléments de construction et de matériaux de construction (approche circulaire).

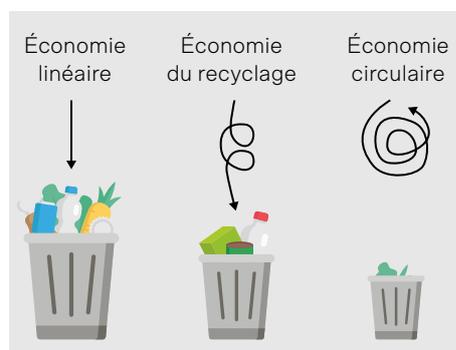


Figure 1.9: La quantité de déchets diminue lors du passage d'une économie linéaire à une économie circulaire. (Source: <https://muntagnard.ch>)

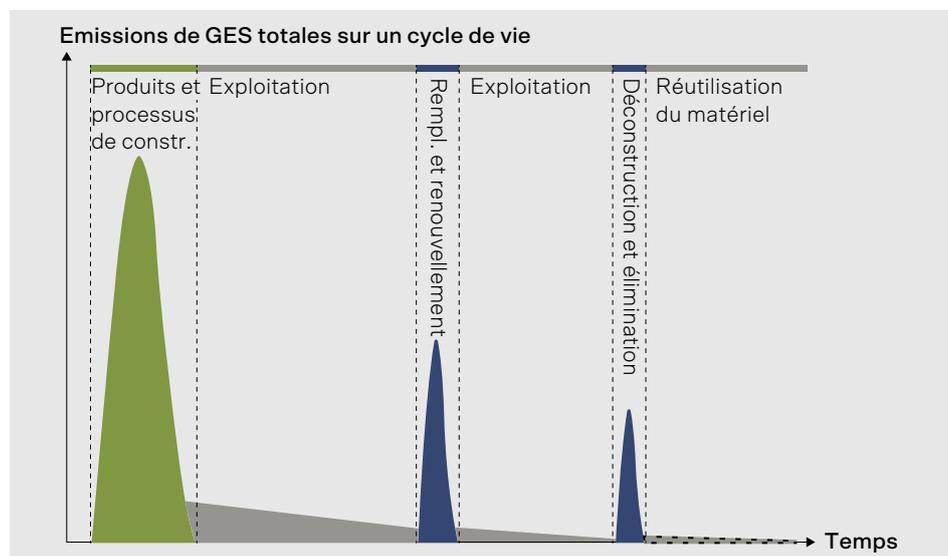


Figure 1.8: Pics des émissions de GES cumulées au cours du cycle de vie d'un bâtiment. (Source: [WBCSD 2021])

Economie circulaire

Penser circulaire: notre système économique est fortement conditionné par un modèle commercial linéaire. Les produits sont fabriqués, utilisés, puis éliminés. La Suisse affiche l'un des plus gros volumes de déchets au monde. Chaque année, environ 85 millions de tonnes de déchets y sont produites, dont la plus grande partie (environ 84 %) provient du secteur de la construction. Cela représente environ 57 millions de tonnes de matériaux d'excavation et de percement ainsi que 17 millions de tonnes de matériaux de déconstruction [OFEV 2021]. Les matériaux de construction sont principalement composés de matières premières primaires, qui sont disponibles en quantité limitée. Leur recyclage ou leur réutilisation permet de réduire d'autant la consommation de matières pre-

mières primaires. L'optimisation des cycles et l'utilisation de matériaux et d'éléments de construction secondaires représentent un potentiel de réduction des émissions de GES encore inexploité (figure 1.9).

Limites du système: la norme [SN EN 15804] englobe les phases de l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment. Pour la limite «construction» selon la norme [SIA 2040], le cahier technique [SIA 2032] décrit en détail l'établissement du bilan écologique, respectivement de l'énergie grise, mais seule une partie des phases est couverte (tableau 1.4). De même, le bilan ne comporte pas non plus les éventuels crédits qui résulteraient de la réutilisation, de la récupération ou du recyclage des matériaux de construction. Or, de tels crédits

Tableau 1.4: Phases du cycle de vie et modules pour la description et l'évaluation d'un bâtiment. Le domaine «Construction» et l'écobilan selon la norme [SIA 2032] ne couvrent qu'une partie de la définition du cycle de vie selon [SN EN 15804]. En font partie la phase de fabrication (module A), le remplacement pendant la phase d'utilisation (B4) ainsi que la phase d'élimination (module C). La phase de construction (A4/A5) est en partie négligée. Hormis le remplacement, la phase d'utilisation (module B) ne fait pas partie de [SIA 2032], respectivement de l'établissement de l'écobilan. En option, il est possible de prendre en compte les crédits et les charges en dehors des limites du système selon la norme [SN EN 15804], qui résultent du potentiel de réutilisation, de récupération et de recyclage (module D). Selon SN EN ISO 14044, ces éléments ne sont indiqués qu'à titre informatif lors de l'établissement d'un écobilan.

Informations pour l'évaluation d'un bâtiment																	
Données relatives au cycle de vie du bâtiment														Informations complémentaires en dehors du cycle de vie du bâtiment			
Phases selon SN EN 15804	Phase de fabrication			Phase de constr.		Phase d'utilisation							Phase d'élimination				Avantages et inconvénients en dehors des limites du système
	Mise à disposition des matières premières	Transport	Fabrication	Transport	Construction, pose	Utilisation	Maintenance	Réparation	Remplacement	Rénovation	Besoin d'énergie pour l'exploitation	Besoin d'eau pour l'exploitation	Déconstruction, démolition	Transport	Traitement des déchets	Elimination	
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	
Domaine «Construction» selon SIA 2032	x	x	x	(x)	(x)				x				x	x	x	x	
Module D																	

peuvent être intéressants. Ainsi, la surélévation de la halle 118 à la Lagerplatz à Winterthur, réalisée en 2021, a permis de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre grâce à un taux de réutilisation élevé (jusqu'à 50 %).

Approches de la circularité

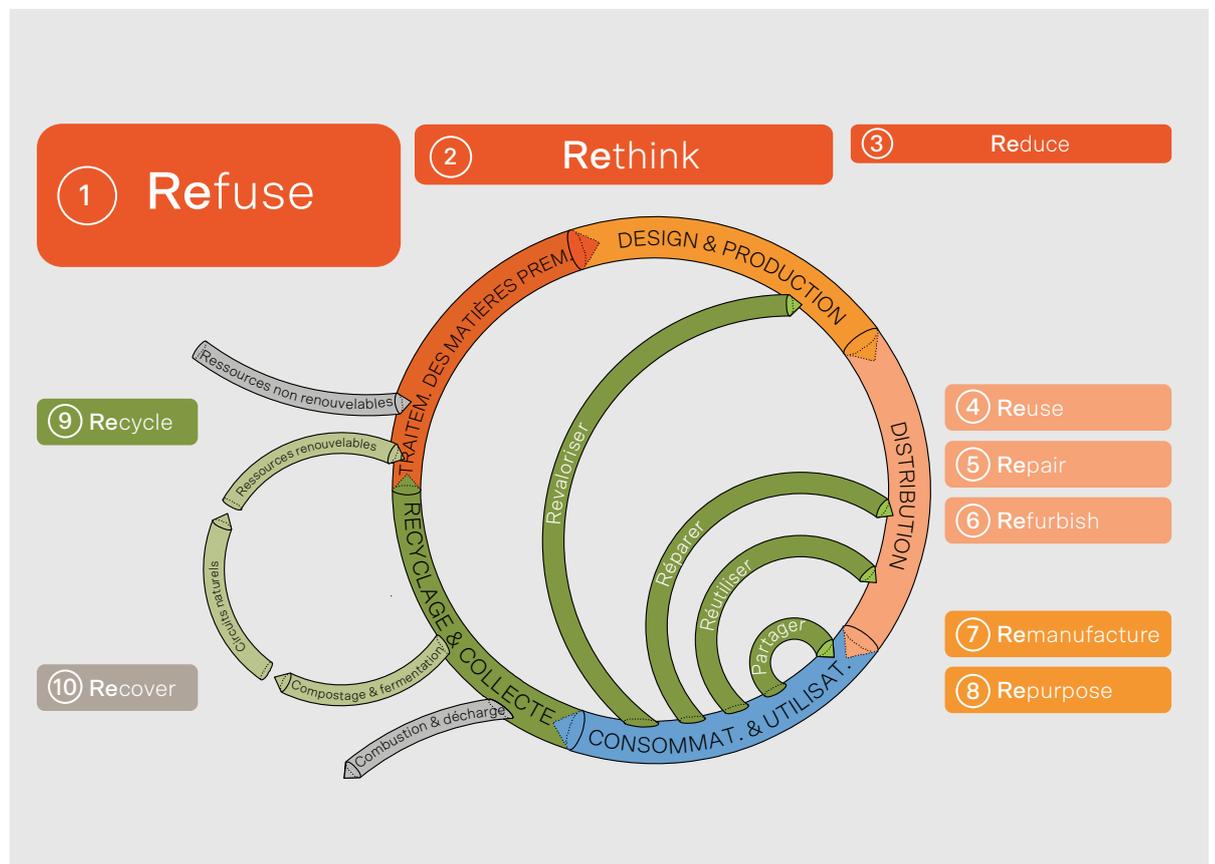
L'économie circulaire se caractérise par une utilisation efficace des matières premières. Il s'agit d'une approche globale qui prend en compte l'ensemble du cycle: de l'extraction des matières premières à la phase d'utilisation la plus longue possible d'un produit et son recyclage, en passant par sa conception, sa production et sa distribution [OFEV 2022].

Le principe linéaire «produire-consommer-éliminer» de notre modèle économique actuel doit être remplacé à l'avenir par des cycles de matériaux fermés, débarrassés du superflu. Pour y parvenir, la liste des priorités des «dix R» de l'économie circulaire peut être un outil intéressant (figure 1.10):

- **R1** Refuse: renoncer à utiliser des matières premières
- **R2** Rethink: réexaminer
- **R3** Reduce: réduire le recours aux matières premières
- **R4** Re-use: réutiliser les produits utilisés ou partagés
- **R5** Repair: réparer et entretenir
- **R6** Refurbish: rénover: transformer
- **R7** Remanufacture: fabriquer de nouveaux produits à partir d'anciens
- **R8** Repurpose: réorienter
- **R9** Recycle: recycler par la transformation physique ou chimique de la matière
- **R10** Recover: récupérer de l'énergie

La liste des priorités, à savoir les «dix R», donne lieu aux conclusions suivantes: le bâtiment le plus «vert» est toujours celui qui n'a jamais été construit. Par ailleurs, le recyclage (R9) des matériaux de construction, qui est aujourd'hui au centre des préoccupations, n'est que l'avant-dernière mesure à retenir du point de vue de l'économie circulaire.

Figure 1.10: Priorités des «dix R» dans l'économie circulaire. L'économie circulaire est basée, sous une forme atténuée, sur le principe du «Cradle to Cradle». Construire de manière circulaire signifie minimiser l'utilisation des ressources ainsi que la production de déchets. «Cradle to Cradle» va encore plus loin et vise à éviter complètement les déchets. Il s'agit donc d'une économie circulaire parfaite. (Source: M. King/OFEV)



Il s'agit ici de trouver un moyen de s'éloigner des paradigmes bien établis et de donner plus d'importance aux niveaux R1 à R8.

Elargir nos considérations

La construction circulaire est complexe et concerne non seulement l'utilisation des matériaux et des ressources, mais aussi, entre autres, la gestion de l'énergie et de l'eau. Il s'agit de beaucoup plus que de simplement prolonger la durée de vie d'un bâtiment en l'entretenant ou de préserver les ressources en réutilisant des éléments de construction. La construction circulaire nécessite des niveaux d'évaluation très différents et une vue d'ensemble condensée (figure 1.10). Ce qui a été dit plus haut concernant les matériaux de construction vaut également pour les installations techniques: dans une perspective provocatrice, on peut alors dire que les installations techniques «les plus vertes» sont celles qui ne sont pas installées. Dans ce domaine, il s'agit donc aussi en premier lieu de trouver des solutions simples et adaptées aux exigences, qui peuvent relever dans certains cas aussi de concepts low-tech.

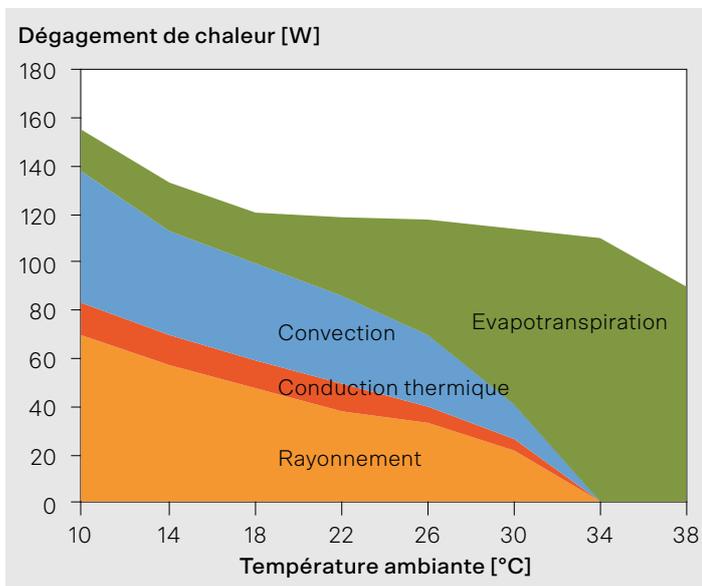
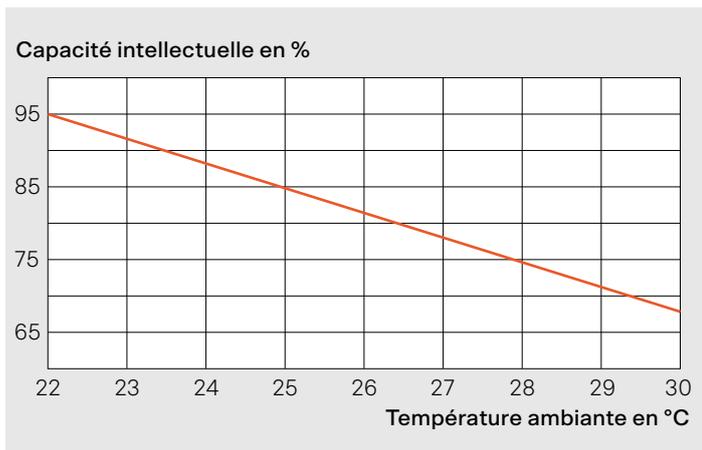
En contrepartie, les installations techniques contribuent également à la production d'énergie et à l'efficacité du bâtiment. Un équilibre judicieux doit donc être trouvé lors de l'élaboration de la conception technique du bâtiment.

1.3 Confort et bien-être

Un bon climat intérieur commence par l'architecture. Les bâtiments doivent être conçus de manière à offrir un confort optimal pour la moindre complexité technique. Les exigences concrètes à cet égard découlent de l'affectation du bâtiment. Ainsi, dans un musée d'art, le maintien continu de l'humidité ambiante à une valeur prescrite est la priorité absolue. Dans un bâtiment administratif en revanche, il s'agit avant tout d'assurer un confort thermique qui favorise le travail des collaborateurs (figure 1.11). Et dans un immeuble d'habitation, il convient d'accorder plus d'importance aux différentes habitudes de vie que dans une école, par exemple.

Figure 1.11: Capacité intellectuelle en fonction de la température ambiante.

Figure 1.12: Dégagement de chaleur de l'être humain (assis, aucune activité corporelle, habillement normal, air stationnaire). (Source: Recknagel)



Des exigences que les architectes ne peuvent remplir seuls. Lors de la planification, ils font donc appel, entre autres, à des spécialistes de la physique du bâtiment, de l'acoustique des salles et, précisément, des installations techniques du bâtiment. Il est toutefois important que la responsabilité globale reste entre les mains des architectes. Si les bâtiments sont optimisés par rapport au climat intérieur, les exigences en matière de chauffage et de climatisation évoluent également. Une bonne isolation thermique, par exemple, rend inutiles les systèmes puissants et à réaction rapide. Dans ce cas, la complexité technique est transférée du chauffage et du refroidissement au renouvellement de l'air. Ce concept s'appelle la «climatisation douce».

Confort thermique

L'être humain dispose d'un système de contrôle thermique très flexible qui stabilise sa température corporelle dans des limites étroites en équilibrant production de chaleur interne et refroidissement externe par rayonnement vers les surfaces environnantes, ainsi que par convection dans l'air environnant. Ce n'est que lorsque le corps ne peut plus maintenir sa température par rayonnement et par convection qu'il accroît le transport de l'eau à la surface de la peau. C'est ce que l'on appelle la transpiration. Ce processus refroidit le corps par évaporation (figure 1.12).

Le paramètre de confort le plus important est la température ambiante opérative. Il s'agit de la moyenne arithmétique des températures de surface moyennes des parois environnantes et de la température ambiante.

L'unité «met» (pour métabolisme, angl. metabolism) sert à mesurer le métabolisme énergétique de base du corps et donc la production de chaleur. 1 met correspond à env. 60 W/m², cela représente approximativement la production de chaleur d'une personne assise, pour 1 m² de surface corporelle.

Les personnes se sentent particulièrement bien lorsque la chaleur qu'ils dégagent par rayonnement vers les surfaces environnantes et par convection (y.c. la respiration) vers l'air se répartit dans un rapport de 45 à 50 (figure 1.14). C'est l'une des raisons pour lesquelles la climatisation conventionnelle, dans laquelle seule la température de l'air est contrôlée, ne peut être totalement satisfaisante.

La température ambiante (opérative) optimale dépend du niveau d'activité et de la valeur d'isolation thermique intégrale de l'habillement. Cette dernière est donnée comme facteur d'habillement «clo» (de l'anglais clothing, habillement). Pour un homme vêtu d'un costume mi-saison, d'une chemise à manches longues, d'une cravate, de chaussettes courtes et de chaussures de ville légères, il faut considérer un facteur d'habillement de 1,1. Pour un habillement d'été confortable avec chemise à manches courtes, pantalon de coton léger et pieds nus dans des mocassins légers, la valeur correspondante s'élève à seulement 0,5. La satisfaction prévisible des utilisateurs par rapport au confort du local est

Tableau 1.5: Données biophysiques de l'être humain.

Figure 1.13: Production de chaleur et valeurs «met» en fonction de l'activité physique (surface corporelle d'un adulte d'environ 1,8 m²).

Poids	60 kg à 90 kg
Volume corporel	0,075 m ³
Pouls	60/min à 80/min
Respirations	16/min
Quantité d'air inspirée	0,5 m ³ /h
Expiration de CO ₂ (au repos)	18 l/h à 20 l/h
Température corporelle	37 °C
Température moyenne de la peau	32 °C à 33 °C
Transfert thermique de base	70 W à 80 W
Puissance continue	85 W
Vitesse d'évapotranspiration	40 g/h à 50 g/h

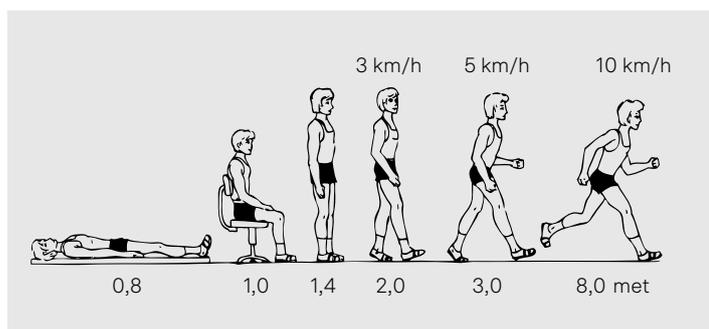


Figure 1.14: Dégagement de chaleur par l'être humain. (Source: Robert Meierhans)

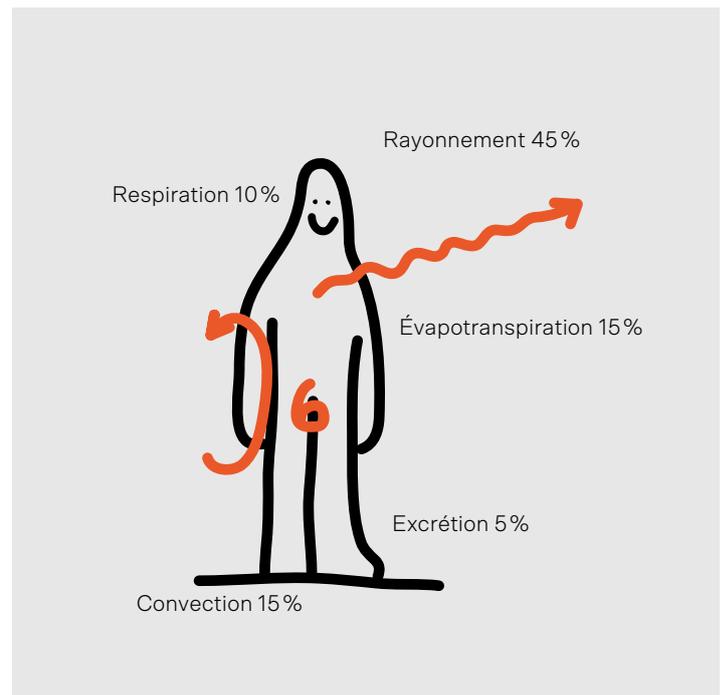
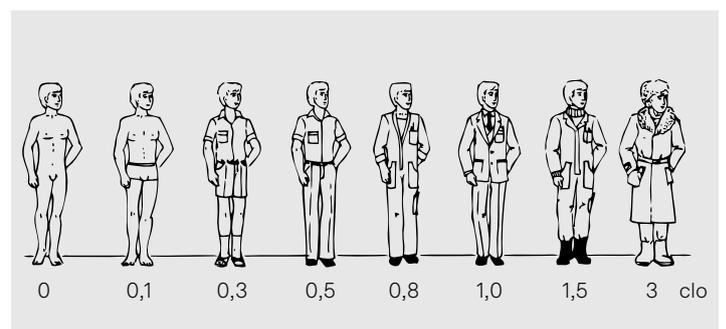


Tableau 1.6: Sensibilité du corps.

Figure 1.15: Résistance thermique de l'habillement et valeurs «clo» correspondantes.

Paramètre	Seuil de sensibilité	Evaluation
Température ambiante	± 0,5 °C	Très sensible
Différence entre température de l'air et température des surfaces	2 K	Très sensible
Mouvement d'air à proximité de la peau	0,1 m/s	Très sensible
Chaleur rayonnante	25 W/m ²	Sensible
Humidité relative de l'air	±15%	Peu sensible



décrite par l'indice PPD (Predicted percentage of dissatisfied) (figure 1.16). Il s'agit d'un pourcentage attribué de manière fixe à l'indice PMV (Predicted mean vote, vote moyen prévisible). Le PPD concorde, dans les limites de l'incertitude statistique, avec l'évaluation d'un plus grand nombre de sujets. Les indices

PMV et PPD décrivent des ressentis thermiques pouvant aller de «trop chaud» à «trop froid» pour l'ensemble du corps. L'inconfort thermique peut cependant également être ressenti en lien avec des critères individuels. Les courants d'air constituent l'une des causes d'inconfort les plus souvent mentionnées.

Figure 1.16: Rapport entre la part prévisible d'insatisfaits et le vote moyen prévisible en matière de confort thermique. Ecarts par rapport à la température «neutre» en K (selon la norme [SN EN ISO 7730]).

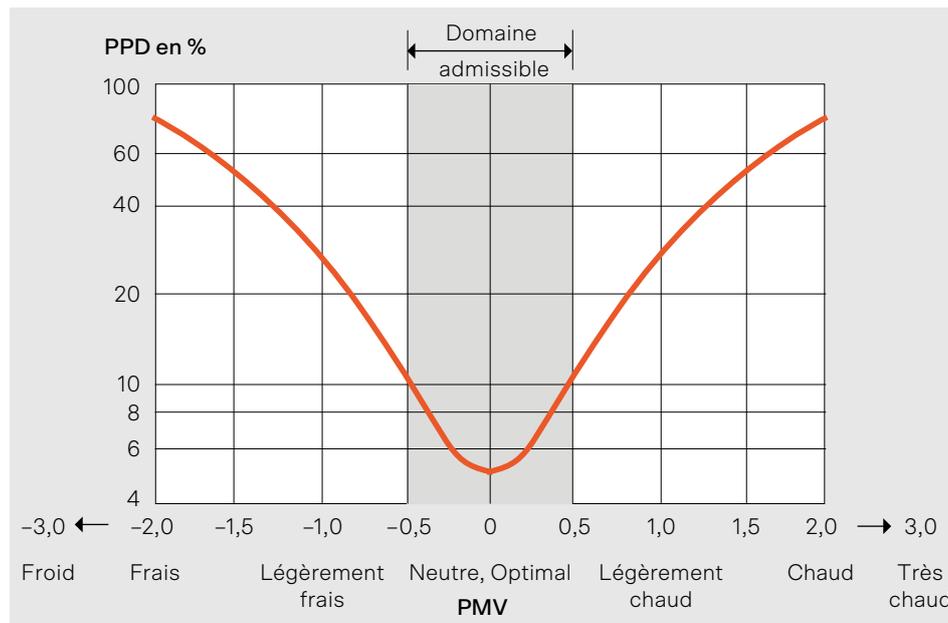


Tableau 1.7: Valeurs «clo» des variantes d'habillement et leur résistance thermique.

Type d'habillement	clo	m ² K/W
Non vêtu, nu	0	0
Vêtements de gymnastique, vêtements d'été (détente): sous-vêtements, shorts, chaussettes, baskets, sandales	0,3 à 0,4	0,06
Vêtements d'été légers: chemise courte ouverte, pantalon long léger, chaussettes, chaussures	0,5	0,078
Vêtements de travail solides, costume de ville léger, vêtements d'intérieur en hiver: chemise (manches longues), pantalon, veste légère, pull-over	≈ 1,0	0,16

Tableau 1.8: Catégories d'exigences en matière de confort thermique (selon la norme [SN EN ISO 7730]).

Catégorie (part d'insatisfaits)	Description
A: moins de 6 %	Attentes très importantes en matière de climat ambiant; recommandé pour les locaux dans lesquels se tiennent des personnes très sensibles et ayant des besoins particuliers.
B: moins de 10 %	Attentes normales
C: moins de 15 %	Attentes acceptables, modérées

Tableau 1.9: Plages de température adaptées pour les habitations et bureaux conditionnés.

Catégorie	Température ambiante °C Été, vêtements d'été: 0,5 clo/1,2 met, plage de tolérance	Température ambiante °C Hiver, vêtements d'hiver: 1,0 clo/1,2 met, plage de tolérance
	A	24,0 °C – 26,0 °C
B	23,5 °C – 26,5 °C	19,0 °C – 24,0 °C
C	23,0 °C – 27,0 °C	18,0 °C – 24,0 °C

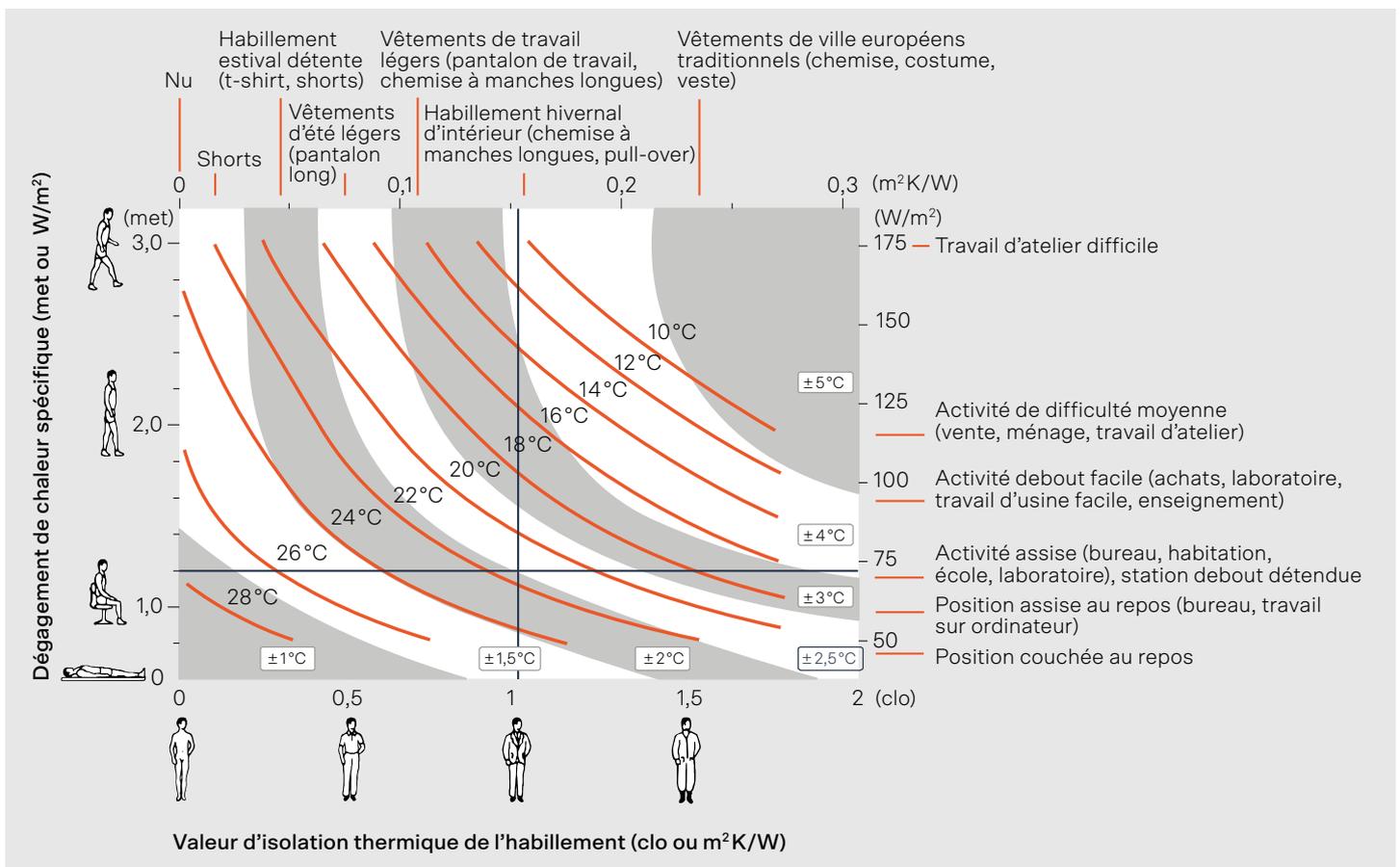
En hiver, les températures de surface intérieures des bâtiments dotés d'une bonne isolation thermique sont nettement plus élevées que celles des bâtiments faiblement isolés. Le confort de rayonnement s'en trouve alors également amélioré. Les bâtiments bien isolés nécessitent des puissances de chauffe moins importantes et permettent ainsi des mesures plus douces pour contrôler la température ambiante. Ils protègent les usagers de la sécheresse de l'air, des courants d'air froid descendant le long des murs extérieurs et des fenêtres et du rayonnement thermique désagréable des surfaces froides. Des températures de surface élevées protègent également contre le développement de moisissures. Sur les murs extérieurs froids et mal isolés, l'humidité relative monte, ce qui conduit rapidement à la formation de moisissures avec toutes ses conséquences.

En été, outre l'isolation thermique, une bonne protection thermique estivale au niveau de la construction est essentielle pour le confort thermique. Elle repose sur deux conditions primordiales:

- Une protection solaire disposée à l'extérieur qui durant la journée réduit les apports de chaleur à travers les ouvertures vitrées du bâtiment
- Une masse d'accumulation thermique active et suffisante pour amortir les apports de chaleur

La charge thermique du rayonnement solaire et des sources internes est stockée pendant la journée grâce à la capacité thermique du bâtiment. La chaleur stockée peut être évacuée par une aération intense pendant les heures fraîches de la nuit et du matin. Dans la mesure où les exigences architecturales en matière de protection solaire et de capacité d'accumulation sont respectées, le refroidissement libre ou naturel est suffisant pour de nom-

Figure 1.17: Dégagement de chaleur spécifique (met) de l'être humain en fonction de la valeur d'isolation thermique (clo) de son habillement. Conditions: 50 % d'humidité relative, 0,15 m/s de vitesse de l'air et 10 % d'insatisfaits. (Source: [SN EN ISO 7730])



breuses utilisations afin d'obtenir un bon confort thermique. Cela permet de réduire les mesures de climatisation gourmandes en énergie ainsi que leurs effets secondaires bien connus, tels que les bruits et courants d'air.

Les **asymétries de température**, causées par exemple par des différences de température sur les surfaces délimitant un local (figure 1.18), peuvent également être à l'origine de sensations d'inconfort. L'être humain réagit de manière beaucoup plus intolérante aux murs froids qu'aux murs chauds. Pour les plafonds, c'est l'inverse: une température plus basse de 10 K est tolérée, tandis que pour une température plus haute seulement 5 K sont tolérés. Cela signifie que les plafonds chauffants ne sont adaptés que s'ils sont de très faible puissance.

Qualité de l'air intérieur

Pollution due aux personnes: par leur métabolisme, les êtres humains et les animaux consomment de l'oxygène. Mais bien avant que l'oxygène ne vienne à manquer dans une pièce, l'odeur devient insupportable. Ainsi, les pièces ne sont pas aérées en premier lieu pour apporter de l'oxygène, mais pour éliminer les nuisances.

Le dioxyde de carbone (CO_2) est un bon indicateur de la qualité de l'air – dans la mesure où la pollution olfactive provient principalement du métabolisme humain. Le CO_2 en lui-même est inodore et n'atteint pas de concentrations critiques pour la santé dans les bâtiments ventilés. Il est cependant bien corrélé à la concentration de métabolites odorants que l'être humain libère dans l'air ambiant.

Les émissions de CO_2 des personnes dépendent de leur activité et de leur taille. Dans un logement, un adulte émet en général les quantités suivantes de CO_2 :

- Activité quotidienne moyenne: par personne 18–20 l/h
- Sommeil: par personne 12–14 l/h

Des études empiriques ont montré que les personnes qui entrent dans une pièce considèrent que la qualité de l'air intérieur est bonne si la concentration en CO_2 ne dépasse pas 800 à 1000 ppm (à 400 ppm dans l'air extérieur). Mais lorsque les gens restent longtemps dans une pièce, ils s'habituent aux odeurs, principalement aux leurs. Dans ce cas, la qualité de l'air intérieur est jugée encore acceptable lorsque la concentration en CO_2 se situe entre 1200 et 1400 ppm. Cette valeur est donc appropriée pour

Part d'insatisfaits en %

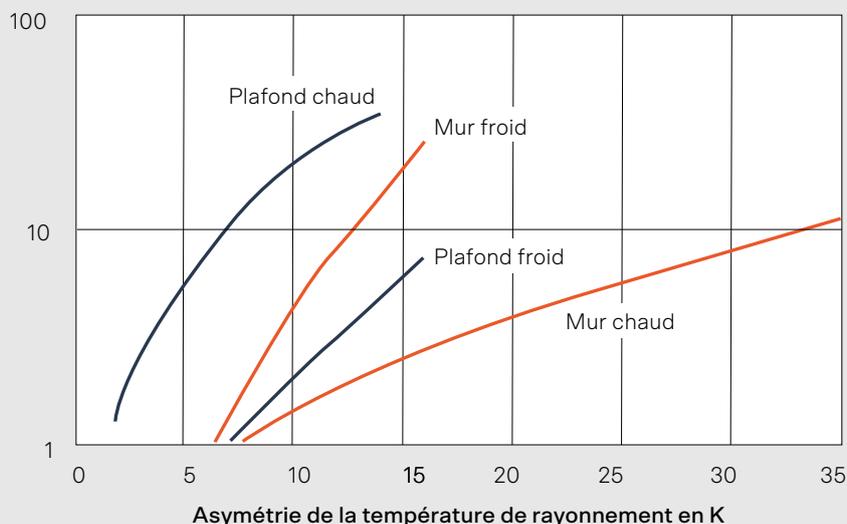


Figure 1.18: Part prévisible d'insatisfaits en raison de l'asymétrie de la température de rayonnement. Norme [SIA 180]

les chambres à coucher, par exemple. Elle s'applique également aux locaux dans lesquels plusieurs personnes séjournent ensemble pendant plusieurs heures durant la journée.

Pour déterminer la qualité de l'air, la norme [SIA 382/1] utilise des classes dites INT, qui sont décrites dans le tableau 1.10. Lors de la révision en cours de la norme, les classes seront adaptées aux nouvelles normes européennes.

Pollution due à l'occupation: quasiment toutes les activités dans une pièce libèrent des substances plus ou moins nocives. Par exemple, une grande partie de la pollution de l'air ambiant par les poussières fines provient de l'occupation. Les bougies, les bâtonnets d'encens, les feux ouverts (p. ex. cuisinière à gaz, cheminée, feu à l'éthanol) émettent des quantités considérables de poussières fines et, éventuellement, d'autres substances indésirables. Même lorsqu'on fait la cuisine, par exemple en faisant revenir ou frire des aliments, des poussières fines sont générées. Fumer provoque une pollution massive de l'air intérieur qui empêche d'atteindre une bonne qualité de l'espace. De plus, les meubles et d'autres objets d'aménagement peuvent libérer des substances indésirables dans l'air ambiant. La fiche d'information [Poussières fines] de l'Office fédéral de la santé publique donne des éclaircissements à ce sujet.

Pollution due aux matériaux de construction: une bonne qualité de l'air intérieur commence également par l'architecture. Selon la norme [SIA 180], le principe est de choisir des matériaux de

construction qui ne libèrent si possible pas ou très peu de substances nocives dans l'air intérieur.

Radon: en tant que gaz radioactif d'origine naturelle, le radon peut s'infiltrer dans les bâtiments à partir du sous-sol. Le risque dépend de l'emplacement du bâtiment et de sa construction. En Suisse, le radon est considéré comme la principale cause naturelle du cancer du poumon. Le site Internet [radon.ch] fournit une multitude d'informations au sujet du radon ainsi qu'une carte indiquant les zones à risque. C'est le maître d'ouvrage ou l'exploitant qui est responsable du respect de la valeur de référence.

Humidité de l'air ambiant

L'humidité de l'air ambiant dépend de la production d'humidité dans la pièce, du renouvellement de l'air et du climat extérieur.

Production d'humidité: les personnes et leurs activités mais aussi les plantes d'intérieur et les animaux dégagent de l'humidité. Le tableau 1.11 illustre la production d'humidité dans un immeuble collectif en s'appuyant sur les normes [SIA 2024] et [SIA 180]. Les valeurs indiquées dans le tableau pour les logements occupés en permanence sont plutôt conservatrices. La production d'humidité des personnes est certes d'environ 20 % plus faible à 21 °C qu'à 24 °C. En revanche, pour les «autres sources d'humidité», on peut supposer une production d'humidité deux à quatre fois supérieure, en fonction des habitudes de cuisson, des plantes d'intérieur, etc. Au total, les logements pro-

Tableau 1.10:
Classification de l'air ambiant selon la norme [SIA 382/1], avec des exemples d'utilisation.

Catégorie	Exemples d'utilisation	Concentration de CO ₂
INT 1	Locaux spéciaux tels que laboratoires et salles blanches	Non défini
INT 2	Locaux avec des exigences élevées en matière de qualité de l'air intérieur, p. ex. ceux dans lesquels de nouvelles personnes entrent fréquemment	< 1000 ppm
INT 3	Locaux avec des exigences moyennes en matière de qualité de l'air intérieur, locaux d'habitation et bureaux typiques	1000 à 1400 ppm
INT 4	Locaux dans lesquels les personnes ne se tiennent que rarement ou jamais, p. ex. locaux de moindre importance et locaux annexes	> 1400 ppm

duisent généralement 1 à 1,5 kg de vapeur d'eau par personne et par jour.

Humidité minimale: selon les normes [SIA 180] et [SIA 382/1], l'humidité relative de l'air intérieur (HR) minimale admise est de 30 %. Cette exigence est particulièrement pertinente pendant la saison froide. Elle est associée aux conditions suivantes:

- Le taux d'humidité peut être inférieur au taux d'humidité minimal admis jusqu'à concurrence de 10 % du temps d'utilisation
- L'humidité relative de l'air intérieur se réfère à une température ambiante standard pour une utilisation donnée, 21 °C, par exemple, pour des logements standards
- Pour des altitudes au-dessus de 800 m, la limite d'humidité admise est réduite de 1 % HR par tranche de 100 m

Une humidité relative de l'air ambiant inférieure à 30 % quelques jours par an ne pose aucun problème pour une personne en bonne santé. En revanche, les personnes ayant des soucis de santé particuliers (peau, voies respiratoires) peuvent réagir négativement à de faibles taux d'humidité relative.

Si, pour des raisons de santé, il est nécessaire d'humidifier activement l'air, il convient d'utiliser des humidificateurs locaux. En raison de leur consommation élevée d'énergie, ces appareils doivent toutefois être utilisés avec modération et uniquement de manière temporaire. Pour des raisons d'hygiène, il convient de les nettoyer régulièrement.

Humidité élevée: d'un point de vue hygiénique, des taux d'humidité élevés sont nettement plus critiques que des taux bas. C'est surtout pendant la saison estivale que l'on constate, en particulier dans les appartements, une humidité excessive qu'il est impératif d'évacuer. Lorsque l'humidité de l'air intérieur dépasse 70 %, le risque de développement de moisissures augmente considérablement. De plus, l'air intérieur très humide n'est pas perçu comme frais et la croissance de micro-organismes engendre des odeurs.

Pour les personnes allergiques aux acariens, il convient de créer, au moins pendant la saison hivernale, des conditions empêchant leur prolifération. Selon le Centre d'Allergie Suisse, c'est le cas lorsque l'humidité de l'air ambiant est inférieure à 50 % – à une température de 19 à 21 °C dans le salon et de 19 °C maximum dans la chambre à coucher.

Autres facteurs

Un bon confort dans les bâtiments implique également l'utilisation de matériaux non polluants, une bonne répartition de lumière naturelle et des couleurs ainsi qu'une protection phonique efficace et une acoustique convenable du local. Bien pensé, l'éclairage naturel peut également réduire les dépenses énergétiques pour le refroidissement, car il réduit les charges thermiques liées à l'éclairage artificiel.

Tableau 1.11: Production d'humidité par personne et par jour dans une maison plurifamiliale.

Description	Unité	Activité		Journée entière
		Eveillé	Endormi	
Durée de l'activité (présence selon la norme SIA 2024:2015)	h	6	8	14
Production d'humidité par personne et par heure (selon la norme [SIA 180], à 24 °C)	g/h	70	45	–
Production d'humidité cumulée par personne sur la durée de l'activité	g/d	420	360	780
Autres sources d'humidité (selon la norme [SIA 2024]: 15 g/h par personne en cas de présence)	g/d	–	–	220
Production d'humidité par personne et par jour	g/d	–	–	1000

1.4 Installations techniques et énergie

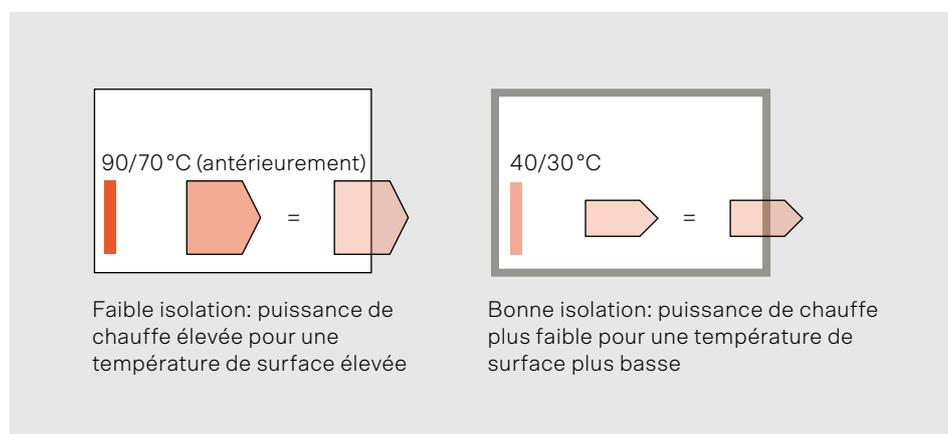
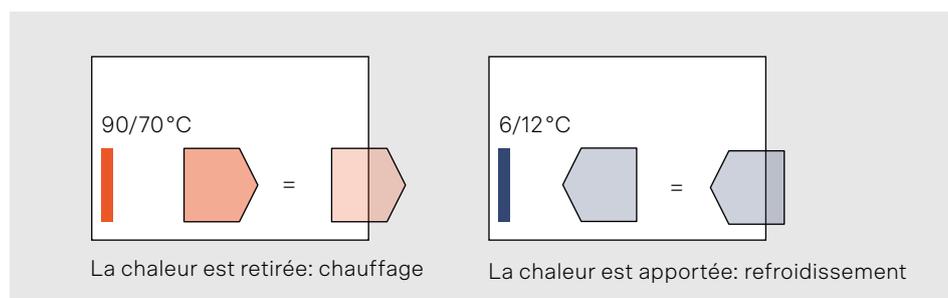
Climatisation douce

Le principe de base de l'aération douce est éminemment simple: moins un bâtiment perd de chaleur par temps froid (et moins la chaleur du soleil et l'humidité y pénètrent en été), moins il est nécessaire de recourir à des moyens techniques pour garantir un climat intérieur acceptable. L'aération douce consiste également à utiliser, pour le refroidissement, des puits de chaleur si possible renouvelables tels que l'eau souterraine ou la géothermie au lieu de machines frigorifiques. Si le froid est produit par un moteur, les rejets thermiques doivent être utilisés, par exemple pour préchauffer l'eau chaude sanitaire.

Refroidissement nocturne: lorsque l'air nocturne est suffisamment froid, la masse du bâtiment peut être «préparée» à la chaude journée qui s'annonce par un rafraîchissement naturel. En présence de conditions climatiques particulièrement chaudes, ce «refroidissement préliminaire» peut être assisté par une ma-

chine frigorifique. Cette stratégie permet d'écarter la puissance de pointe et de décaler une partie de l'énergie nécessaire aux heures nocturnes. Très souvent, ce refroidissement nocturne naturel suffit pour atteindre un confort adapté.

Emission de chaleur: le transfert thermique entre un bâtiment et son environnement est proportionnel à la surface exposée, à la capacité d'isolation thermique et à la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur. De même, l'effet de chauffe d'une source de chaleur dépend de sa surface, de sa forme et de sa température moyenne de surface. Les chauffages au sol nécessitent donc des températures de départ plus basses que les chauffages avec radiateurs. Dans l'idéal, celles-ci sont supérieures de seulement 2 K à la température la plus basse souhaitée de l'air ambiant lorsque la température extérieure est au plus bas. Pour cela, il faut que l'enveloppe du bâtiment soit suffisamment isolée pour que le local puisse être chauffé à 20 °C avec une température de surface de 22 °C pour le chauffage au



sol. En d'autres termes, l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment détermine la température de surface maximale de la source de chaleur.

Voici les raisons pour lesquelles l'association d'éléments chauffants de grandes dimensions combinée avec une bonne isolation thermique est avantageuse:

- Le chauffage devient auto-régulant, c'est-à-dire qu'il ne diffuse plus aucune chaleur dans le local si la température de l'air ambiant de celui-ci dépasse la température de l'eau de chauffage, par exemple en raison d'apports solaires.
- Les éléments chauffants permettent également une fonction de refroidissement en été (figure 1.22). Cela s'applique notamment aux constructions à plusieurs étages, dans lesquelles la puissance de chauffage et de refroidissement se répartit sur les planchers et les plafonds. En revanche, il est difficile de refroidir au moyen de corps de chauffe, car la différence de température entre leur surface et l'air ambiant devrait être telle que l'humidité s'y condenserait.

Par Kelvin (degré Celsius) de différence de température entre l'air ambiant et la surface de plafond, l'échange thermique possible s'élève à env. 7 W/m² pour le chauffage et à env. 11 W/m² pour le re-

froidissement. En revanche, l'échange thermique possible entre l'air ambiant et la surface de sol par Kelvin s'élève à 11 W/m² pour le chauffage et à 7 W/m² pour le refroidissement. Dans l'exemple de la figure 1.22, le chauffage s'effectue ainsi avec 2 fois 18 W/m² = 36 W/m² et le refroidissement avec 4 fois 18 W/m² = 72 W/m².

En comparaison: dans le cas d'une installation de climatisation qui fait circuler l'air ambiant 3 à 6 fois par heure, il faudrait, pour obtenir les mêmes performances, introduire de l'air à 26, respectivement à 14 °C. Avec ce système, l'air chaud a tendance à rester suspendu au plafond en hiver, l'air froid à provoquer des phénomènes de courants d'air en été.

Si l'on veille à respecter les principes de la climatisation douce, les bâtiments résistent mieux à des erreurs et sont ainsi plus flexibles pour des utilisations très variables, sans qu'il soit nécessaire de modifier la technique du bâtiment.

Les conditions nécessaires à une climatisation douce sont les suivantes:

- Bâtiment de forme simple et part vitrée soigneusement dimensionnée
- Ajustement des masses thermiques du bâtiment et des surfaces des locaux

Figure 1.21: Les petites surfaces de chauffe nécessitent des températures plus élevées (à gauche), les grandes surfaces de chauffe des températures plus basses (à droite). (Source: Robert Meierhans)

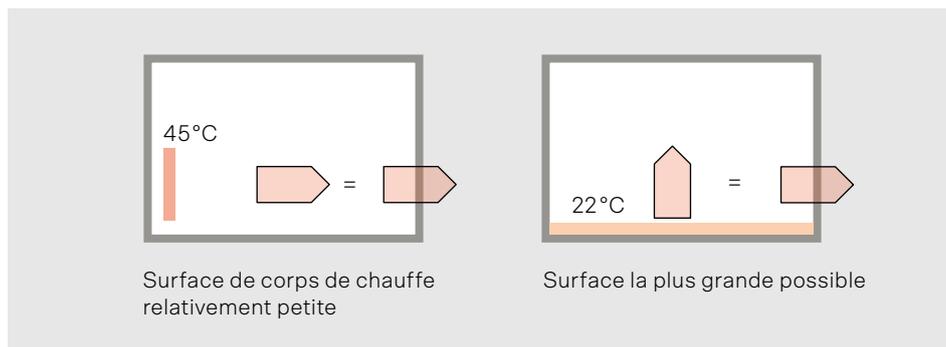
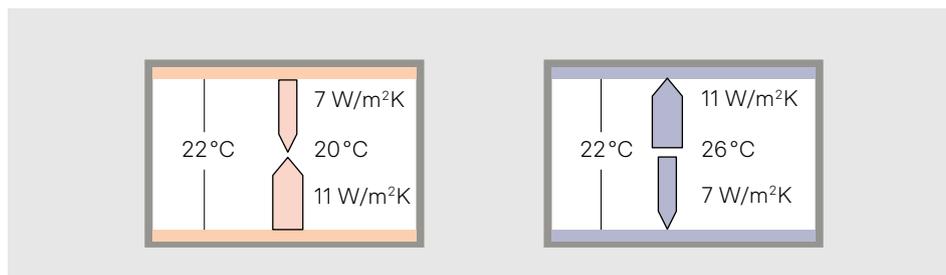


Figure 1.22: Chauffage et refroidissement avec des surfaces chauffées et refroidies. (Source: Robert Meierhans)



pour l'absorption des apports thermiques solaires
– Protection thermique estivale et hivernale

Notions importantes relatives à l'énergie

Les définitions et notions relatives à l'énergie dans les installations techniques figurent en particulier dans la norme [SIA 411]. Plusieurs notions souvent utilisées sont listées ci-après, leur définition a été en substance reprise des normes qui s'y rapportent:

Agents énergétiques: entité dont la quantité peut faire l'objet d'un bilan et qui contient ou transfère de l'énergie.

Agents énergétiques fossiles: le charbon, le gaz naturel, le mazout et l'hydrate de méthane en font partie. Tous les agents fossiles ont en commun qu'ils ne sont disponibles que de manière limitée et que leur utilisation est liée à des émissions de CO₂ plus ou moins importantes.

Conditions standard d'utilisation: conditions d'utilisation devant être utilisées pour le calcul des valeurs d'un projet, lorsque celles-ci doivent être comparées à des valeurs limites et cibles. Les valeurs d'utilisation standard selon les types d'utilisation sont mentionnées dans la norme [SIA 2024].

Energie auxiliaire: énergie (la plupart du temps l'énergie électrique) qui ne sert pas directement à couvrir les besoins énergétiques d'un bâtiment. Elle est utilisée par exemple pour le fonctionnement de composants de systèmes tels que moteurs, commandes et régulation, mais aussi pour le chauffage d'appoint de l'alimentation d'eau chaude sanitaire.

Energie finale: énergie prélevée ou achetée par le consommateur final – par exemple une exploitation industrielle, un bâtiment, un ménage – à des fins de transformation ultérieure et d'utilisation. Exemples: mazout, gaz naturel, chauff-

fage à distance sous forme d'eau chaude ou de vapeur industrielle, électricité prélevée dans le réseau, déchets industriels exploités énergétiquement par une entreprise.

Energie fournie: totalité de l'énergie finale fournie pendant la période de calcul dans le périmètre du bilan. L'énergie fournie est indiquée séparément par agent énergétique (SIA 380).

Energie grise: quantité totale d'énergie primaire non renouvelable nécessaire pour tous les processus en amont, depuis l'extraction des matières premières jusqu'aux processus de fabrication et de transformation, ainsi que pour l'élimination, les transports et moyens auxiliaires. On l'appelle également «dépense d'énergie non renouvelable cumulée». Voir également la norme [SIA 2032].

Energie primaire (énergie brute): agents énergétiques qu'on trouve dans la nature et qui n'ont encore été soumis à aucune transformation ou conversion ni transport, indépendamment du fait qu'ils soient ou non directement utilisables sous cette forme brute. L'énergie primaire est par conséquent l'énergie à l'état brut telle qu'elle est disponible pour l'exploitation économique. Des exemples en sont le pétrole, le gaz naturel, la houille, l'uranium, l'énergie potentielle de l'eau, le bois de chauffage et autres biomasses, le rayonnement solaire, l'énergie cinétique du vent, la chaleur de l'air (chaleur de l'environnement), la chaleur du sol (géothermie). L'énergie primaire est généralement divisée en agents énergétiques non renouvelables et renouvelables.

Energie primaire renouvelable: énergie produite à partir d'une source qui ne se tarit pas. Les agents énergétiques renouvelables englobent entre autres l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la chaleur de l'environnement, l'énergie hydraulique et la biomasse provenant de l'agriculture et de la sylviculture durables.

Energie renouvelable produite sur site: énergie produite sur site en utilisant des sources d'énergie renouvelables (capteurs solaires thermiques, cellules photovoltaïques, etc.). L'utilisation passive de l'énergie solaire n'est pas considérée comme une production d'énergie sur site.

Energie secondaire: énergie produite par transformation de l'énergie primaire ou d'une autre énergie secondaire (avec des pertes de transformation), disponible pour une transformation ou une utilisation ultérieure. Exemples: produits

pétroliers tels que le mazout, l'essence, le diesel, le gaz liquide, le coke, le biogaz, l'électricité, la chaleur à distance, les rejets thermiques.

Energie utile: énergie thermique directement à disposition du consommateur, après la dernière transformation, dans la forme technique nécessaire à l'objectif poursuivi. Exemple: au niveau de l'arbre d'entraînement du moteur, au niveau du corps de chauffe dans la chambre.

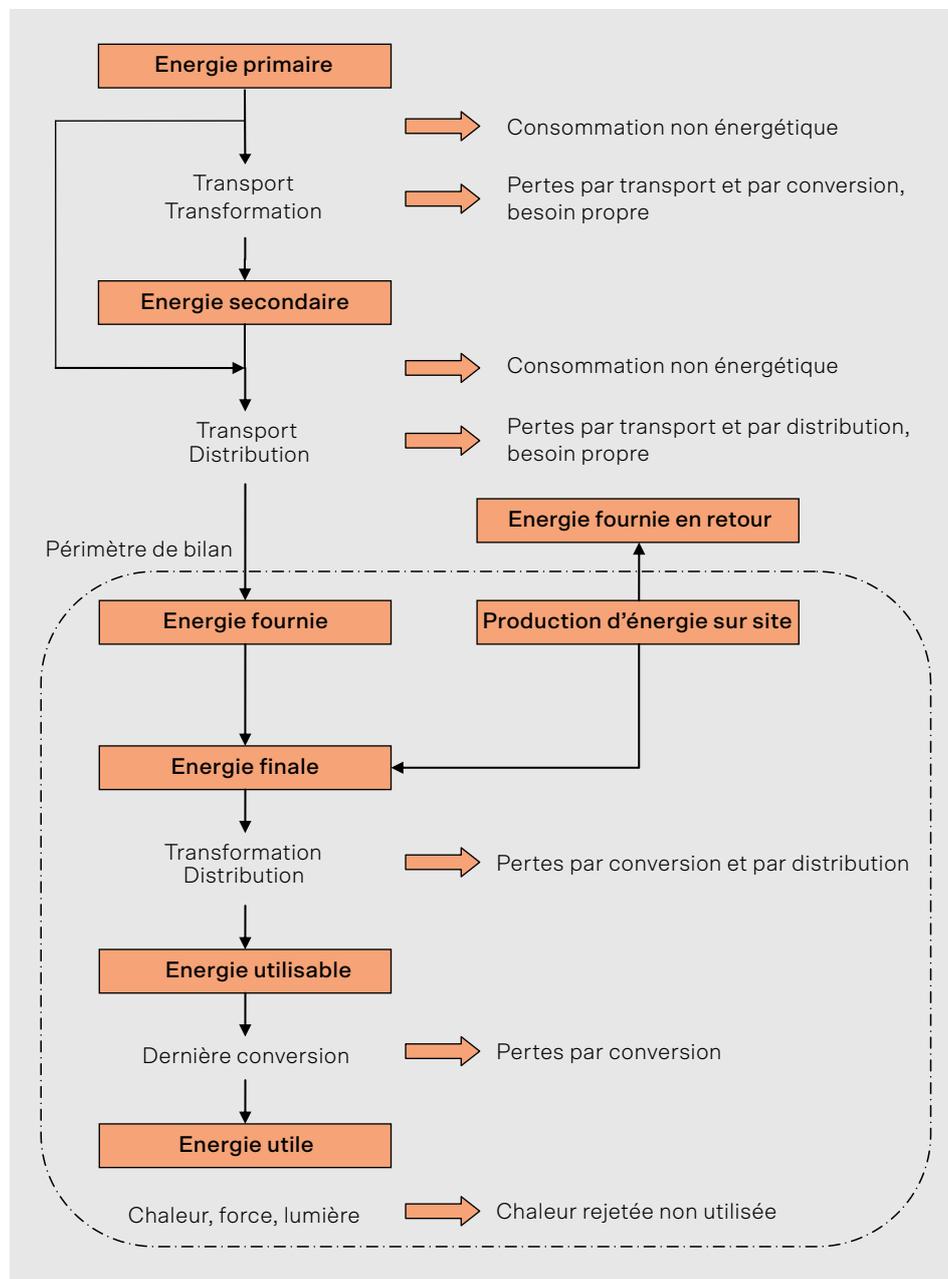


Figure 1.23: Etapes de conversion d'énergie, de l'énergie primaire à l'énergie utile. (Source: norme [SIA 411])

Energie utilisable: énergie mise à disposition du consommateur immédiatement avant le dernier stade de transformation (transformation en énergie utile). L'énergie utilisable est donc par exemple le courant amené aux bornes d'un moteur électrique ou d'une ampoule, ou l'eau chaude circulant dans un radiateur.

Facteur de pondération: facteur d'évaluation pour différents types d'énergie fixé par la politique énergétique. Les facteurs de pondération énergétiques EnDK sont publiés sur le site Internet de la Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (www.endk.ch).

Groupe de locaux, zone: ensemble de locaux caractérisés par les mêmes conditions d'équipement, d'éclairage, de ventilation ou de climatisation (mêmes valeurs limites, mêmes valeurs cibles). Le regroupement des locaux peut varier selon leur utilisation.

Périmètre de bilan: périmètre qui englobe entièrement un bâtiment (ou des parties de bâtiment faisant l'objet d'un calcul de bilan énergétique), installations extérieures comprises. Il définit en particulier les limites avec les bâtiments voisins ou des parties de bâtiment qui ne doivent pas être pris en considération dans le calcul.

Pouvoir calorifique (pouvoir calorifique inférieur): quantité de chaleur libérée lors de la combustion complète d'un combustible, si la vapeur d'eau générée par la combustion ne se condense pas.

Pouvoir calorifique (pouvoir calorifique supérieur): quantité de chaleur cédée lors de la combustion complète d'un combustible, lorsque la vapeur d'eau générée lors de la combustion se condense.

Production d'énergie sur site: énergie produite par des installations de production sur le site à l'intérieur du périmètre de bilan, qui est utilisée au minimum en partie à l'intérieur de celui-ci. L'utilisa-

tion passive de l'énergie solaire et l'utilisation de la chaleur de l'environnement ne sont pas considérées comme une production d'énergie sur site.

Récupération de chaleur: dans le cas de la récupération de chaleur, la chaleur perdue utilisable se présentant dans un processus ou une installation est réintroduite dans le même système sous forme de chaleur utile (chaleur de retour) sans décalage dans le temps. Le degré d'utilisation global du système peut alors être considérablement augmenté.

Exemples:

- Récupération de chaleur de l'air rejeté d'une installation mécanique de ventilation ou de climatisation
- Retour de la chaleur perdue dans un processus de lavage, p. ex. pour un lave-vaisselle industriel
- Récupération de chaleur des eaux usées d'une piscine

Rejets thermiques: chaleur non utilisable dans un processus. La chaleur dégagée est soit rejetée dans l'environnement, soit acheminée dans un autre système via des installations de récupération de chaleur. Les agents de transport des rejets thermiques sont par exemple l'air rejeté, l'eau de refroidissement, les vapeurs rejetées, les gaz de combustion des foyers et les gaz d'échappement des moteurs à combustion. Selon le vecteur de transport des rejets thermiques et le niveau de température, on dispose de différentes possibilités de récupération.

Source d'énergie: dans un système fermé, tout élément qui met à disposition l'énergie, principalement par transformation à partir d'une autre forme d'énergie.

Sources d'énergie renouvelables: la biomasse, la géothermie, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne en font partie.

Sources d'énergie non renouvelables: le charbon (houille, lignite), la tourbe, le pétrole, les sables et schistes bitumineux, le gaz naturel, l'hydrate de gaz, l'uranium et le plutonium en font partie.

Type d'utilisation des locaux: les locaux sont classés en fonction de leur utilisation prépondérante dans l'une des 40 utilisations-types définies dans la norme [SIA 2024].

	Objectif d'utilisation	Chaleur ambiante	Production d'eau chaude	Refroidissement ambiant/déshumidification
Energie utile	Service énergétique	Confort thermique	Eau chaude sanitaire	Confort thermique
	Energie thermique utile	Besoin de chaleur pour le chauffage Puissance de chauffage	Besoin en chaleur pour l'ECS Puissance thermique pour l'ECS	Besoin de climatisation Puissance de climatisation
		↓	↓	↓
Technique du bâtiment	Installation technique du bâtiment	Installation de chauffage	Production d'eau chaude	Froid climatique
	Installations techniques partielles du bâtiment	Générateur de chaleur Accumulateur de chaleur Distribution de chaleur	Générateur de chaleur pour l'ECS Accumulateur d'ECS Distribution d'ECS	Générateur de froid Accumulateur de froid Distribution de froid
	Déperdition de chaleur	... de l'installation de chauffage y c. la distribution	... de l'alimentation en eau chaude	... de l'installation de climatisation y c. la distribution
	Energie auxiliaire	... de l'installation de chauffage y. c. la distribution	... de l'alimentation en eau chaude	... de l'installation de climatisation
		↓	↓	↓
Energie finale	Energie nette fournie	Energie de chauffage puissance de chauffe	Energie pour l'ECS Puissance pour l'ECS	Energie de climatisation Puissance de climatisation
		↓	↓	↓
Energie pondérée		Facteurs de pondération	Facteurs de pondération	Facteurs de pondération
	Energie nette pondérée fournie	Indice partiel de dépense d'énergie pour le chauffage	Indice partiel de dépense d'énergie pour l'eau chaude	Indice partiel de dépense d'énergie pour le refroidissement des locaux/ la déshumidification

Tableau 1.12: Niveaux de l'énergie dans les installations techniques du bâtiment. Les flèches montrent la direction des étapes de calcul. Suite à la page suivante. (Source: Cahier technique SIA 2025)

Suite du tableau 1.12.

Ventilation	Humidification	Eclairage	Installations techniques diverses du bâtiment	Equipements	Production d'électricité	Total
Renouvellement d'air	Humidification	Eclairage	Gestion d'immeuble, transport, etc.	Cuisine, informatique, etc.		
Energie non définie au niveau utile						
Ventilation	Humidification	Eclairage	Installations diverses	Appareils divers	Installation photovoltaïque, CCF	
Energie pour la ventilation	Energie pour l'humidification	Energie pour l'éclairage	Energie pour diverses installations techniques du bâtiment	Energie pour des équipements	Electricité issue d'énergies renouvelables	Energie totale
↓		↓	↓	↓	↓	↓
Facteurs de pondération	Facteurs de pondération	Facteurs de pondération	Facteurs de pondération	Facteurs de pondération	Facteurs de pondération	Facteurs de pondération
Indice partiel de dépense d'énergie pour la ventilation	Indice partiel de dépense d'énergie pour l'humidification	Indice partiel de dépense d'énergie pour l'éclairage	Indice partiel de dépense d'énergie pour diverses installations techniques du bâtiment	Indice partiel de dépense d'énergie pour les équipements	Indice partiel de dépense d'énergie pour l'électricité issue d'énergies renouvelables	Indice de dépense d'énergie

Caractéristiques des agents énergétiques					
Agent énergétique final	Facteur de pondération	Facteur d'énergie primaire	Part d'énergie primaire renouvelable	Emissions de gaz à effet de serre spécifiques	
Référence	[EnDK]	[SIA 2031]	[SIA 2031]	[SIA 2031]	
				g/MJ	g/kWh
Combustibles solides					
Bois en bûches	0,7	1,06	95,2%	3	11
Copeaux de bois	0,7	1,14	94,6%	3	11
Pellets	0,7	1,22	83,0%	10	36
Combustibles liquides					
Mazout	1,0	1,24	0,7%	82	295
Propane	1,0	1,15	0,5%	67	241
Butane	1,0	1,15	0,5%	67	241
Combustibles gazeux					
Gaz naturel	1,0	1,15	0,5%	67	241
Propane	1,0	1,15	0,5%	67	241
Butane	1,0	1,15	0,5%	67	241
Biogaz (avec 40 % à 75 % de méthane)	0,7	0,48	8,2%	38	137
Electricité					
Production nationale (électricité issue de . . .)					
Mix de consommateurs Suisse	2,0	2,97	15%	43	155
Centrale hydraulique (sans accumulation par pompage)	2,0	1,22	97%	3	11
Centrale hydroélectrique (accumulation par pompage)	2,0	4,25	15%	55	198
Photovoltaïque	2,0	1,66	76%	25	90
Energie éolienne	2,0	1,33	92%	8	29
Biomasse (bois)	2,0	3,80	96%	32	115
Biogaz	2,0	0,20	20%	52	187
Energie nucléaire	2,0	4,08	0,1%	5	18
Pétrole	2,0	3,36	2%	277	997
Gaz naturel	2,0	3,30	1%	205	738
Déchets	2,0	0,02	0%	2	7
Production étrangère (électricité issue de . . .)					
Centrale hydraulique (sans accumulation par pompage)	2,0	1,23	97%	3	11
Photovoltaïque	2,0	1,74	74%	25	90
Energie nucléaire	2,0	4,25	0%	5	18
Pétrole	2,0	3,85	0%	277	997
Gaz naturel	2,0	3,22	0%	180	648
Charbon	2,0	3,92	2%	344	1238
Source non vérifiable (mix électrique UCTE*)	2,0	3,53	6%	165	594

Tableau 1.13:
Caractéristiques des agents énergétiques.

* Union for the Coordination of Transmission of Electricity (Union pour la coordination du transport de l'électricité)

1.5 Sources

- [OFEV 2019] Office fédéral de l'environnement. Brochure «Adaptation aux changements climatiques – Programme pilote, phase II». Berne, 2019.
- [BAFU 2020] Bundesamt für Umwelt. Kenngrössen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990–2018. Bern, 2020.
- [OFEV 2021] Office fédéral de l'environnement. Thème Déchets: En bref. Accès 24. Document en ligne. Avril 2022.
- [OFEV 2022] Office fédéral de l'environnement. Thème Economie et consommation: Informations pour spécialistes Economie circulaire. Document en ligne. Accès 24. Avril 2022.
- [Bionova 2018] Bionova Ltd, One Click LCA. Studie «The embodied Carbon Review». Helsinki, 2018.
- [EnDK] Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK). www.endk.ch. Consulté en mai 2022.
- [Poussières fines] Office fédéral de la santé publique. Fiche d'information «Poussières fines dans l'air intérieur», Berne 2008.
- [Gugerli 2015] Gugerli, Heinrich et al., EnergieSchweiz. Gesund und ökologisch bauen mit Minergie-Eco, Faktor Verlag. Zürich, 2015.
- [KBOB 2022] Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics (KBOB). Données écobilans dans la construction 2009/1. Berne, 2022.
- [Stratégie climatique] Conseil fédéral suisse. Stratégie climatique à long terme de la Suisse. Berne, 2021.
- [Klingler 2011] Klingler, Matthias et al., Bundesamt für Energie. Graue Energie von Sanitär- und Elektroanlagen, Sach- und Ökobilanzen von 12 Gebäuden (Wohnen und Büro). Bern, 2011.
- [Klingler 2014] Klingler, Matthias et al., Bundesamt für Energie. Ökobilanzdaten für Lüftungs- und Wärmeanlagen, Sach- und Ökobilanzen von 16 Gebäuden. Bern, 2014.
- [radon.ch] Office fédéral de la santé publique. Plateforme d'information radon www.ch-radon.ch. Consulté en mai 2022.
- [SIA 180] Norme SIA 180. Isolation thermique, protection contre l'humidité et climat intérieur dans les bâtiments. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2014.
- [SIA 2020] Document de position «Protection du climat, adaptation au changement climatique et énergie». Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2020.
- [SIA 2024] Cahier technique SIA 2024. Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et le bâtiment. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2021.
- [SIA 2025] Cahier technique SIA 2025. Termes en physique, énergie et technique du bâtiment. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2012.
- [SIA 2031] Cahier technique SIA 2031. Certificat énergétique des bâtiments. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2016.

- [SIA 2032] Cahier technique SIA 2032. Energie grise – Etablissement du bilan écologique pour la construction de bâtiments. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2020.
- [SIA 2040] Cahier technique SIA 2040 – La voie SIA vers l'efficacité énergétique, avec correctif C1. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2017.
- [SIA 382/1] Norme SIA 382/1. Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2014.
- [SIA 382/5] Norme SIA 382/5. Ventilation mécanique dans les habitations. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2021.
- [SIA 411] Norme SIA 411. Représentation modulaire des installations. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2016.
- [SN EN 15804] Norme suisse SN EN 15804. Ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales – Règles régissant les catégories de produits de construction. Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour, 2013.
- [SN EN ISO 14044] Norme suisse SN EN ISO 14044. Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices. Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour, 2006.
- [SN EN ISO 7730] Norme suisse SN EN ISO 14044. Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices. Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour, 2006.
- [WBCSD 2021] World Business Council for Sustainable Development. Etude «Net-zero Building: Where do we stand?». Genève, 2021.

Installations de chauffage

2.1 Composants d'une installation de chauffage

Reto von Euw

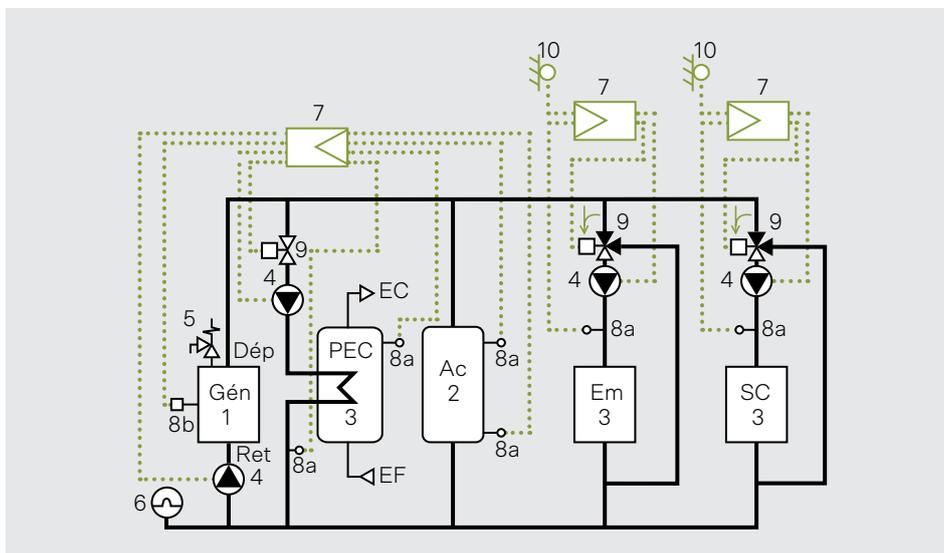


Figure 2.1:
Principaux composants d'une installation de chauffage.
Dép: départ (aller)
Ret: retour
EF: eau froide
EC: eau chaude sanitaire

- 1 Générateur de chaleur (Gén)** Un générateur de chaleur transforme l'énergie finale et éventuellement d'autres énergies apportées en chaleur directement utilisable. Il transmet la chaleur à un fluide caloporteur [SIA 384/1].
- En principe, les générateurs de chaleur se distinguent par les agents énergétiques avec lesquelles ils fonctionnent. Les générateurs de chaleur utilisant des combustibles fossiles (chauffages au gaz et au mazout) ne sont pas traités en détail dans cet ouvrage. Les générateurs de chaleur utilisant des agents énergétiques renouvelables sont abordés dans les sections suivantes:
- 2.3 Pompes à chaleur, 2.4 Pompes à chaleur – exemples pratiques
 - 2.5 Chauffages à bois, 2.6 Chauffages à bois – exemples pratiques
 - 2.7 Réseaux thermiques, 2.8 Réseaux thermiques – exemples pratiques
 - 2.9 Couplage chaleur-force, 2.10 Couplage chaleur-force – exemples pratiques
 - 2.11 Installations solaires thermiques, 2.12 Installations solaires thermiques – exemples pratiques

2 Accumulateur de chaleur (Ac)

Accumulateur d'énergie thermique. Selon la norme [SIA 411], l'accumulation est basée sur les principes physiques suivants:

- Accumulation de chaleur décelable ou sensible consécutivement à une variation de température
- Accumulation de chaleur latente par modification de l'état du milieu (sans changement de température)
- Accumulation de chaleur chimique sous forme d'énergie de liaison dans des réactions entre matériaux

Par sa capacité de stockage, un accumulateur assure l'équilibre temporel entre l'offre et la demande en énergie chez le consommateur. En principe, on différencie les accumulateurs thermiques selon leurs fonctions:

- Accumulateur tampon (accumulateur technique): découplage hydraulique de plusieurs parties de l'installation et réduction de la fréquence de commutation des générateurs de chaleur (de quelques minutes à quelques heures)
- Accumulateur de chaleur à court terme: stockage de la chaleur provenant de l'énergie solaire ou de l'excédent de production de chaleur pendant un certain temps (de quelques heures à quelques jours).
- Accumulateur de chaleur à long terme: stockage de la chaleur issue de l'énergie solaire pendant une période prolongée (de quelques semaines à quelques mois, accumulateur saisonnier).

3 Consommateur de chaleur (CC)

Emission de chaleur pour le chauffage des locaux (Em)

Composants d'une installation de chauffage, respectivement d'une installation d'émission ou de transfert de chaleur à un local à chauffer (norme [SIA 384/1]). D'après la norme [SIA 411], l'émission de chaleur peut être classée en fonction de différents critères:

- En fonction de la forme physique de transfert de chaleur (rayonnement, convection, conduction)
- En fonction du type de construction (corps de chauffe, chauffage de surface, etc.)
- En fonction de l'emplacement dans le local (sol, parois, plafond, allège, socle, système intégré, etc.)
- En fonction du fluide caloporteur (eau, air, électricité, etc.)

L'émission de chaleur est généralement prise en charge par un chauffage au sol ou des corps de chauffe.

Production d'eau chaude (PEC)

Production d'eau chaude sanitaire et accumulation de l'eau chaude.

Système connecté (SC)

Système qui influence la conception de l'installation de chauffage sans en faire partie intégrante; il s'agit à titre d'exemple d'installations de ventilation et de climatisation, d'installations de chaleur de process [SIA 384/1].

- 4 Pompe de circulation**
(voir chapitre 2.2
«Hydraulique de la
distribution de chaleur»)
- La pompe de circulation (ou circulateur) achemine le fluide caloporteur à travers un circuit défini. On différencie les circulateurs non régulés et les circulateurs régulés.
- 5 Soupape de sécurité**
- Si les dispositifs de régulation et de limitation thermostatiques tombent en panne, ou suite à une erreur de commande, on risque une augmentation dangereuse de la pression dans le circuit hydraulique. Une soupape de sécurité s'ouvre lorsque la pression de déclenchement est dépassée. Les gaz, vapeurs ou liquides qui s'échappent sont rejetés dans l'atmosphère.
- 6 Vase d'expansion**
- Dans les installations de chauffage, on observe une variation continue des températures et donc, une variation de la densité et du volume de l'eau. Lors du chauffage de l'eau, le vase d'expansion prend en charge l'augmentation du volume de l'eau et le restitue dans le réseau lorsque l'eau refroidit.
- 7 Régulateur**
(voir chapitre 8
«Automation du
bâtiment»)
- Les régulateurs assurent le respect des valeurs de consigne prédéterminées telles que la température ambiante ou la température aller. Les sondes enregistrent la valeur réelle et les organes de réglage tels que les vannes ou clapets permettent de régler les grandeurs à réguler. En principe, on différencie la régulation et la commande. Dans la régulation, la valeur réelle est enregistrée. Lorsque cette valeur diverge de la valeur de consigne prédéterminée, l'organe de régulation s'active. On parle alors d'un circuit de régulation fermé; la régulation de la température ambiante en est un exemple. La commande agit sur un circuit de régulation ouvert. La valeur réelle n'est alors pas comparée à la valeur de consigne. Le fonctionnement avec temporisation d'une installation simple d'air repris en est un exemple.
- 8 Sonde, thermostat**
- Les sondes enregistrent la valeur réelle et la transmettent à l'appareil de régulation. On différencie les sondes (8a) et les thermostats (8b). Pour ce qui est des sondes, la valeur de consigne est réglée au niveau de l'appareil de régulation. A l'inverse, dans le cas des thermostats, la valeur de consigne est réglée directement sur place.
- 9 Organe de réglage**
- Les organes de réglage tels que les vannes ou les clapets se composent du servomoteur et de l'actionneur. Sur la base du signal d'entrée, l'organe de régulation règle une grandeur (p. ex. la course) dans l'actionneur.
- 10 Sondes de température extérieure, sondes météorologiques**
(voir «Régulation de la température aller en fonction des conditions météorologiques», chapitre 41)
- Une régulation de chauffage s'effectue le plus souvent en fonction de la température aller, de la température extérieure ou encore des conditions météorologiques. La température aller est alors réglée en fonction de la température extérieure, respectivement des conditions météorologiques. C'est la courbe de chauffe qui définit quelle température aller est nécessaire pour quelle température extérieure.

2.2 Hydraulique de la distribution de chaleur

Circuits hydrauliques de base

Les circuits hydrauliques sont souvent utilisés dans les installations de chauffage pour fournir et distribuer la chaleur dans les bâtiments. La norme [SIA 384/1] décrit les six circuits de base suivants:

- Circuit mélangeur
- Circuit direct
- Circuit d'étranglement
- Circuit de déviation (ne doit plus être utilisé dans les installations avec des températures de retour basses)
- Circuit d'injection avec organe de réglage à 3 voies (ne doit plus être utilisé dans les installations avec des températures de retour basses)
- Circuit d'injection avec organe de réglage à passage droit

Les paragraphes suivants décrivent plus en détail le circuit mélangeur et le circuit d'injection avec organe de réglage à passage droit (figure 2.2, circuits de base 1 et 6). Ce sont les circuits les plus fréquemment utilisés dans le domaine du chauffage.

Circuit mélangeur

Mode de fonctionnement: dans le cas du circuit mélangeur (figure 2.3), l'eau de retour est mélangée à l'eau de départ à la température aller souhaitée pour le groupe de consommateurs. La température aller du groupe de consommateurs est définie à l'aide de la courbe de chauffe et dépend de la température extérieure. En cas d'utilisation de vannes thermostatiques, le débit dans le circuit d'émission de chaleur est variable. Dans ce cas, il convient d'utiliser un circulateur régulé.

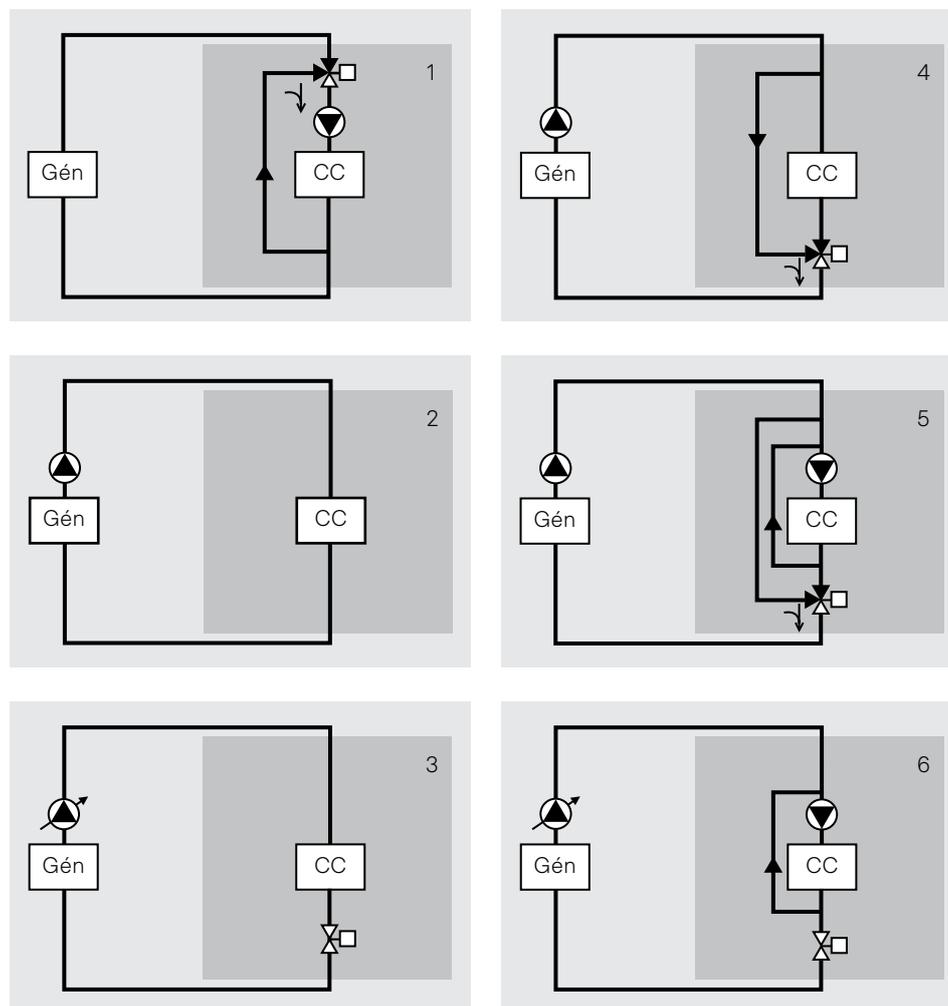


Figure 2.2: Circuits hydrauliques de base:

- 1 Circuit mélangeur
 - 2 Circuit direct
 - 3 Circuit d'étranglement
 - 4 Circuit de déviation
 - 5 Circuit d'injection avec organe de régulation à 3 voies
 - 6 Circuit d'injection avec organe de régulation à passage droit
- Gén: générateur ou échangeur de chaleur
 CC: Consommateur de chaleur (p. ex. chauffage au sol, corps de chauffe, réchauffeur d'air)

Lorsque dans les conditions de conception, la température aller primaire produite par le générateur de chaleur (Gén) est supérieure à la température aller secondaire requise dans le groupe de consommateurs (p. ex. pour les chauffages au sol), un prémélange fixe, c'est-à-dire une **déviat ion interne** doit être installée du côté secondaire (figure 2.4). L'ajout continu de l'eau de retour refroidie via la déviation fait baisser la température aller. L'organe de réglage dispose ainsi de la course complète pour la régulation. Cela permet d'exploiter de façon optimale la capacité de régulation de l'organe de réglage.

– Faible risque de gel pour les réchauffeurs d'air

Domaine d'utilisation:

- Distributeurs sans pression différentielle, avec ou sans pompe principale
- Régulation des corps de chauffe et chauffages au sol
- Risque de gel pour les réchauffeurs d'air
- Installations avec générateurs de chaleur basse température (générateurs de chaleur à condensation; chaudières à condensation ou pompes à chaleur)

Circuit d'injection avec organe de réglage à passage droit

Mode de fonctionnement: l'organe de réglage à passage droit (4 à la figure 2.5) régule le débit d'eau du générateur de chaleur vers le circuit des consommateurs. Selon la position, une quantité d'eau de départ plus ou moins importante est injectée dans le circuit des consommateurs. Afin de maintenir un débit constant dans le circuit des consommateurs, le volume d'eau de retour nécessaire est ajouté en continu via la déviation. Il en résulte une régulation de la température à débit constant dans le circuit des consommateurs et une régulation du débit à température aller constante dans le circuit du générateur de chaleur (circuit primaire). Pour cette raison, une pompe principale ré-

Figure 2.4: Circuit mélangeur (circuit de base 1), distributeurs sans pression différentielle, sans pompe principale.

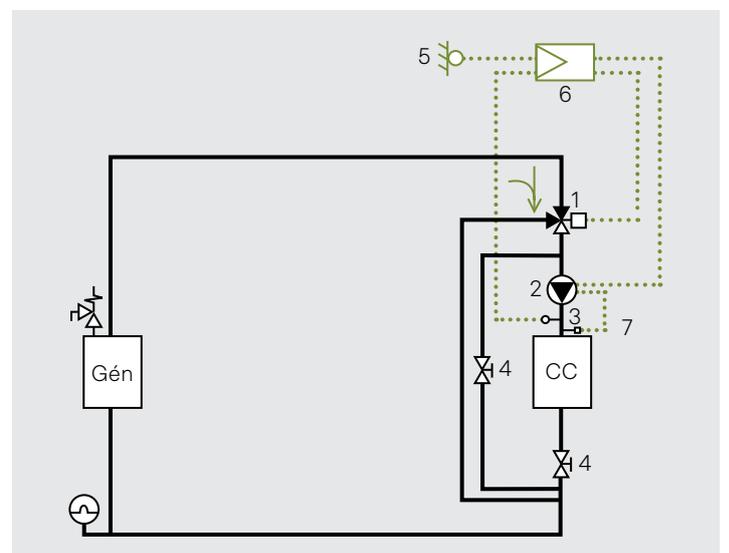
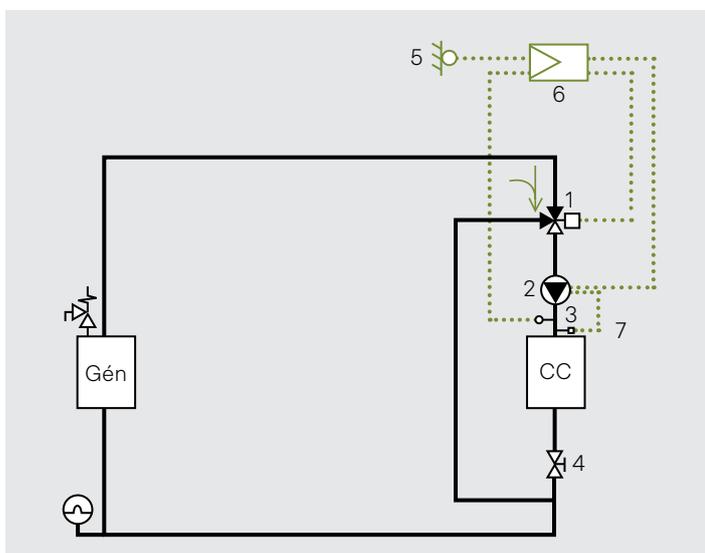
- 1 Organe de réglage
 - 2 Pompe de circulation
 - 3 Sonde
 - 4 Etrangleur d'équilibrage
 - 5 Sonde de température extérieure
 - 6 Régulateur
 - 7 Limiteur de température de sécurité en cas de chauffage au sol
- Gén: générateur ou échangeur de chaleur
CC: consommateur de chaleur (p. ex. chauffage au sol, corps de chauffe, réchauffeur d'air)

Caractéristiques du circuit mélangeur:

- De basses températures retour pour une faible charge (parfaitement approprié aux générateurs de chaleur à condensation/chaudières à condensation)
- Débit constant avec température aller variable dans le circuit des consommateurs de chaleur dans la mesure où aucun régulateur de débit tel que des vannes thermostatiques n'est utilisé pour l'émission de chaleur
- Débit variable dans le circuit du générateur de chaleur en cas de distributeur sans pression différentielle et sans pompe principale
- Répartition homogène de la température via les consommateurs de chaleur (CC)

Figure 2.3: Circuit mélangeur avec déviation interne, distribution sans pression différentielle, sans pompe principale.

- 1 Organe de réglage
- 2 Pompe de circulation
- 3 Sonde
- 4 Etrangleur d'équilibrage
- 5 Sonde de température extérieure
- 6 Régulateur
- 7 Limiteur de température de sécurité en cas de chauffage au sol



gulée doit être utilisée dans le circuit du générateur de chaleur.

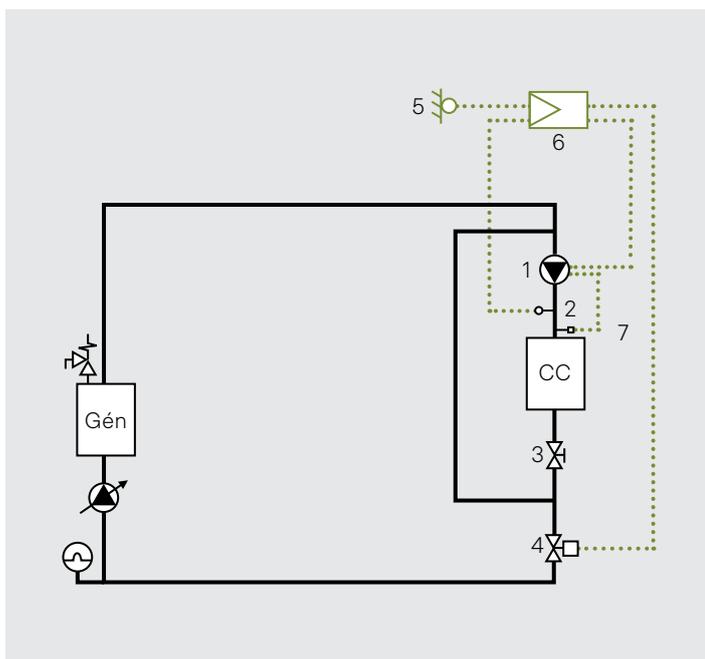
Comme pour le circuit mélangeur, la température aller dans le circuit des consommateurs suit la courbe de chauffe prédéfinie; elle dépend donc de la température extérieure. Le débit varie en présence de vannes thermostatiques dans le circuit des consommateurs. Il faut par conséquent utiliser une pompe régulée dans le circuit des consommateurs, comme c'est le cas pour le circuit mélangeur.

Figure 2.5: Circuit d'injection avec organe de régulation à passage droit.

- 1 Pompe de circulation
 - 2 Sonde
 - 3 Etrangleur d'équilibrage
 - 4 Organe de régulation à passage droit
 - 5 Sonde de température extérieure
 - 6 Régulateur
 - 7 Limiteur de température de sécurité en cas de chauffage au sol
- Gén: générateur ou échangeur de chaleur
CC: consommateur de chaleur (p. ex. chauffage au sol, corps de chauffe, réchauffeur d'air)

Caractéristiques du circuit d'injection avec organe de réglage à passage droit:

- Basse température retour, pour cette raison bien approprié en cas de raccordement au chauffage à distance et de générateurs de chaleur à condensation
- Débit constant avec température aller variable dans le circuit des consommateurs de chaleur dans la mesure où aucun régulateur de débit tel que des vannes thermostatiques n'est utilisé pour l'émission de chaleur
- Débit variable dans le circuit du générateur de chaleur, c'est-à-dire recours à des pompes régulées
- Dans le cas des circuits d'injection dotés d'organes de réglage à passage droit, il faut toujours recourir à un distributeur à pression différentielle



- Répartition homogène de la température via les consommateurs de chaleur
- Faible risque de gel pour les réchauffeurs d'air

Domaine d'utilisation:

- En présence de distributeurs à pression différentielle
- Installations avec générateurs de chaleur basse température (générateurs de chaleur à condensation; chaudières à condensation ou pompes à chaleur)
- Raccordements directs ou indirects au chauffage à distance
- Régulation des corps de chauffe et chauffages au sol
- Risque de gel pour les réchauffeurs d'air

Maintien de la température du retour de chaudière

Les gaz de combustion des chaudières contiennent de l'humidité sous forme de vapeur d'eau. Si l'on souhaite utiliser sa teneur énergétique, il faut refroidir ces gaz jusqu'à une température inférieure au point de rosée pour que la vapeur d'eau se condense. Les chaudières qui utilisent la chaleur de condensation (donc la chaleur latente) sont appelées chaudières à condensation ou générateurs de chaleur à condensation. Une chaudière à con-

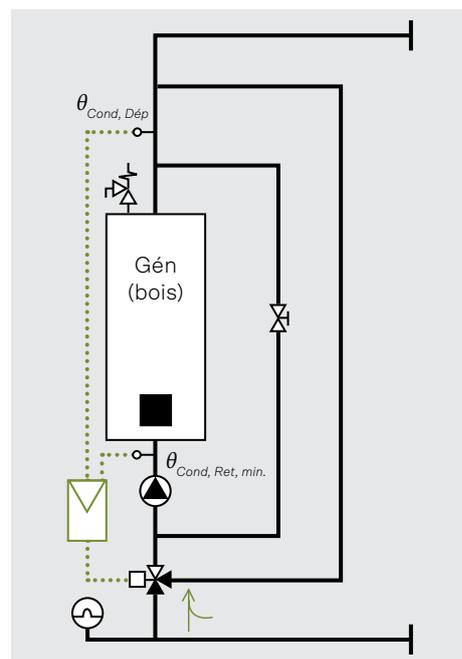


Figure 2.6: Maintien de la température du retour de chaudière avec déviation interne.

densation arrive à utiliser quasi l'ensemble de la teneur énergétique (pouvoir calorifique) du combustible.

Pour les chaudières sans condensation, la température retour ne doit pas être inférieure à la température du point de rosée des gaz de combustion, étant donné que les matériaux de ce type de chaudières corrodent en contact avec le condensat. Pour augmenter une température retour trop basse à l'entrée de la chaudière, il faut recourir au circuit hydraulique adéquat. Celui-ci est appelé «maintien de la température du retour de chaudière»; il permet de prévenir la formation de condensat et par là la corrosion.

Remarque: les [MoPEC] prescrivent de recourir à des chaudières à condensation en cas de chaudières fonctionnant avec des combustibles fossiles (gaz, mazout). Il convient d'en tenir compte aussi lors de simples remplacements de chaudière.

Mode de fonctionnement: si la température retour ($\theta_{Cond,Ret,min}$) est inférieure au point de rosée du combustible respectif, de l'eau de départ chaude est mélangée à l'eau de retour à l'aide d'une vanne à 3 voies (figure 2.6). La température retour est ainsi maintenue à une température supérieure à la température du point de rosée. Si le circuit du générateur et ceux des consommateurs de chaleur présentent des températures retour très différentes, il faut recourir côté chaudière à une déviation interne constante qui mélange, aux conditions de dimensionnement, le volume d'eau de départ nécessaire pour que la vanne à trois voies soit complètement ouverte.

Caractéristiques du maintien de la température du retour de chaudière:

- Augmentation assurée de la température retour à une température définie (supérieure à la température du point de rosée).
- Il est possible d'utiliser l'organe de réglage parallèlement pour réguler la température aller de la chaudière.

Domaine d'utilisation: pour des chaudières sans condensation telles que les chaudières à bûches.

Distributeur

Une installation de génération de chaleur alimente un ou plusieurs consommateurs de chaleur au moyen d'un distributeur. Le distributeur relie l'installation de génération de chaleur et les consommateurs de chaleur. A titre d'exemple, l'émission de chaleur, le réchauffement de l'eau, les systèmes reliés tels que les installations aérauliques

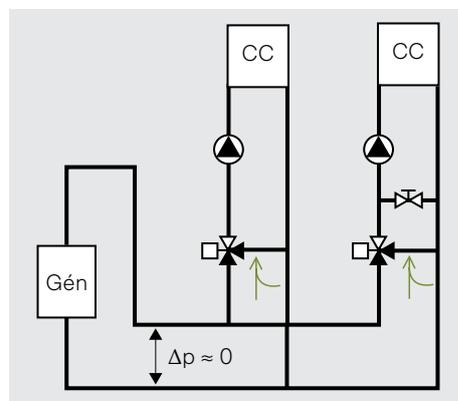


Figure 2.7: Distributeur sans pression différentielle, sans pompe principale. Gén: générateur de chaleur CC: consommateur de chaleur

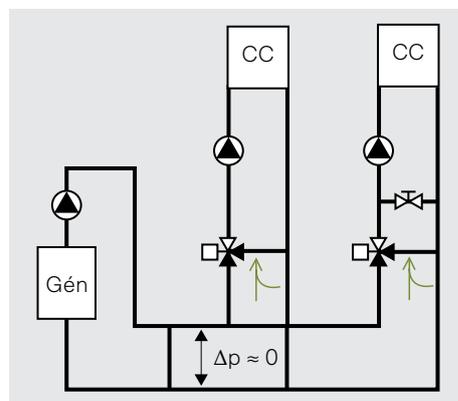


Figure 2.8: Distributeur sans pression différentielle avec pompe principale.

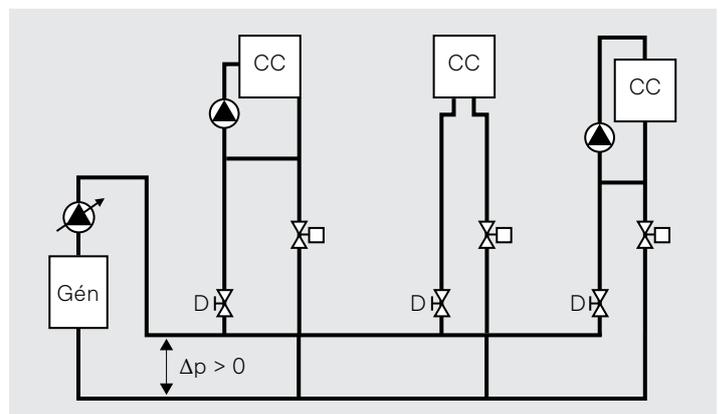


Figure 2.9: Distributeur à pression différentielle. D: étrangleur d'équilibrage

et la chaleur industrielle en font partie. La distinction est faite entre deux types de distributeurs:

- Distributeur sans pression différentielle avec ou sans pompe principale
- Distributeur avec pression différentielle

Distributeur sans pression différentielle sans pompe principale: dans ce cas, la perte de charge doit être très faible dans le circuit du générateur de chaleur ($< 3000 \text{ Pa}$). Les distributeurs sans pression différentielle sans pompe principale (figure 2.10) sont utilisés pour les installations plus petites et peuvent idéalement être combinés avec des circuits mélangeurs. La pompe doit compenser la perte de charge de l'organe de réglage et du circuit du générateur de chaleur. Les générateurs de chaleur doivent être conçus pour de basses températures de retour.

Distributeur sans pression différentielle, avec pompe principale: dans ce cas, la distribution est subdivisée en deux circuits (figure 2.11), à savoir un circuit primaire (générateur de chaleur) et un circuit secondaire (consommateurs de chaleur). La pompe principale prend en charge le débit dans le circuit primaire: du générateur de chaleur au distributeur et via la déviation du distribu-

teur retour au générateur. En aval de la déviation du distributeur, les groupes de consommateurs prélèvent le débit nécessaire au moyen de leurs pompes respectives. La perte de charge de l'organe de réglage est compensée par la pompe du groupe de consommateurs respectif. Le distributeur est quasiment sans pression différentielle, ce qui permet de renoncer à un équilibrage hydraulique entre les groupes de consommateurs. Là encore, le recours à un circuit mélangeur dans les groupes de consommateurs constitue une combinaison idéale. Ce type de distribution provoque une augmentation de la température retour du générateur de chaleur; pour cette raison, il n'est pas optimal pour les générateurs de chaleur à condensation.

Distributeur avec pression différentielle: dans ce cas, la pompe principale à régime régulé crée une différence de pression dans le circuit du générateur de chaleur laquelle est à disposition des groupes de consommateurs (figure 2.12). Il est ainsi possible de supprimer une pompe lorsqu'un groupe de consommateurs est raccordé au moyen d'un circuit d'étranglement (circuit de base 3). Ce n'est pas possible avec les autres circuits de base. Ainsi, une pompe est à prévoir pour un groupe de consommateurs raccordé par circuit d'injection avec organe de réglage à passage droit (circuit de base 6). Dans ce cas, la pompe principale compense la perte de charge de l'organe de réglage, mais non pas celle du circuit des consommateurs de chaleur. Celle-ci est prise en charge par la pompe du groupe de consommateurs. Pour les distributeurs à pression différentielle, un équilibrage hydraulique est

Figure 2.10: Distributeur sans pression différentielle sans pompe principale, groupe de consommateurs en circuit mélangeur. Gén: générateur de chaleur CC: consommateur de chaleur

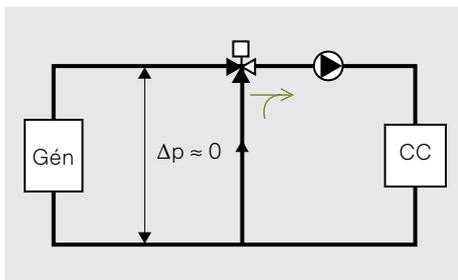


Figure 2.11: Distributeur sans pression différentielle avec pompe principale, groupe de consommateurs en circuit mélangeur.

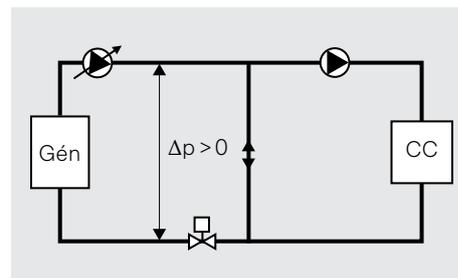
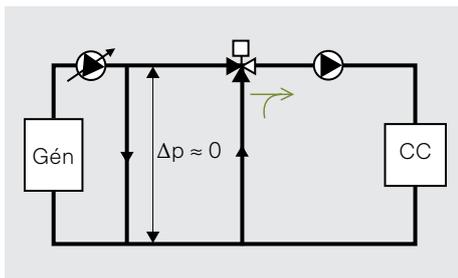


Figure 2.12: Distributeur avec pression différentielle, groupe de consommateurs en circuit d'injection avec organe de régulation à passage droit.

Figure 2.13: Régulation de la température aller selon les conditions météorologiques en liaison avec des vannes thermostatiques.

- 1 Régulation de la température aller
- 2 Organe de réglage
- 3 Pompe du groupe de chauffage réglée avec débit variable
- 4 Vanne thermostatique
- 5 Sonde de température extérieure
- 6 Courbe de chauffe (indicateur de la température de consigne aller)
- 7 Sonde de température aller

θ_e : température extérieure
 θ_i : température ambiante

Gén: générateur, resp. échangeur de chaleur
Em: émission de chaleur (p.ex. corps de chauffe, réchauffeur d'air)

nécessaire entre les groupes de consommateurs au moyen d'étrangleurs respectifs (selon la figure 2.9). Si de basses températures retour du générateur de chaleur sont requises, comme pour les générateurs à condensation, il faudrait choisir des circuits avec organes de réglage à passage droit (circuits de base 3 et 6) pour les consommateurs.

Régulation de la distribution et de l'émission de chaleur

Les systèmes d'émission de chaleur influencent les températures ambiantes pendant la période de chauffe. La puissance thermique nécessaire est assurée au moyen de deux types de régulation, qui sont très souvent combinés:

- Régulation primaire (distribution de chaleur): adapter la température aller à l'évolution de la température extérieure pour tout le groupe de chauffage.
- Régulation secondaire (émission de chaleur): adapter le débit dans le local pour la régulation fine de la température du local.

Régulation de la température aller selon les conditions météorologiques

Ce type de régulation fait partie de la régulation primaire. Par mauvais temps et basses températures, le besoin en chaleur augmente. Pour atteindre la tempé-

rature ambiante souhaitée, la température aller augmente selon la courbe de chauffe réglée de façon fixe. Cependant, les apports thermiques internes et externes ne sont pas pris en compte.

Dans les bâtiments bien isolés notamment, l'influence d'une variation de la température extérieure sur la température ambiante diminue. La régulation de la température aller en fonction de la seule température extérieure peut être améliorée avec la prise en compte des influences dues au vent et au soleil.

Dans ce cas, on parle d'une «régulation de la température aller en fonction des conditions météorologiques».

Il est aussi possible de corriger les apports thermiques supplémentaires par la compensation de la température ambiante. À cet effet, la température ambiante est mesurée dans un local de référence et en cas d'apports thermiques supplémentaires, la courbe de chauffe est décalée parallèlement vers le bas, en fonction de l'écart de température ambiante observée. Cette méthode ne peut toutefois fonctionner que si les grandeurs perturbatrices (apports thermiques interne et externe) agissent uniformément sur tous les locaux. Malheureusement, cela n'est en général pas le cas, car les grandeurs perturbatrices surviennent souvent de façon très di-

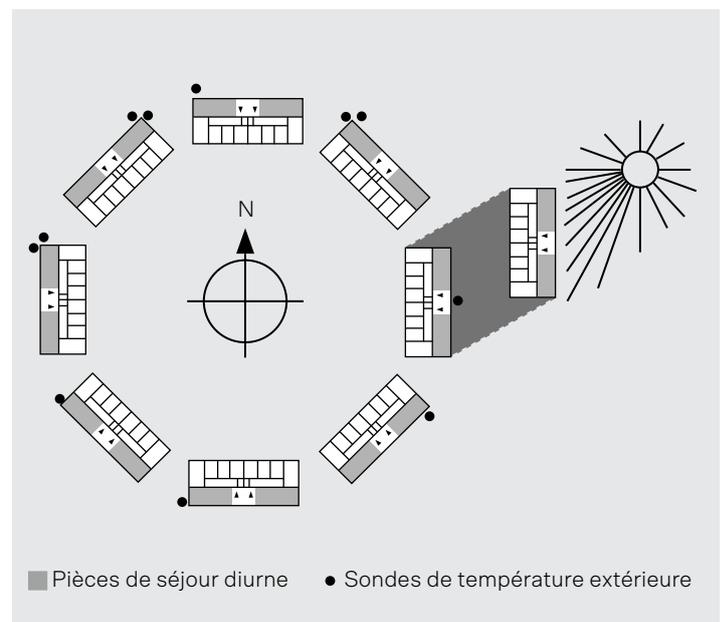
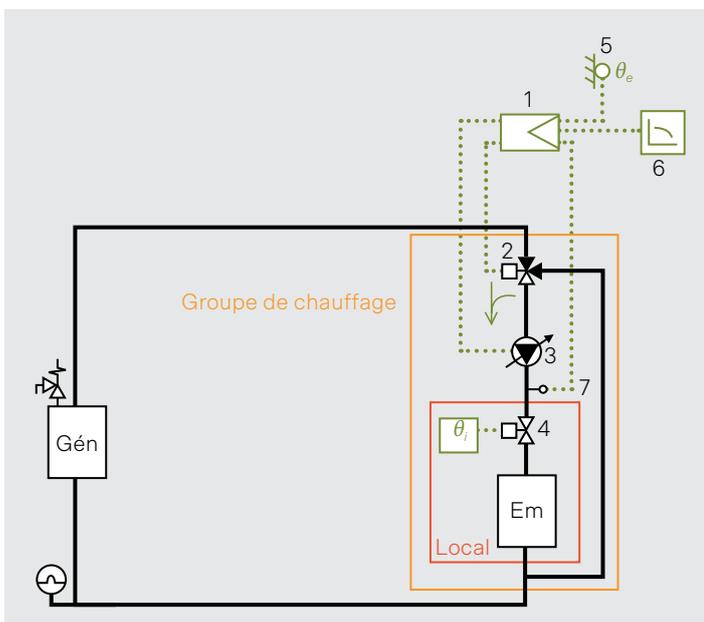


Figure 2.14: Disposition des sondes de température extérieure.

verse dans les différents locaux. Dans ce cas, seules des vannes thermostatiques dans tous les locaux, régulant les débits dans les systèmes d'émission de chaleur (régulation secondaire), peuvent aider. Pour cette raison, la régulation de la température aller en fonction des conditions météorologiques est de nos jours usuellement combinée avec des vannes thermostatiques. Concernant le **placement des sondes de température extérieure**, les règles suivantes s'appliquent:

- Ne jamais les exposer au rayonnement solaire direct
- Ne jamais les monter sur des façades avec courants ascendants d'air très chaud
- Ne pas les monter au-dessus des bouches d'air rejeté

La règle d'autrefois qui postulait de « toujours placer la sonde extérieure sur la façade nord » n'est aujourd'hui plus aussi immuable. Il faut différencier selon la situation: pour les bâtiments bien isolés avec des éléments de construction massifs, par exemple, on souhaite utiliser la capacité d'accumulation de la masse du bâtiment. La chaleur apportée est alors stockée dans ces éléments et restituée plus tard à l'air ambiant qui s'est rafraîchi. Les sondes disposées sur la façade est doivent être ombragées le matin par un conifère (attention: les feuillus perdent leurs feuilles en automne), par des bâtiments voisins ou par un balcon. La sonde est sinon trop fortement chauffée par le

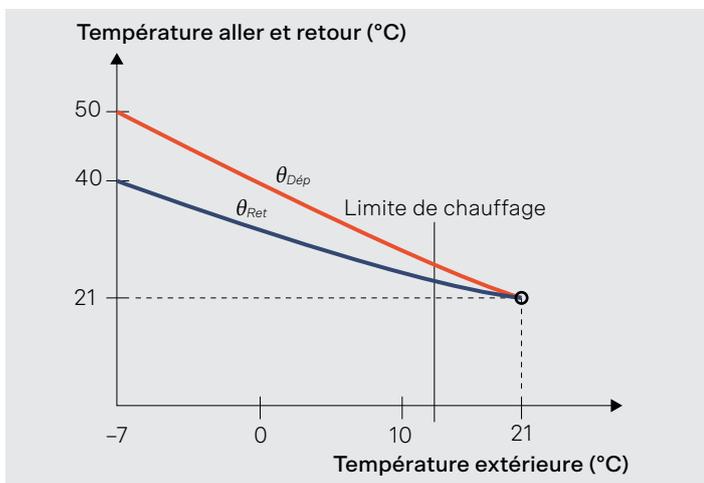
soleil du matin et la température aller est par conséquent trop basse.

La **courbe de chauffe** décrit la relation entre la température aller et la température extérieure. Elle est réglée manuellement dans le régulateur et dépend du bâtiment ainsi que du système d'émission de chaleur.

Par température aller, on entend la température de l'eau de chauffage qui circule à travers l'émetteur de chaleur (chauffage au sol, corps de chauffe, etc.). Selon la température extérieure et le système d'émission de chaleur, elle se situe entre 25 et 50 °C. Les installations dotées uniquement de chauffages de surface (p. ex. chauffages au sol) se contentent de 25 et 35 °C (tableaux 2.22 et 2.23).

La courbe de chauffe doit être surveillée et optimisée après la mise en service. A cet effet, il est recommandé d'ouvrir complètement les vannes thermostatiques dans le local de référence (local le plus défavorable) les jours de grand froid et de recueillir les réactions des utilisateurs. Celles-ci permettront ensuite de corriger la courbe de chauffe vers le haut ou vers le bas. Si la courbe de chauffe est correctement réglée, la température ambiante souhaitée est tout juste atteinte les jours froids d'hiver sans rayonnement solaire intense. La courbe de chauffe peut être ajustée de manière plus précise à l'aide d'enregistrements de la température extérieure et de la température ambiante pendant une période de chauffage.

Figure 2.15: Exemple d'une courbe de chauffe pour l'émission de chaleur par des corps de chauffe.



Pompes de circulation (circulateurs)

Les pompes de circulation font circuler un fluide caloporteur dans les installations de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Elles sont entraînées par des moteurs électriques. Bien qu'elles n'utilisent qu'une faible puissance électrique, elles peuvent induire une grande part de la consommation énergétique en raison du nombre important d'heures de fonctionnement. Les installations techniques moyennes et petites sont presque exclusivement équipées de pompes de circulation à rotor noyé. Jusqu'à une puis-

sance hydraulique de 2500 W, ce type de pompes doit avoir en Suisse un indice d'efficacité énergétique (IEE) $\leq 0,23$, conformément à l'Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique [OEEE]. L'IEE détermine largement le rendement des pompes de circulation à rotor noyé. Plus il est bas, plus la pompe est efficace. Les meilleures pompes de circulation sur le marché sont entraînées par des moteurs EC (Electronically Commutated) et atteignent des valeurs IEE inférieures à 0,16. Un choix de pompes de circulation particulièrement efficaces est présenté sous [topten]. En cas de pompes de circulation de grande taille d'une puissance électrique supérieure à env. 800 W, il peut être judicieux de recourir à des pompes à rotor sec.

Figure 2.16: Types de régulation pour pompes non régulées et régulées automatiquement. (Source: Aide au dimensionnement Pompes de circulation, SuisseEnergie)

Régulation des pompes: on fait en général la différenciation entre pompes de circulation non régulées (cas u à la figure 2.16) et celles qui sont régulées (cas c et v à la figure 2.16). L'intersection entre

le débit volumique (V) et la courbe caractéristique de la pompe correspond au point de fonctionnement (B). Lors du dimensionnement des pompes de circulation, il faut vérifier que leur rendement est bon en exploitation. Il s'agit de respecter les points suivants:

- Avec des pompes de circulation non régulées, le point de fonctionnement de dimensionnement doit se situer dans le tiers médian de la courbe caractéristique de la pompe.
- Avec des pompes de circulation régulées, le point de fonctionnement de dimensionnement doit se situer dans le dernier tiers (à droite) de la courbe caractéristique de la pompe. Cela permet d'obtenir une plage de régulation importante et un rendement élevé en charge partielle.

Le point de fonctionnement des **pompes de circulation non régulées** se situe toujours sur la courbe caractéristique de la pompe. En d'autres termes, la hauteur de refoulement augmente lorsque le dé-

Figure 2.17: Plages recommandées pour le dimensionnement des pompes de circulation non régulées et régulées.

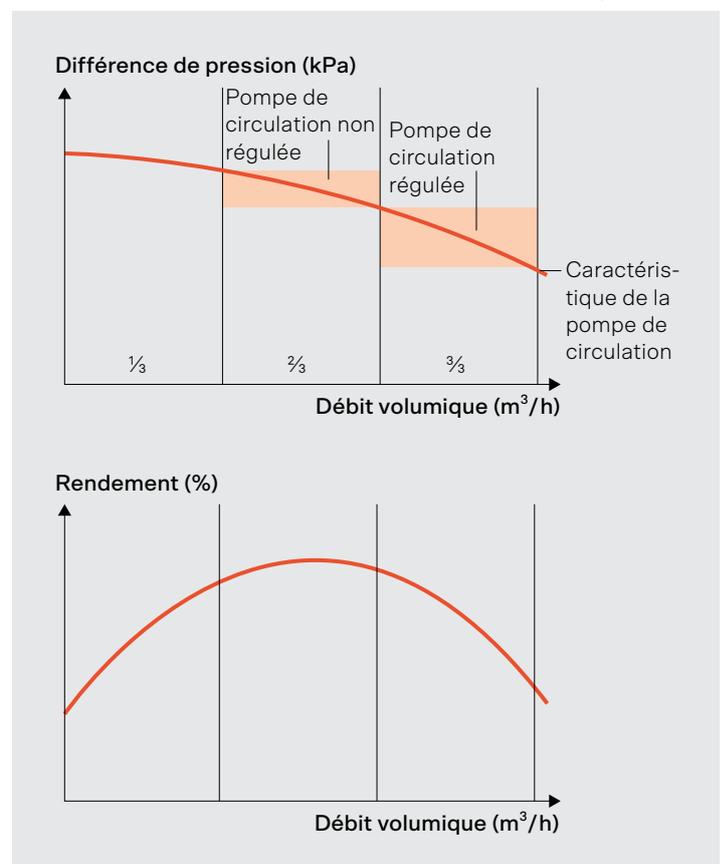
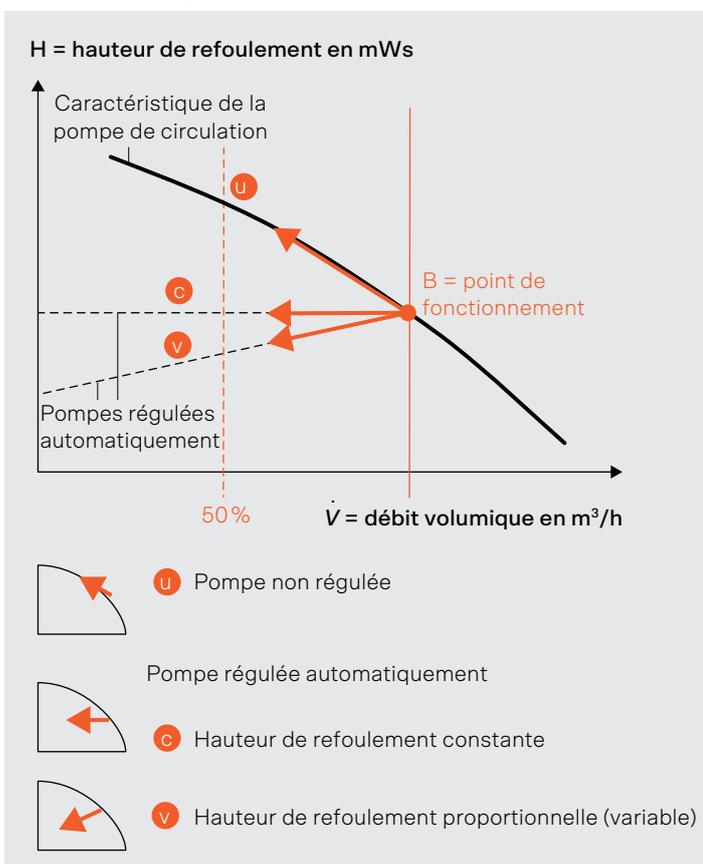


Figure 2.18:
Diagramme d'une pompe non régulée.

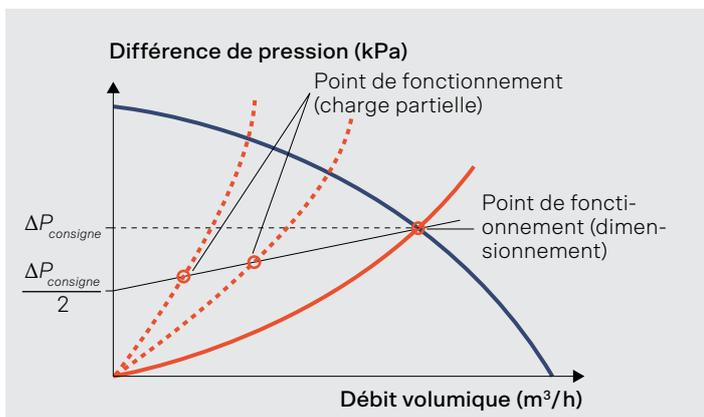
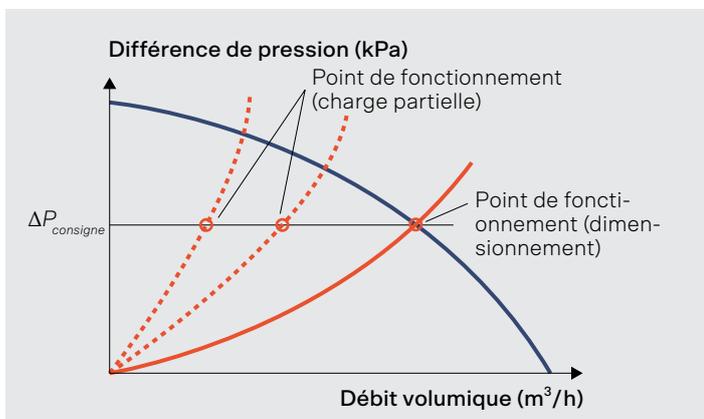
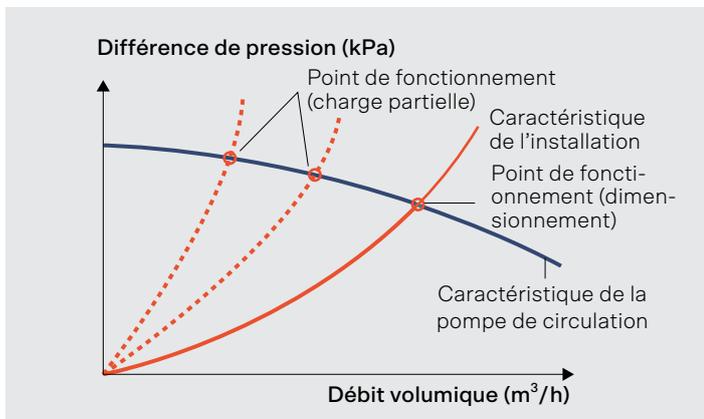
Figure 2.19:
Diagramme d'une pompe régulée avec pression de service constante (c).

Figure 2.20:
Diagramme d'une pompe régulée avec pression de service proportionnelle (v).

bit volumique baisse et le régime reste constant. Les pompes de circulation non régulées sont utilisées lorsque les données hydrauliques restent en principe constantes pendant le fonctionnement. C'est le cas lors de la charge de l'accumulateur d'eau chaude, par exemple, ou encore pour les pompes principales avec des distributions sans pression différentielle.

A l'inverse de celles qui ne le sont pas, les **pompes de circulation régulées** adaptent la hauteur de refoulement en fonction des variations de charge dans le circuit hydraulique; la puissance de la pompe est régulée en continu au moyen d'un convertisseur de fréquence. Le régime de la pompe est continuellement adapté aux conditions exigées dans l'installation. Elle est réglée en fonction de chaque point de fonctionnement de charge partielle et adapte par là sa consommation de puissance électrique. L'efficacité énergétique de la pompe de circulation est ainsi nettement améliorée. La condition préalable est une régulation de la pression différentielle en fonction du débit volumique. Concernant la régulation de la pression différentielle, on distingue de nos jours deux types de régulation:

- Régulation avec pression de service constante (cas c à la figure 2.16): la pression différentielle de l'installation est maintenue constante lorsque le débit volumique varie. En principe, ce mode de fonctionnement est mis en place pour des installations de chauffage plus petites au moyen de vannes thermostatiques par exemple, ou encore pour des installations importantes ayant un comportement variable en charge partielle. La pompe est réglée pour maintenir la pression différentielle constante soit via les consommateurs, soit via la pompe.
- Régulation avec pression de service proportionnelle (cas v à la figure 2.16): avec ce mode de régulation, la pression différentielle baisse lorsque le débit volumique baisse et augmente lorsque le débit volumique augmente. A cet effet, la pression différentielle est mesurée via la pompe et régulée en fonction de la courbe de régulation de celle-ci. Ce mode de régulation est judicieux dans la plupart des cas. Il est utilisé pour les installations avec une perte de charge élevée dans la distribution et un comportement similaire des consommateurs en charge partielle.



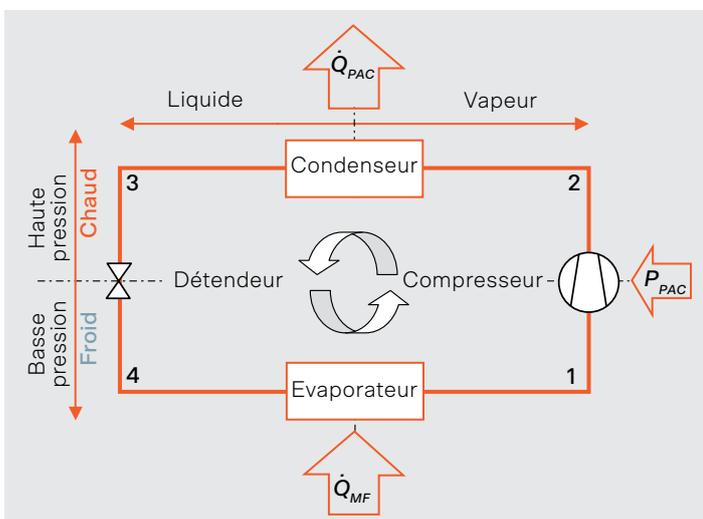
2.3 Pompes à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) correspond, sur le plan technique, à une machine frigorifique (MF) (climatiseur). A l'inverse du climatiseur, la PAC chauffe un fluide caloporteur, l'eau de chauffage. La chaleur produite par la PAC (chaleur de condensation \dot{Q}_{PAC}) provient d'un potentiel énergétique plus bas, soutiré de la chaleur rejetée ou à l'environnement à l'aide de l'évaporateur (chaleur d'évaporation \dot{Q}_{MF}). A cet effet, un fluide frigorigène ayant une basse température d'ébullition s'évapore. Le fluide frigorigène à l'état gazeux est amené, au moyen du compresseur, à un niveau de température utilisable, plus élevé. Dans le condenseur, le gaz chauffé se liquéfie en transférant sa chaleur – la chaleur de condensation \dot{Q}_{PAC} – à l'eau de chauffage. Finalement, le fluide frigorigène encore sous pression est dilaté dans une vanne de détente et le processus recommence.

Un diagramme log-p-h permet de représenter ce cycle de manière claire et met en évidence le lien avec les états physiques du fluide frigorigène. L'évolution réelle des grandeurs d'état physique du processus est illustrée (de manière simplifiée) à la figure 2.22. En principe, le cycle de fonctionnement (ligne rouge) est subdivisé en trois phases:

- 1–2: compression
- 2–3: condensation
- 3–4: dilatation (détente)
- 4–1: évaporation

Figure 2.21: Principe d'un circuit de fluide frigorigène.



Dans un circuit réel, d'autres phases encore sont déterminantes:

- 1'–1: surchauffe (surchauffe du gaz d'aspiration); ce qui permet d'éviter que des gouttelettes de fluide frigorigène ne pénètrent dans le compresseur.
- 2–2': désurchauffe; extraction de chaleur au moyen d'une «désurchauffe de gaz chauds» à un niveau de température plus élevé.
- 3'–3: sous-refroidissement; ce qui permet d'obtenir une chaleur de condensation plus élevée avec le même effort.

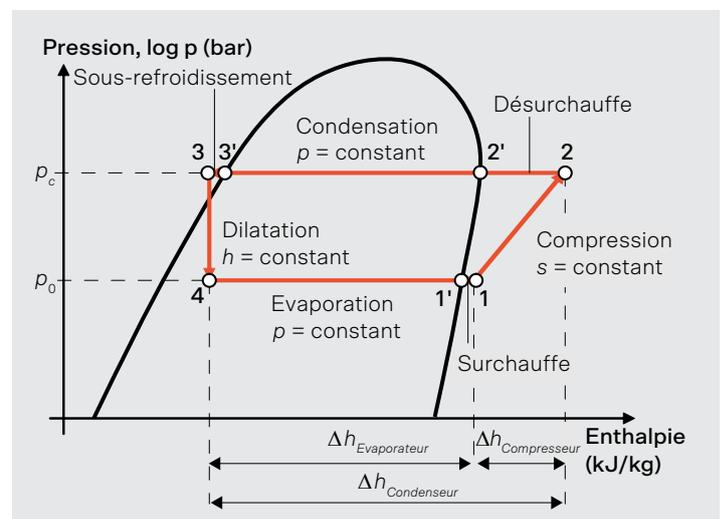
Des informations détaillées sur les pompes à chaleur sont disponibles dans le [Manuel Pompes à chaleur].

Limites du système et indicateurs d'efficacité énergétique

Dans la pratique, les indicateurs d'efficacité énergétique les plus utilisés pour les installations de pompes à chaleur sont le coefficient de performance (COP; en anglais Coefficient of Performance) et le coefficient de performance annuel (COPA).

La norme [SIA 384/3] donne deux définitions du coefficient de performance de la pompe à chaleur: la première, qui met l'accent sur la puissance, se formule comme suit: «Rapport entre la puissance thermique dégagée par une pompe à chaleur et la puissance électrique absorbée par l'entraînement de la pompe à chaleur (y.c. puissance requise pour la

Figure 2.22: Diagramme log p/h représentant le circuit de fluide frigorigène idéal.



commande et les éventuelles pompes)», tandis que l'autre se présente sous la forme que voici: «Rapport entre la chaleur produite par une pompe à chaleur électrique et l'énergie électrique utilisée (y.c. commande et les éventuelles pompes)». Contrairement à l'allemand (Leistungszahl Heizen/Arbeitszahl Heizen), l'usage français ainsi que la norme [SIA 384/3] ne différencient pas ces deux variantes par des appellations distinctes.

Dans la norme [SIA 384/3], la période considérée est toujours une année. Le coefficient de performance de la pompe à chaleur correspond donc au terme usuel «coefficient de performance annuel» (COPA).

Dans la pratique, le COPA est souvent utilisé avec des limites de système peu claires. Selon les limites du système (espace d'observation), on obtient en effet des chiffres très différents. Les notions et limites du système plus différenciées indiquées dans la figure 2.23 ont fait leurs preuves. On devrait en outre toujours distinguer les valeurs en mode chauffage des valeurs en mode production d'eau chaude ou celles en mode production d'eau chaude et chauffage combiné.

Types de sources de chaleur

Il est primordial de choisir une source de chaleur appropriée pour qu'une pompe à chaleur atteigne un bon COPA. La température de la source doit être constante et la plus élevée possible, afin que l'écart de température entre la source de chaleur (évaporateur) et le condenseur soit le plus faible possible. Pour une PAC, les sources d'énergie suivantes sont appropriées:

- Air, à savoir la chaleur ambiante de l'air extérieur et de l'air rejeté
- Eau, à savoir les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux usées
- Géothermie peu profonde et profonde
- Chaleur perdue provenant du froid industriel, du froid de climatisation ou du froid de process, par exemple

Les PAC air-eau soutirent de la chaleur à l'air extérieur ou à l'air rejeté par des installations de conditionnement d'air (installations de climatisation). L'air extérieur est disponible en quantité illimitée. Néanmoins, les basses températures de l'air extérieur durant la saison froide et un taux élevé de l'humidité de l'air représentent des inconvénients importants. Ainsi, il peut arriver que du givre et de la glace se déposent sur l'évaporateur lors de basses températures de l'air extérieur. Le dispositif de dégivrage de la PAC permet alors de dégivrer l'échan-

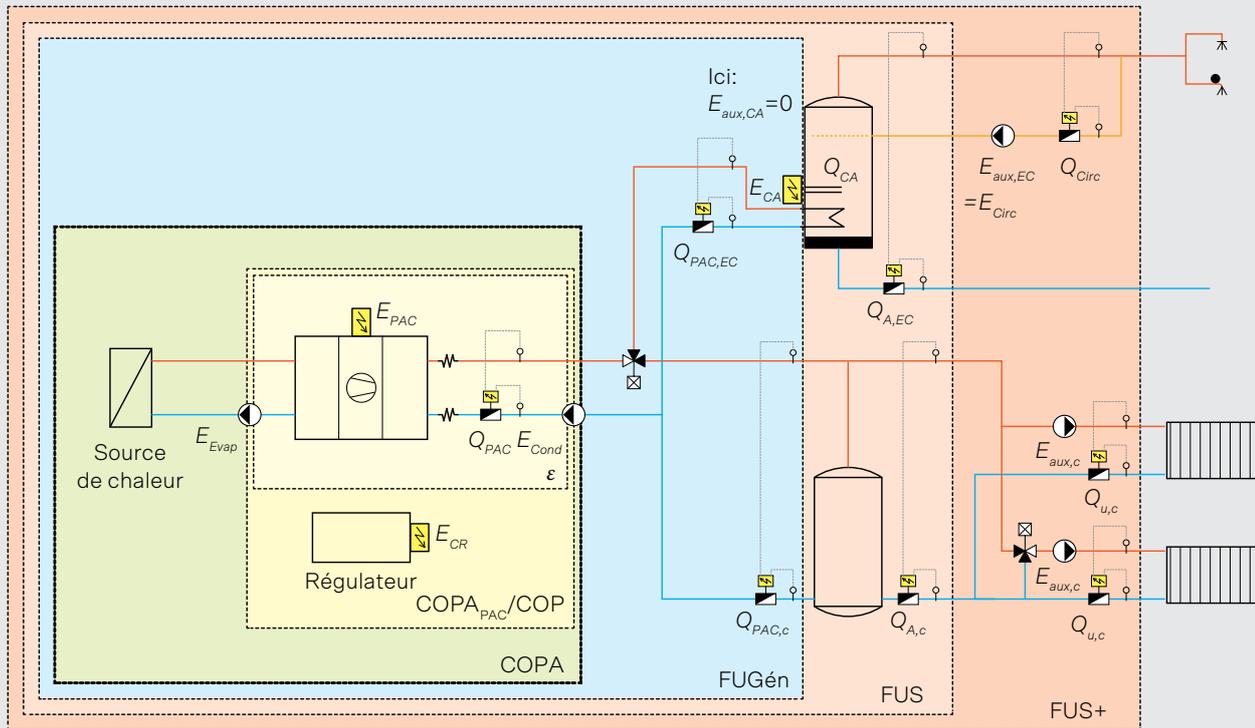
Figure 2.23 (à droite, légende des symboles ci-dessous): Limites du système et valeurs caractéristiques des pompes à chaleur.

Puissances (valeurs instantanées ou valeurs moyennes sur une courte période)

- \dot{Q}_{PAC} Puissance thermique de la pompe à chaleur
- P_{PAC} Puissance absorbée par le compresseur de la pompe à chaleur
- (P_{Evap}) Part de puissance pour compenser la perte de charge de l'évaporateur
- (P_{Cond}) Part de puissance pour compenser la perte de charge du condenseur
- P_{CR} Puissance absorbée par la commande et la régulation à l'intérieur de la pompe à chaleur
- P_D Puissance moyenne absorbée par le dispositif de dégivrage

Energies (valeurs annuelles)

- $Q_{PAC} = Q_{PAC,h} + Q_{PAC,EC}$ Chaleur générée par la pompe à chaleur
- Q_{CA} Chaleur générée par le chauffage d'appoint
- $Q_A = Q_{A,c} + Q_{A,EC}$ Chaleur utile dégagée par les accumulateurs
- $Q_u = Q_{u,c} + Q_{u,EC}$ Chaleur disponible chez l'utilisateur
- E_{PAC} Consom. d'énergie du compresseur de la pompe à chaleur
- (E_{Evap}) Consom. d'énergie de la pompe d'évaporation/ventilateur (part PAC interne)
- (E_{Cond}) Consom. d'énergie de la pompe du condenseur (part PAC interne)
- E_{Evap} Consom. d'énergie de la pompe de l'évaporateur/ventilateur (globale)
- E_{Cond} Consom. d'énergie de la pompe du condenseur (globale)
- E_{CR} Consom. d'énergie de la commande et de la régulation
- E_D Consom. d'énergie du dispositif de dégivrage
- E_C Consom. d'énergie du chauffage de carter
- E_{CA} Consom. d'énergie du chauffage d'appoint
- $E_{aux,CA}$ Consom. d'énergie auxiliaire pour le chauffage d'appoint (p.ex. circulateurs)
- $E_{aux,c}$ Consom. d'énergie auxiliaire pour la distribution de chaleur chauffage (p.ex. circulateurs)
- $E_{aux,EC}$ Consom. d'énergie auxiliaire pour la production d'eau chaude sanitaire (p.ex. circulation)



Lié à la puissance	Indice de performance (ϵ)	Coefficient of Performance (COP)
	$\epsilon = \frac{\dot{Q}_{PAC}}{P_{PAC}}$	$COP = \frac{\dot{Q}_{PAC}}{P_{PAC} + (P_{Evap}) + (P_{Cond}) + P_{CR} + P_D}$

Coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur ($COPA_{PAC}$)

$$COPA_{PAC} = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC} + (E_{Evap}) + (E_{Cond}) + E_{CR} + E_D + E_C}$$

Coefficient de performance annuel (COPA)

$$COPA = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC} + E_{Evap} + (E_{Cond}) + E_{CR} + E_D + E_C}$$

Fraction utile du générateur de chaleur (FUGén)

$$FUGen = \frac{Q_{PAC} + [Q_{CA}]}{E_{PAC} + E_{Evap} + E_{Cond} + E_{CR} + E_D + E_C + [E_{CA} + E_{au,CA}]}$$

[...]: y c. chauffage d'appoint

Fraction utile du système (FUS)

$$FUS = \frac{Q_A}{E_{PAC} + E_{Evap} + E_{Cond} + E_{CR} + E_D + E_C + E_{CA} + E_{au,CA}}$$

Fraction utile Plus du système (FUS+)

$$FUS+ = \frac{Q_u}{E_{PAC} + E_{Evap} + E_{Cond} + E_{CR} + E_D + E_C + E_{CA} + E_{au,CA} + E_{au,c} + E_{au,EC}}$$

geur de chaleur à lamelles. Par conséquent, une PAC air-eau est pertinente pour les bâtiments neufs ou assainis pouvant être chauffés à basse température pendant toute l'année (température aller $\leq 35^\circ\text{C}$). En outre, les bâtiments ne devraient pas être situés dans des régions froides telles que p.ex. certaines vallées jurassiennes.

Dans le cas de la PAC air extérieur-eau, on distingue les appareils compacts et les appareils split. Dans la catégorie des appareils compacts, deux systèmes sont à nouveau à différencier: les appareils pour l'intérieur et les appareils pour l'extérieur. Dans le cas des appareils pour l'intérieur, l'air est capté à l'extérieur et acheminé jusqu'à la PAC via une conduite d'air. Si l'on manque de place dans le bâtiment, on peut utiliser un appareil compact pour l'extérieur. Si des débits d'air trop élevés ne permettent

pas l'installation d'une conduite d'air dans le bâtiment, la PAC est séparée en deux parties. Cet appareil split se compose donc de deux parties: un évaporateur disposé à l'extérieur et un condenseur avec compresseur disposé à l'intérieur. Ces deux parties sont reliées par des conduites de fluide frigorigène.

Indications de planification pour les PAC air-eau:

- Obligation d'autorisation: le raccordement électrique doit être autorisé par l'entreprise d'approvisionnement en électricité qui en a la compétence. En revanche, l'utilisation de l'air extérieur ne nécessite aucune autorisation.

- Dans les régions froides avec de basses températures extérieures: lors de basses températures extérieures au cours de la saison froide, il peut arriver que la température requise par le système de chauffage ne soit pas atteinte ou encore que la pompe à chaleur fonctionne avec un mauvais COP. Il peut alors être judicieux de recourir à une source de chaleur supplémentaire (un poêle à bois, par exemple) qui soutient la PAC, voire prend complètement en charge le chauffage pendant les périodes les plus froides. Conformément aux [MoPEc], les pompes à chaleur doivent être dimensionnées de façon à pouvoir couvrir tout le besoin en chaleur.

- Dégivrage automatique de l'évaporateur: en présence de températures extérieures inférieures à env. 5°C et d'une humidité de l'air correspondante, l'évaporateur peut se couvrir de givre; un dégivrage automatique est nécessaire. A ce titre, il faut respecter les exigences spécifiques de l'appareil.

- L'eau de condensation qui se forme au niveau de l'évaporateur doit être évacuée: en raison du refroidissement de l'air en dessous du point de rosée, de l'eau de condensation se forme dans l'évaporateur. Celle-ci doit être collectée et évacuée dans une conduite protégée contre le gel. Ceci s'applique également à la tuyauterie de l'évaporateur.

- Pas de court-circuit de l'air extérieur capté et refroidi: il convient de veiller à

Figure 2.24: PAC air-eau: appareil compact pour l'extérieur.
(Source: energie-environnement.ch)

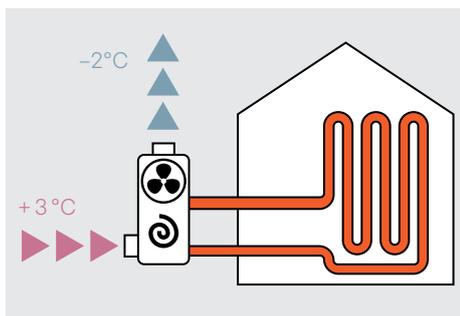


Figure 2.25: PAC air-eau: appareil compact pour l'intérieur.
(Source: energie-environnement.ch)

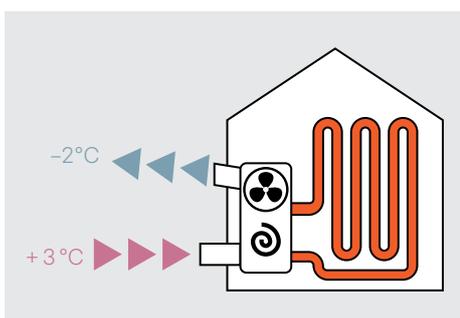
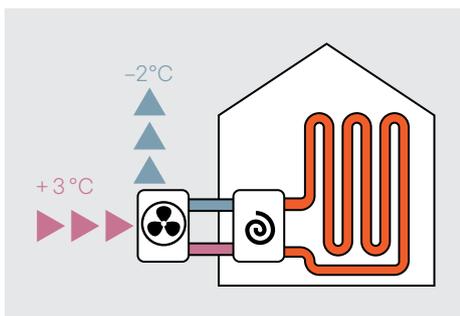


Figure 2.26: PAC air-eau: appareil split.
(Source: energie-environnement.ch)



ce que l'air refroidi ne soit pas aspiré à travers la prise d'air de l'évaporateur, ce qui pourrait provoquer un court-circuit.

- Augmentation de l'efficacité énergétique grâce à un emplacement idéal de la prise d'air: l'efficacité énergétique de la PAC peut être accrue en captant l'air dans des endroits «chauds», p. ex. dans des parkings souterrains, des installations d'extraction d'air du bâtiment ou des échangeurs de chaleur terre-air.

- Protection de la pompe à chaleur: la pompe à chaleur et la prise d'air doivent être protégées des dommages susceptibles d'être causés par des personnes ainsi que par la neige, par les feuilles mortes, les particules de poussière et les petits animaux. À l'inverse, il y a lieu de protéger les personnes des éléments mobiles (ventilateurs, condenseurs et pompes) ainsi que des électrocutions, le cas échéant.

- Autorisation pour les appareils extérieurs: une installation fixe d'appareils extérieurs requiert un permis de construire.

- Attention aux émissions sonores: les ventilateurs et les compresseurs génèrent du bruit et des vibrations. Pour cette raison, la PAC doit respecter les exigences de l'[OPB] et souvent aussi des règlements communaux explicites à ce sujet. L'installateur doit dans tous les cas établir un justificatif de protection contre le bruit.

Les PAC eau-eau prélèvent de la chaleur dans les eaux usées, les eaux souterraines ou les eaux de surface telles que les rivières ou lacs. Par rapport à l'air, la source de chaleur que représente l'eau a le grand avantage de présenter une température quasiment constante tout au long de l'année. En raison de ce niveau de température comparativement élevé et constant, les eaux souterraines sont considérées comme la meilleure source de chaleur pour une PAC. Néanmoins, les eaux de surface issues des lacs et des rivières peuvent également être utilisées. Les PAC eau-eau sont toujours soumises à autorisation et le type de captage, le retour ainsi que la température minimale de retour de l'eau doivent être fixés d'entente avec les autorités compétentes.

Indications de planification pour les PAC eau-eau:

- Obligation d'autorisation: l'utilisation des eaux usées, des eaux souterraines et des eaux de surface doit être autorisée par l'autorité compétente.

- Expertise géologique et hydrologique: la planification et la mise en œuvre devraient s'effectuer de pair avec une consultation géologique ou hydrologique. Pour connaître les sites où l'exploitation des eaux souterraines est autorisée, consulter les géoportails d'information des cantons (cartes de la protection des eaux et d'utilisation de la chaleur).



Figure 2.27: PAC eau-eau; source de chaleur: captage de l'eau souterraine. (Source: BKW)



Figure 2.28: PAC saumure-eau; source de chaleur: sondes géothermiques. (Source: BKW)

- Attention à l’infiltration des eaux de surface: en cas de captages à proximité des eaux de surface, il convient de prendre en compte la possibilité d’infiltration de celles-ci.
 - Attention à l’écoulement des eaux souterraines: lors de la localisation des points de prélèvement et de restitution, il convient de veiller à l’écoulement de l’eau souterraine (aucune restitution dans la zone d’afflux du prélèvement).
 - Réalisation d’une analyse de l’eau – les valeurs limites suivantes ne doivent pas être dépassées:
 - Valeur pH ≥ 7
 - Fer (dissous) $\leq 0,15$ mg/l
 - Manganèse (dissous) $\leq 0,1$ mg/l
- Il faut toutefois prendre en compte que la qualité de l’eau peut être soumise à des variations saisonnières. Les matériaux des conduites et des composants doivent être choisis de sorte à prévenir la corrosion et l’encrassement.
- Niveau des eaux souterraines: l’installation doit être dimensionnée au niveau des eaux souterraines le plus bas auquel on puisse s’attendre.
 - Suivi de la température et de l’écoulement: des mesures adaptées doivent prévenir une surexploitation du captage ainsi qu’un refroidissement de l’eau exploitée en dessous du point de congélation.

Les pompes à chaleur saumure-eau prélèvent de la chaleur dans le sol via un circuit fermé de saumure. On utilise des registres horizontaux (registres géothermiques) ou des sondes verticales (sondes géothermiques) à cet effet. Etant donné que le sol présente une température quasiment constante tout au long de l’année, la chaleur terrestre est une source de chaleur idéale pour la PAC.

Les sondes géothermiques sont disposées verticalement et atteignent des profondeurs comprises entre 50 et 350m. Afin que le circuit de saumure ne gèle pas dans l’évaporateur de la PAC, on utilise souvent un mélange antigél (eau glycolée) en tant que fluide caloporteur.

Des informations détaillées sur la planification des pompes à chaleur à sondes géothermiques sont disponibles dans le [Manuel Pompes à chaleur]. Voici

quelques **indications de planification**:

- Les sites où l’utilisation de la géothermie est autorisée sont répertoriés sur les cartes d’utilisation de la géothermie disponibles aux géoportails cantonaux.
- Les installations de sondes géothermiques sont réalisées par des entreprises de forage agréées et sont toujours soumises à autorisation. Les cantons sont l’autorité compétente. Le groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur [GSP] décerne un label de qualité aux entreprises de forage de sondes géothermiques; il est recommandé de recourir à celles-ci.
- Le dimensionnement doit être effectué conformément à la norme [SIA 384/6]. Elle prévoit un procédé simplifié pour les installations simples comptant jusqu’à quatre sondes. Principe: plus le champ de sondes géothermiques est grand, plus le prélèvement de chaleur possible à long terme par mètre linéaire de sonde est faible. Il convient également de tenir compte des sondes voisines pas entièrement régénérées.
- Si l’installation de sondes géothermiques est utilisée en tant que «source de froid» à des fins de refroidissement (freecooling), le sol peut être partiellement «régénéré» par l’apport de chaleur. Les conséquences de la régénération sur le dimensionnement de la sonde géothermique doivent être établies par un spécialiste reconnu ou simulées à l’aide d’un logiciel adapté.
- Les installations de sondes géothermiques ne doivent pas être utilisées pour la déshumidification des constructions, car les conditions-cadres mentionnées ne sont généralement pas respectées.
- L’accès de l’appareil de forage au lieu de forage doit être garanti.
- Des informations détaillées sur la géométrie des sondes géothermiques et des forages sont disponibles dans le [Manuel Pompes à chaleur].

- Les conduites de raccordement des sondes géothermiques sont réunies dans un distributeur, qui peut être situé à l'extérieur ou à l'intérieur du bâtiment. Attention à la protection antigél: mise en œuvre d'une isolation thermique ou recours à un antigél dans les conduites.
- Le distributeur doit être accessible tout au long de sa durée de vie. Il doit comporter un marquage clair indiquant quelles sondes sont raccordées au distributeur et où. En cas d'installations dotées de deux sondes ou plus: il convient d'installer et de régler des vannes de régulation du débit.
- Les sondes géothermiques sont à concevoir pour le long terme et à dimensionner avec de la réserve (remplacement ultérieur de la PAC par un appareil de meilleure efficacité).

Les registres géothermiques se composent de serpentins enfouis horizontalement dans le sol, à une profondeur comprise entre 1,2 m et 1,5 m en dessous du niveau du terrain. Ils prélèvent

au sol principalement la chaleur apportée par le rayonnement solaire et la pluie. Pour ce type d'installation, il faudrait recourir à un mélange antigél en tant que fluide caloporteur.

Des informations détaillées sur la planification des PAC à registres géothermiques sont disponibles dans le [Manuel Pompes à chaleur]. Voici quelques **indications de planification**:

- Les registres géothermiques peuvent être sujets à autorisation; la compétence est cantonale.
- La puissance d'extraction maximale (puissance frigorifique) s'élève, en cas de conditions favorables, à environ 25 à 30 W par m² de surface de registre ou à environ 60 kWh pendant la période de chauffage. En cas de sol défavorable (sec), les valeurs sont de 10 à 15 W/m².
- Lors du recouvrement du registre géothermique, le système doit être sous pression, afin de détecter d'éventuels dommages. Les pierres, gravats, etc. ne sont pas appropriés pour le recouvrement.

Sous-sol pour sondes géothermiques	Puissance spécifique d'extraction \dot{q}_{MF} en W/m
Valeurs indicatives générales	
Sous-sol défavorable (sédiment sec) ($\lambda < 1,5$ W/mK)	20
Sous-sol de roche dure normal et sédiment saturé en eau ($1,5 \leq \lambda \leq 3,0$ W/mK)	50
Roche dure de conductivité thermique élevée ($\lambda > 3,0$ W/mK)	70
Divers types de roche	
Gravier, sable (sec)	< 20
Gravier, sable (aquifère)	55 – 65
Glaise, argile (humide)	30 – 40
Calcaire (massif)	45 – 60
Grès	55 – 65
Roche magmatique acide (p. ex. granite)	55 – 70
Roche magmatique basique (p. ex. basalte)	35 – 55
Gneiss	60 – 70

Tableau 2.1: Puissances spécifiques d'extraction \dot{q}_{MF} pour sondes géothermiques en Europe centrale avec une durée d'exploitation d'environ 2400 h/a; pour une première estimation. (Source: instructions de planification KWT)

Sous-sol pour registres géothermiques	Puissance spécifique d'extraction \dot{q}_{MF} en W/m ²
Sol sablonneux sec	10 – 15
Sol sablonneux humide	20 – 25
Sol argileux sec	20 – 25
Sol argileux humide	25 – 30
Sol aquifère	30 – 35

Tableau 2.2: Puissances spécifiques d'extraction \dot{q}_{MF} pour registres géothermiques; pour une première estimation. (Source: instructions de planification KWT)

- Selon la saison, les registres de sondes géothermiques peuvent déclencher des mouvements de terrain lorsqu'ils givent.
- Il faut protéger les registres terrestres contre les racines (plantations, arbres).

Voici quelques **indications de dimensionnement** pour les sondes et registres géothermiques: pour estimer dans la phase d'avant-projet les profondeurs des sondes géothermiques ainsi que les surfaces des registres géothermiques, il est possible de prendre en compte les puissances d'extraction spécifiques \dot{q}_{MF} des tableaux 2.1 et 2.2. Ces valeurs proviennent de différentes sources. La grande majorité se recoupe avec celles de la norme [SN EN 15450]. La puissance d'extraction spécifique des couches terrestres dépend de la texture du sol et de sa teneur en eau. Dans la phase de projet, il faut tenir compte des normes et directives déterminantes (à titre d'exemples: pour les sondes géothermiques la norme [SIA 384/6], pour les registres géothermiques la norme [VDI 4640-2]) ainsi que des recommandations de la part des fabricants et fédérations, p. ex. du [GSP].

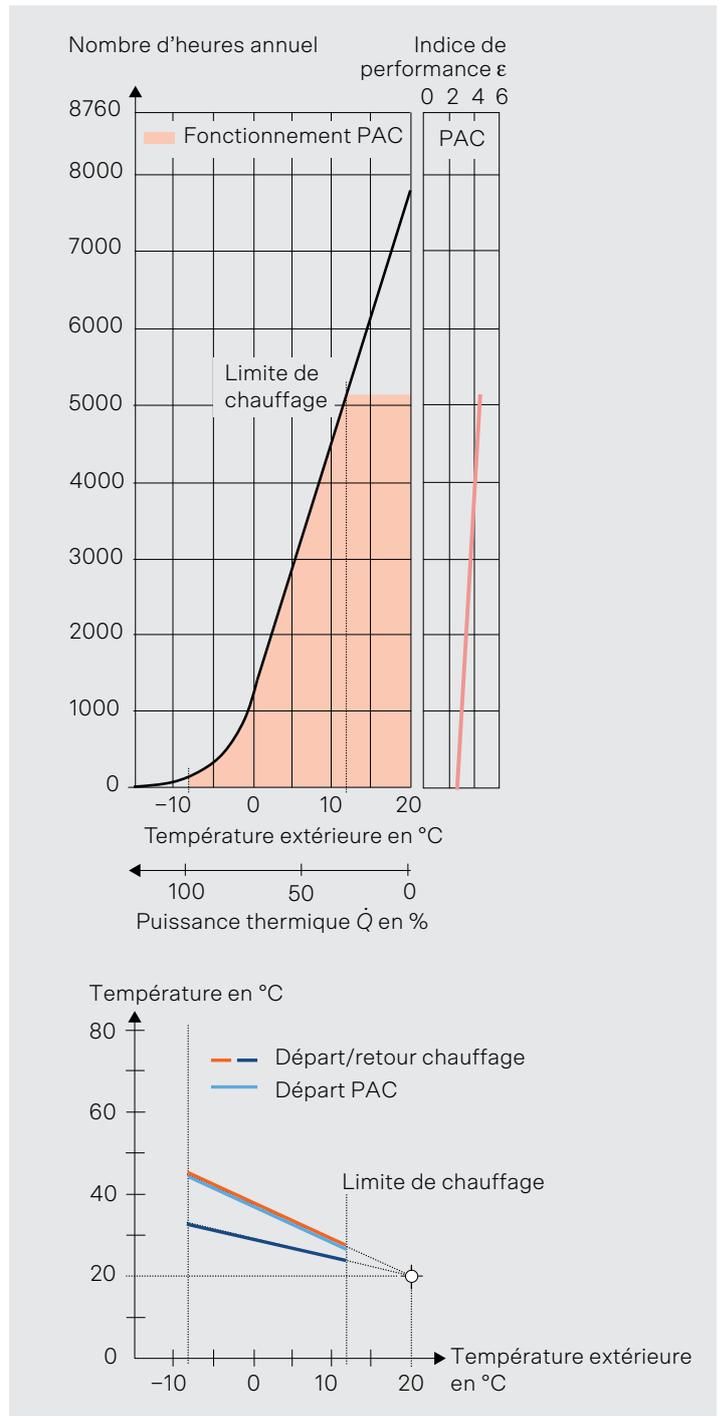
Défaillances de la pompe à chaleur pendant l'exploitation

Une installation de pompe à chaleur exploitée de manière optimale n'a en général pas de défaillances. Les installations doivent être proprement mises en service et soumises ensuite à une optimisation énergétique de l'exploitation. C'est le seul moyen pour assurer une exploitation énergétiquement efficace et par là des coûts d'exploitation aussi faibles que possible. [SuisseEnergie] thématise l'optimisation énergétique de l'exploitation, entre autres dans l'[ouvrage spécialisé OéE].

Si la chaleur de condensation \dot{Q}_{PAC} ne peut pas être évacuée, une pression trop élevée se forme dans le circuit de fluide frigorigène et la PAC connaît une **défaillance de haute pression**. Le pressostat de sécurité de haute pression empêche que la pression de condensation ne dé-

passe la limite d'exploitation. Il désactive le compresseur et la pompe à chaleur est mise hors service. Cela peut notamment se produire lorsque la température d'entrée de l'eau chaude dans le condenseur est trop élevée ou lorsque le débit à travers le condenseur est trop faible. Une chute de température massive et rapide à l'entrée du condenseur peut y faire chuter la pression du fluide frigori-

Figure 2.29: Fonctionnement monovalent d'une pompe à chaleur.



gène à tel point que la PAC peut connaître une **défaillance de basse pression**. Le pressostat de sécurité de basse pression désactive alors le compresseur. La commutation rapide de la production d'eau chaude en mode de chauffage peut déclencher une défaillance de basse pression.

Intégration hydraulique des PAC

Afin d'atteindre des temps de fonctionnement importants également en mode charge partielle, il faudrait opter pour un fonctionnement modulant de la PAC ou prévoir un découplage hydraulique, à savoir un accumulateur ou une dérivation. Ce point est déterminant pour la durée de vie de la PAC.

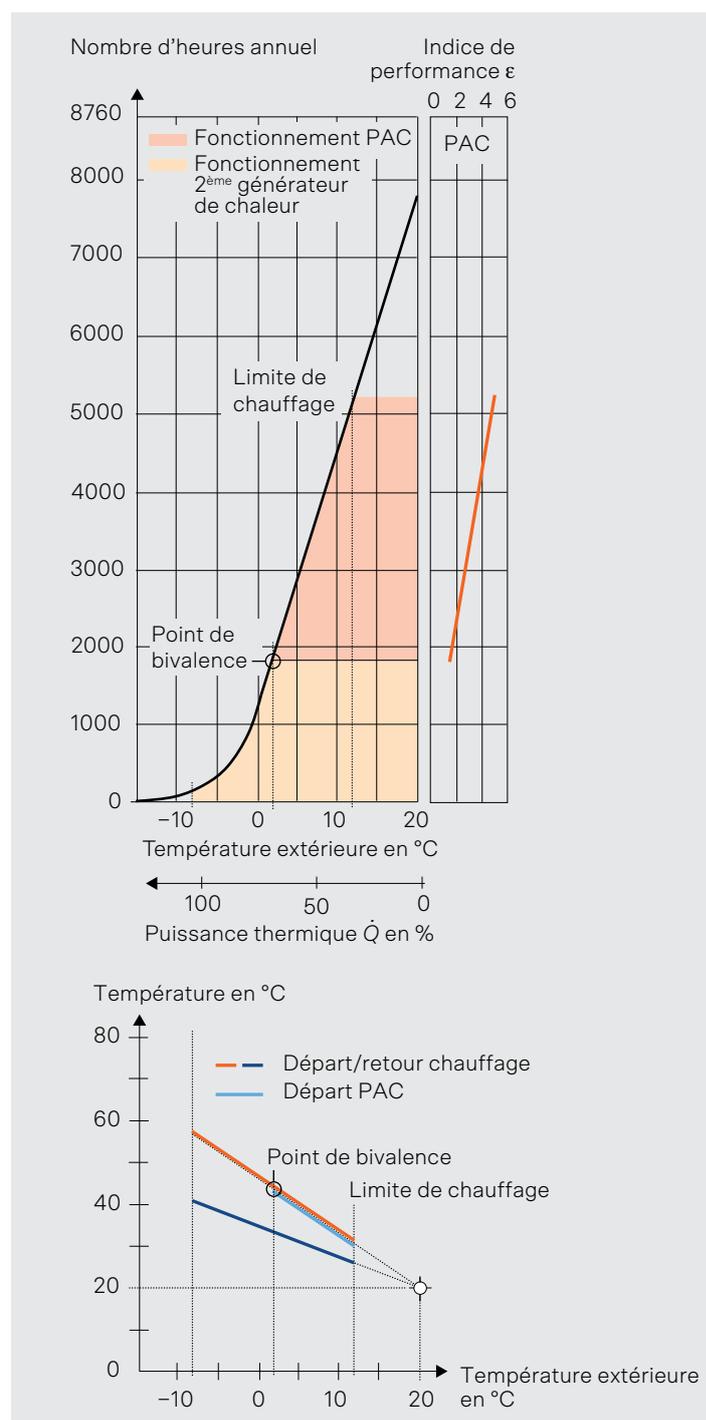
Les accumulateurs de chaleur permettent entre autres de pallier les temps de délestage de l'entreprise d'approvisionnement en électricité. En principe, un accumulateur de chaleur est requis:

- lorsque plusieurs circuits de chauffage sont régulés - dans ce cas le découplage hydraulique est nécessaire parce que les circuits de chauffage sont étranglés selon le besoin;
- lorsque l'installation de chauffage possède une part de vannes thermostatiques supérieure à 40 % de la surface chauffée - dans ce cas le découplage hydraulique est nécessaire parce que les vannes thermostatiques se ferment selon le besoin et réduisent ainsi le débit;
- lorsqu'une PAC à air extérieur utilise l'eau de chauffage pour le processus de dégivrage; ceci nécessite un certain volume d'eau de chauffage;
- pour les installations de chauffage fonctionnant avec de faibles volumes d'eau de chauffage - dans ce cas, un certain volume d'eau de chauffage est nécessaire pour éviter des cadences de commutation non admissibles;
- lorsqu'il faut pallier les temps de délestage de la PAC.

Si l'émission de chaleur s'effectue par chauffage au sol ou par un système d'éléments de construction thermoactifs (ECTA), la masse du bâtiment à capacité

thermique sert également d'accumulateur de chaleur. Il est ainsi possible de supprimer l'accumulateur, si le débit minimal à travers le condenseur est respecté. Celui-ci doit être atteint à l'aide d'un découplage hydraulique. Ce découplage peut être assuré au moyen d'une dérivation, d'un inverseur hydraulique ou d'un clapet de décharge. En outre, il faut tenir compte des temps de délestage.

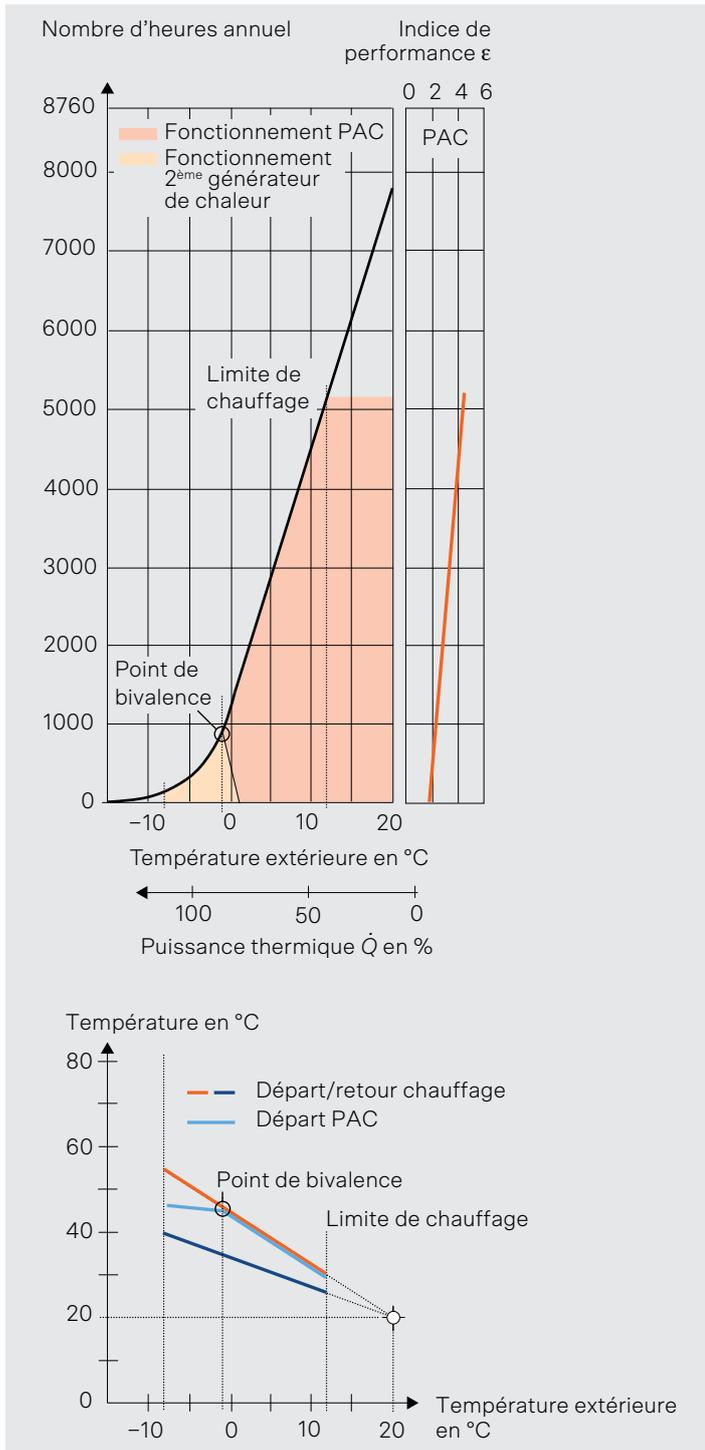
Figure 2.30: Fonctionnement bivalent alternatif d'une pompe à chaleur.



Modes de fonctionnement

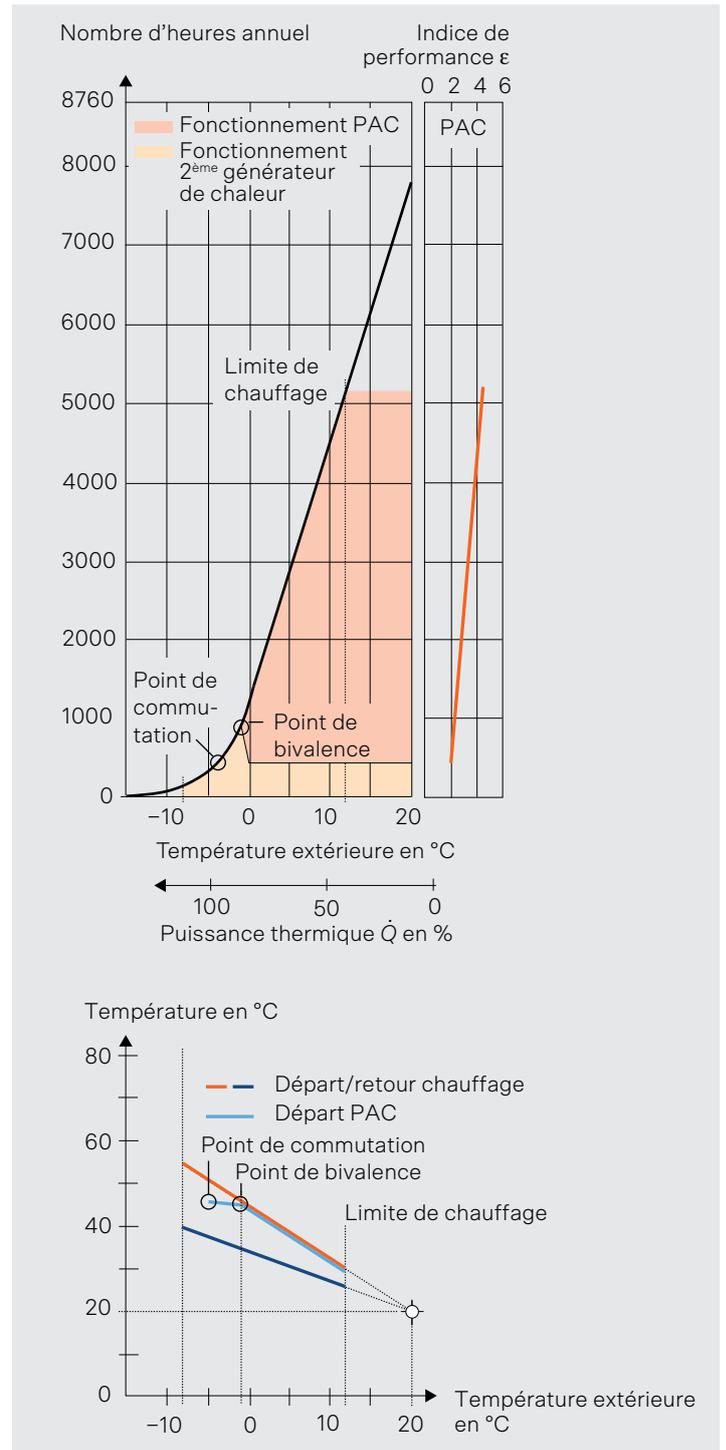
Fonctionnement monovalent: dans ce cas, la PAC met à disposition la puissance thermique requise pour tous les états de fonctionnement possibles. La PAC est dimensionnée en fonction du besoin en chaleur maximal de l'installation ainsi que pour la température aller maximale nécessaire.

Figure 2.32:
Fonctionnement bivalent parallèle d'une pompe à chaleur.



Fonctionnement bivalent: dans ce cas, la PAC ne doit pas fournir toute la puissance thermique requise. Un deuxième générateur de chaleur est nécessaire comme appoint de la PAC selon le mode de fonctionnement de celle-ci ou alors c'est ce deuxième générateur qui fournit la puissance nécessaire à 100%.

Figure 2.31:
Fonctionnement bivalent partiellement parallèle d'une pompe à chaleur.



Fonctionnement bivalent alternatif:

dans ce cas, la PAC fournit la puissance thermique requise dans sa totalité jusqu'à une température extérieure donnée. Ce point est appelé point de bivalence. Lorsque l'on descend en dessous de ce point de bivalence, le générateur de chaleur alternatif (chaudière à bois, à gaz ou à mazout) prend en charge la couverture de la puissance thermique requise. Le second générateur de chaleur doit ainsi être dimensionné en fonction du besoin en chaleur maximal du bâtiment ainsi que pour la température aller maximale nécessaire. Il est possible de dimensionner la PAC au point de bivalence pour un besoin en chaleur moins important.

Fonctionnement bivalent parallèle:

dans ce cas, un deuxième générateur de chaleur soutient la PAC à partir du point de bivalence. Ainsi, les jours de basses températures extérieures, les deux générateurs de chaleur fonctionnent simultanément et se complètent. Le générateur de chaleur d'appoint ne doit pas obligatoirement être dimensionné en fonction du besoin maximal en chaleur du bâtiment. Par contre, il est important que la température aller maximale nécessaire puisse être atteinte.

Fonctionnement bivalent partiellement

parallèle: il s'agit là d'une solution intermédiaire entre le fonctionnement alternatif et le fonctionnement parallèle. La PAC est dimensionnée de la même manière que pour le fonctionnement alternatif. Jusqu'au point de bivalence, la PAC couvre toute la puissance thermique requise. Au point de bivalence, le deuxième générateur de chaleur se met également en marche; les deux générateurs travaillent alors en parallèle. Si la température extérieure chute encore davantage, la PAC s'arrête au point de commutation défini et le second générateur de chaleur couvre seul toute la puissance thermique requise jusqu'à la température extérieure la plus basse. Le deuxième générateur de chaleur doit

donc obligatoirement être dimensionné en fonction du besoin en chaleur maximal du bâtiment. Là encore, il est important que la température aller maximale nécessaire puisse être atteinte.

2.4 Pompes à chaleur – exemples pratiques

Exemple 1: PAC sans accumulateur d'énergie

Mode chauffage: l'émission de chaleur (Em) s'effectue par chauffage au sol. Selon le besoin en chaleur de la pièce, la température retour baisse, respectivement augmente ($\theta_{PAC,Hors}$). L'augmentation de température s'effectue en conséquence à la sortie du condenseur ($\theta_{Dép,PAC}$). Si la température retour ($\theta_{PAC,Hors}$) dépasse la valeur de consigne conforme à la courbe de chauffe, la PAC s'arrête. La valeur de consigne de la température retour dépend de la température extérieure et de la courbe de chauffe prédéfinie.

Mode charge du chauffe-eau à accumulation: la charge du chauffe-eau à accumulation (CEA) peut être conçue sous forme de circuit prioritaire. Si la température du CEA ($\theta_{EC,En}$) descend en dessous de la valeur de consigne, le circuit

d'émission de chaleur est interrompu et la PAC augmente la température au niveau requis pour chauffer l'eau chaude sanitaire dans le CEA.

Au moyen d'un échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires, le CEA est chargé par étapes en plusieurs passages avec des températures de sortie du condenseur croissantes. Lorsque la valeur de consigne souhaitée pour la température d'entrée dans le condenseur ($\theta_{PAC,Hors}$) est atteinte, la charge de l'eau chaude sanitaire s'arrête. Étant donné que cette variante de charge nécessite beaucoup de temps et que l'émission de chaleur pour chauffer les locaux ne peut pas être maintenue activement lors de la charge, cette stratégie de charge devrait de préférence s'effectuer la nuit. Pendant ce temps, il n'y a aucune émission de chaleur dans le local et la température ambiante peut diminuer.

Tableau 2.3:
Spécifications relatives à l'exemple 1 avec pompe à chaleur.

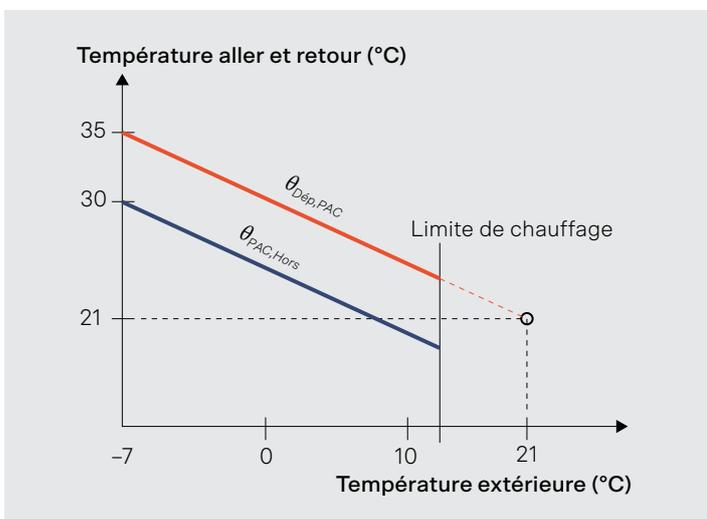
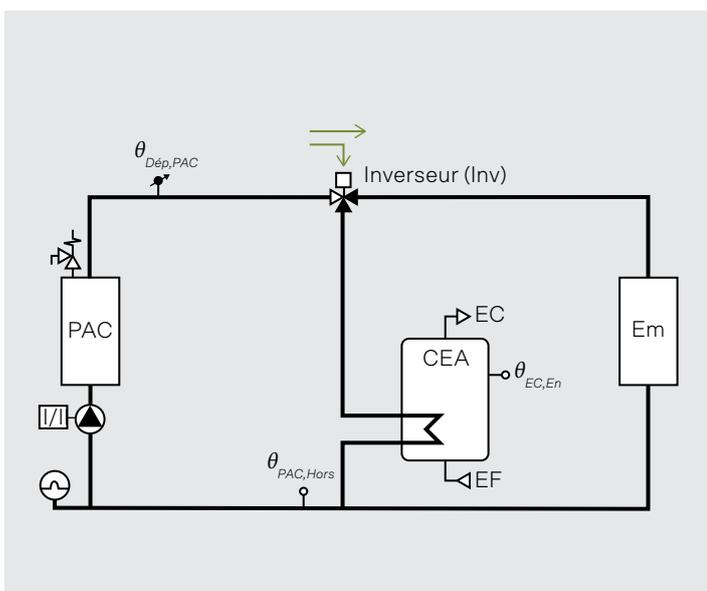
	Chauffage	Production d'eau chaude
Sources	Chaleur environnementale/ rejets thermiques et courant électrique/gaz naturel	–
Transformation	Pompe à chaleur	– Échangeur de chaleur intérieur – Chauffage d'appoint électrique possible
Accumulation	–	– CEA (charge par étapes) – Variante: chauffe-eau à accumu- lation avec échangeur de chaleur externe (charge par stratifica- tion)
Remarques	– Fonctionnement monovalent – Sans accumulateur d'énergie – Température retour régulée en fonction des conditions météoro- logiques ($\theta_{PAC,Hors}$) – élévation de température via le condenseur entre 5 et 10 K – Groupe de chauffage non régulé	– Préchauffage du chauffe-eau à accumulation à l'aide de la PAC; post-chauffage possible au moyen d'un corps de chauffe électrique – La production d'eau chaude doit s'effectuer la nuit.
Selon les [MoPEC], solution standard (SS) lors du rempla- cement d'un générateur de chaleur dans une habitation	SS 3: PAC à géothermie, à eau ou à air extérieur PAC électrique pour le chauffage et l'eau chaude pendant toute l'année SS 4: PAC à géothermie, à eau ou à air extérieur PAC à gaz pour le chauffage et l'eau chaude pendant toute l'année. Variante: fonctionnement bivalent avec au moins 50 % de la puissance requise et un rendement de 120 % au minimum.	

Figure 2.33 (en haut à gauche): Fonctionnement monovalent: PAC, sans accumulateur d'énergie, avec un groupe de chauffage.

Figure 2.34 (en bas à gauche): Exemple de fonction de régulation – tracé de la température en mode chauffage avec température retour en fonction des conditions météorologiques pour une PAC non régulée sur la puissance.

Éléments critiques:

- Aucun découplage hydraulique entre la PAC et le circuit d'émission de chaleur.
- Débit minimal à travers le condenseur.
- Les vannes thermostatiques peuvent être à l'origine de problèmes hydrauliques; si la part des vannes thermostatiques est supérieure à 40 %, un découplage hydraulique doit être intégré.
- Pompe de circulation avec au moins deux points de fonctionnement – un pour le mode chauffage et l'autre pour la charge de l'eau chaude; ou alors utilisation de deux pompes de circulation (une dans le circuit de charge du chauffe-eau à accumulation et l'autre dans le circuit d'émission de chaleur).



- Volume d'eau de chauffage nécessaire et masse thermique du bâtiment suffisamment importante.
- Impossibilité de dégivrer l'évaporateur avec de l'eau de chauffage.
- Abaissement de la température ambiante possible avec un circuit prioritaire du CEA .
- Défaillance de haute et de basse pression en raison de l'augmentation de la température d'entrée dans le condenseur à la fin de la charge du CEA, respectivement en cas de basculement rapide de la charge du CEA en mode chauffage.
- La température aller maximale des chauffages au sol ne doit pas être dépassée après la charge du CEA; prévoir un limiteur de température.

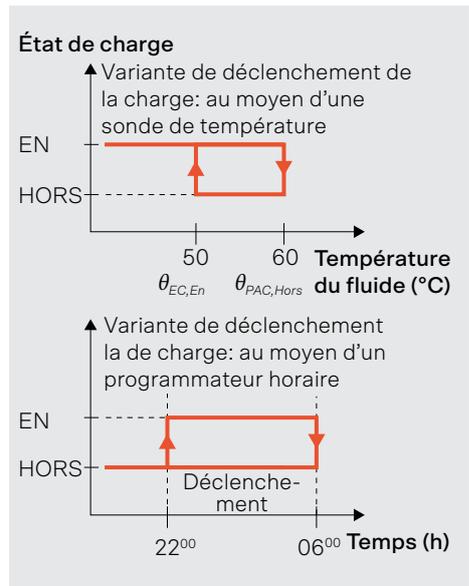
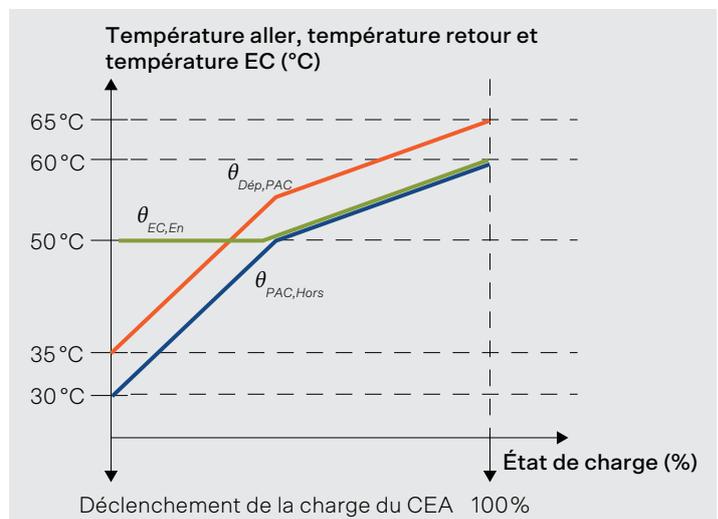


Figure 2.35 (en haut à droite): Exemple de fonction de régulation – déclenchement de la charge du chauffe-eau à accumulation (en fonction de la température ou de l'horaire)

Figure 2.36 (en bas à droite): Exemple de régulation – tracé de la charge du chauffe-eau à accumulation à différence de température constante et flux constant sur le condenseur.



- Le COP baisse lorsque les températures aller augmentent.
- Si la PAC ne permet pas d'atteindre la température exigée dans le CEA, un chauffage d'appoint doit être prévu.
- Interruption du système d'émission de chaleur pendant la charge du CEA.

Domaine d'utilisation: installations de petite taille pour maisons unifamiliales, maisons unifamiliales mitoyennes et maisons plurifamiliales de petite taille avec un seul groupe de chauffage

Exemple 2: pompe à chaleur avec accumulateur d'énergie

Mode chauffage: lorsque la température de l'accumulateur d'énergie ($\theta_{Em,En}$) descend en dessous de la valeur de consigne exigée, la pompe à chaleur et la pompe de circulation (P_{PAC}) se mettent en marche. La température de l'accumulateur d'énergie dépend de la température aller maximale ($\theta_{Dép,x}$) exigée par le groupe de chauffage (Em_x) qui peut dépendre de la température extérieure et de la courbe de chauffe définie – on parle alors de «régulation de la température aller en fonction des conditions météorologiques».

Au premier régime, la pompe de circulation (P_{PAC}) achemine l'eau de chauffage via la vanne à 3 voies (Inv) complètement ouverte (position de passage) dans l'accumulateur d'énergie (AE), jusqu'à ce que la température de celui-ci ($\theta_{Em,Hors}$) ait atteint la valeur de consigne.

Mode charge du chauffe-eau à accumulation: la charge du chauffe-eau à accumulation (CEA) devrait être conçue sous forme de circuit prioritaire. Dans ce cas, au besoin, la charge du chauffe-eau

Figure 2.37 (à gauche): Exemple de fonction de régulation: déclenchement de la charge du CEA au moyen d'un thermostat d'accumulateur.

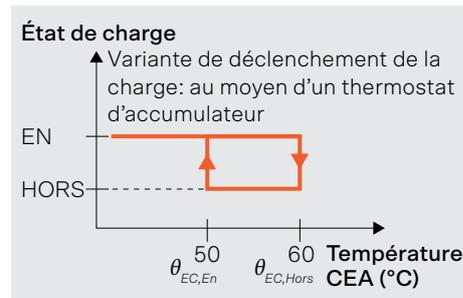
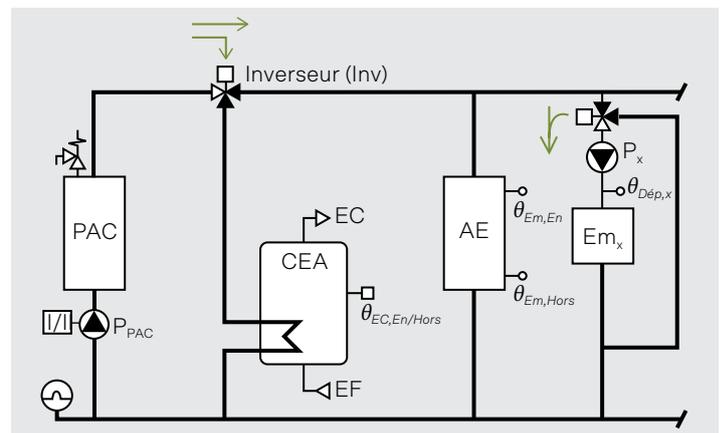


Figure 2.38 (en bas): Fonctionnement monovalent: PAC, accumulateur d'énergie (AE) et plusieurs circuits de chauffage (CC). Em_x : groupe de chauffage.



à accumulation ($\theta_{EC,En}$) interrompt le circuit d'émission de chaleur (position de la vanne à 3 voies: déviation). La PAC augmente la température au niveau nécessaire jusqu'à ce que la température exigée de l'eau chaude au droit du thermostat ($\theta_{EC,Hors}$) soit atteinte.

Eléments critiques:

- Débit minimal à travers le condenseur.
- Pompe de circulation (P_{PAC}) avec au moins 2 points de fonctionnement: un point de fonctionnement pour le mode chauffage et l'autre pour la charge de l'eau chaude, ou alors utilisation de deux pompes de circulation (une dans le circuit de charge du chauffe-eau à accumulation et l'autre dans le circuit de chauffage).
- Veiller à la capacité d'accumulation du bâtiment dans le cas d'un circuit prioritaire du CEA et d'un abaissement durant la nuit.
- Abaissement de la température ambiante possible avec un circuit prioritaire du CEA.

- La charge du CEA s'effectue par étapes, ce qui prend du temps.
- Si la PAC ne permet pas d'atteindre la température exigée dans le CEA, un chauffage d'appoint doit être prévu.
- Le COP baisse lorsque les températures aller augmentent.
- Défaillance de haute pression par l'augmentation de la température d'entrée dans le condenseur à la fin de la charge du CEA.

Domaine d'utilisation:

- Maisons unifamiliales et maisons plurifamiliales de petite taille (pour les installations de petite taille, il est possible d'alterner le mode pour la charge de l'eau chaude et celui pour l'émission de chaleur)
- Immeubles d'habitation d'une certaine taille, bâtiments commerciaux et industriels (faire fonctionner simultanément la charge de l'eau chaude et l'émission de chaleur)

	Chauffage	Production d'eau chaude
Sources	Chaleur environnementale/ rejets thermiques et courant électrique/gaz naturel	-
Transformation	Pompe à chaleur	- Echangeur de chaleur intérieur - Chauffage d'appoint électrique possible
Accumulation	Accumulateur d'énergie (accumulateur technique, accumulateur thermique, découplage hydraulique)	- CEA (charge par étapes) - Variante: AEC avec échangeur de chaleur externe (charge par stratification)
Remarques	- Fonctionnement monovalent - L'accumulateur d'énergie peut prendre en charge le système d'émission de chaleur pendant la charge du CEA - Régulation de la température aller du circuit primaire et du groupe de chauffage en fonction des conditions météorologiques (Em_x)	- Préchauffage du chauffe-eau à accumulation à l'aide de la PAC; post-chauffage possible au moyen d'un corps de chauffe électrique - Commande en/hors au moyen d'un thermostat ou d'un capteur en/hors
Selon les [MoPEC], solution standard (SS) lors du remplacement d'un générateur de chaleur dans une habitation	SS 3: PAC à géothermie, à eau ou à air extérieur PAC électrique pour le chauffage et l'eau chaude pendant toute l'année SS 4: PAC à géothermie, à eau ou à air extérieur PAC à gaz pour le chauffage et l'eau chaude pendant toute l'année. Variante: fonctionnement bivalent avec au moins 50% de la puissance requise et un rendement de 120% au minimum.	

Tableau 2.4:
Spécifications relatives à l'exemple 2 avec pompe à chaleur.

Exemple 3: pompe à chaleur avec accumulateur combiné

Mode chauffage: lorsque la température dans le volume disponible «chauffage» descend en dessous de la température d'accumulation ($\theta_{Em,En}$), la pompe à chaleur et la pompe de circulation non régulée (P1) se mettent en marche. La partie inférieure de l'accumulateur combiné est chargée à la température exigée. Dans la variante avec deux circuits de charge séparés (figure 2.39), l'inverseur (Inv) à trois voies passe en position de passage droit.

Il est possible de réguler la valeur de consigne de la température de l'accumulateur d'énergie en fonction des conditions météorologiques. La température aller du générateur de chaleur correspond à la température aller maximale ($\theta_{Dép,x}$) des groupes de chauffage. L'accumulateur combiné est chargé jusqu'à ce que la sonde ($\theta_{Em,Hors}$) ait atteint la valeur de consigne.

Mode charge de la zone supérieure de l'accumulateur, avec deux circuits de charge:

dès que la charge de l'eau chaude s'active ($\theta_{EC,En}$), le générateur de chaleur et la pompe de circulation régulée (P2) démarrent. L'inverseur (Inv) à trois voies passe en position de dérivation. Le générateur de chaleur chauffe l'eau de chauffage à la température aller nécessaire ($\theta_{Dép,EC}$) afin d'atteindre la température d'eau chaude exigée (θ_{EC}). Le volume disponible «eau chaude» est chargé jusqu'à ce que la température de consigne ($\theta_{EC,Hors}$) soit atteinte. Le volume disponible «chauffage» n'est pas chargé pendant la charge de l'eau chaude. La pompe de circulation (P1) est déclenchée (figure 2.39).

Mode charge de la zone supérieure de l'accumulateur, avec un circuit de charge:

lorsque la température du volume disponible «eau chaude» descend en dessous de la température d'accumulation exigée ($\theta_{EC,En}$), le générateur de

Tableau 2.5: Spécifications relatives à l'exemple 3 avec pompe à chaleur.

	Chauffage	Production d'eau chaude
Sources	Chaleur environnementale/ rejets thermiques et courant électrique/gaz naturel	–
Transformation	Pompe à chaleur	– CEA intérieur – Chauffage électrique d'appoint possible
Accumulation	Accumulateur d'énergie (Accumulateur combiné)	CEA intérieur (Accumulateur combiné)
Remarques	– Fonctionnement monovalent – Accumulateur combiné avec tôle perforée dans le cas de deux cir- cuits de charge séparés – Prévoir une pompe régulée pour les accumulateurs combinés avec un circuit de charge – alternative- ment maintien de la température via la PAC au moyen d'une dériva- tion – Utilisation de l'énergie solaire dans l'accumulateur d'énergie possible	Charge du volume disponible «eau chaude»: la PAC doit augmenter la température jusqu'à la tempéra- ture aller requise pour atteindre la température EC souhaitée
Selon les [MoPEC], solution standard (SS) lors du rem- placement d'un générateur de chaleur dans une habita- tion	SS 3: PAC à géothermie, à eau ou à air extérieur PAC électrique pour le chauffage et l'eau chaude pendant toute l'année SS 4: PAC à géothermie, à eau ou à air extérieur PAC à gaz pour le chauffage et l'eau chaude pendant toute l'année. Variante: fonctionnement bivalent avec au moins 50 % de la puissance requise et un rendement de 120 % au minimum.	

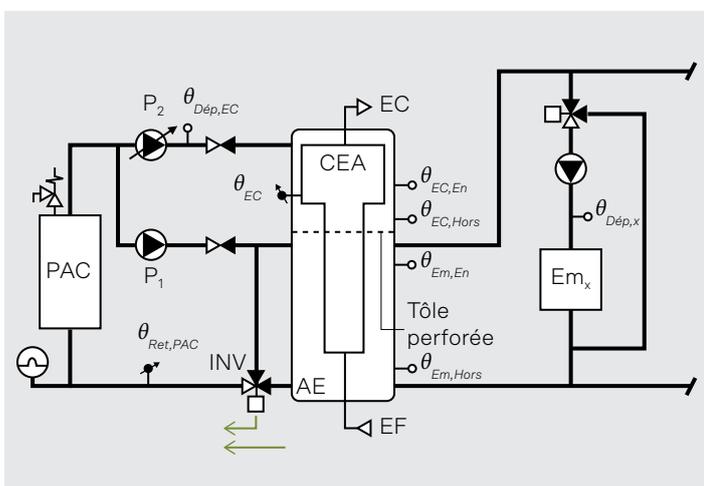
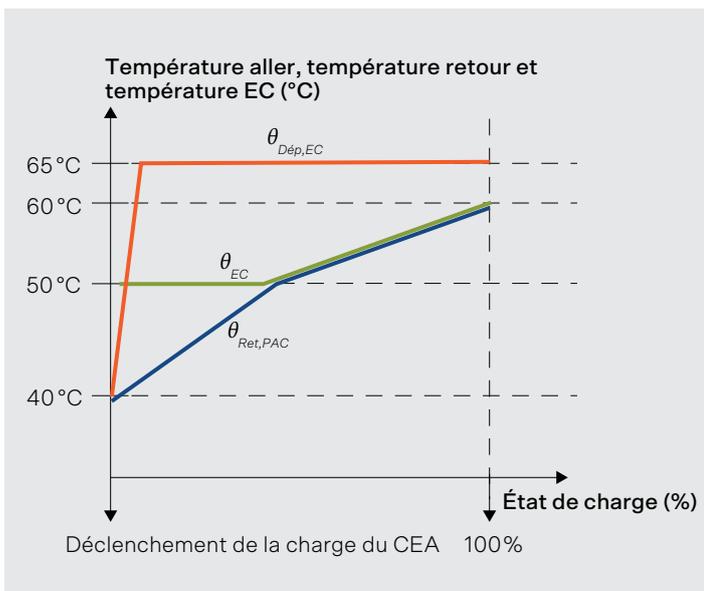
Figure 2.39: Exemple de fonction de régulation pour des installations selon la figure 2.40 – tracé de la charge dans la zone supérieure de l'accumulateur combiné.

chaleur et la pompe de circulation régulée (P1) passent au régime 2. L'eau de chauffage chauffée est réinjectée sans à-coups dans la zone du milieu de l'accumulateur combiné et se place, en raison de sa densité plus faible, dans la zone supérieure de l'accumulateur jusqu'à ce que la température d'accumulation ($\theta_{EC,Hors}$) ait atteint la valeur de consigne (figure 2.41).

Éléments critiques:

- Débit minimal à travers le condenseur; attention en cas d'une pompe de circulation à plusieurs régimes!
- Si la PAC ne permet pas d'atteindre la température d'eau chaude exigée, un chauffage d'appoint tel qu'un corps de chauffe électrique doit être prévu.

Figure 2.40: Fonctionnement monovalent: PAC et accumulateur combiné, chargé au moyen de deux circuits de charge par étapes séparées.

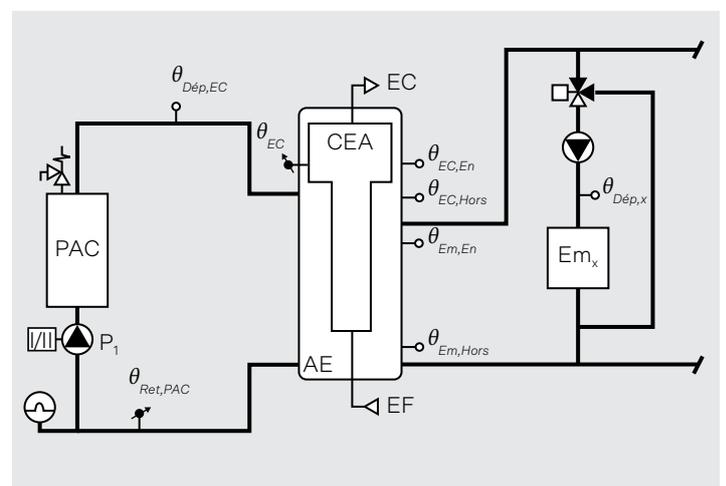


- Le COP baisse lorsque les températures aller augmentent.
- Deux pompes de circulation (fig. 2.39), pour le mode chauffage et la charge de l'eau chaude; alternativement une seule pompe à plusieurs régimes avec commutation au moyen d'un inverseur (Inv) à trois voies côté aller.
- Défaillance de haute pression par l'augmentation de la température d'entrée dans le condenseur à la fin de la charge du CEA.
- La PAC (figure 2.40) doit prendre en charge la différence de température entre l'aller et le retour.
- La charge du CEA (figure 2.41) s'effectue par étapes, ce qui prend du temps.

Domaine d'utilisation:

- Installations de petite taille pour maisons unifamiliales et pour maisons plurifamiliales de taille peu importante.
- Intégration facile d'une installation solaire thermique complémentaire.

Figure 2.41: Fonctionnement monovalent: PAC et accumulateur combiné chargé avec un circuit de charge par étapes séparées.



Exemple 4: PAC et chauffage d’appoint avec fonctionnement bivalent alternatif

Mode chauffage: la PAC couvre le besoin en chaleur jusqu’au point de bivalence. Si, en raison d’une baisse des températures extérieures, on passe en dessous du point de bivalence, la PAC s’arrête et le chauffage d’appoint, par exemple une chaudière à bois ou une chaudière à gaz à condensation, se met en marche. Le chauffage d’appoint couvre la puissance thermique requise; de cette manière, la PAC ne fonctionne que par temps doux. La régulation de la PAC se base sur la régulation de la température aller ($\theta_{Dép,PAC}$) en fonction des conditions météorologiques.

Après la commutation à une **chaudière à bois** (figure 2.42), la température aller ($\theta_{Dép,Chaud}$) est régulée, indépendamment des conditions extérieures, à une valeur constante, car la modulation de la puissance est limitée selon l’agent énergétique. L’accumulateur d’énergie (AE) est intégré hydrauliquement en aval des deux générateurs de chaleur.

Après la commutation à une **chaudière à gaz à condensation** (figure 2.43), la température aller ($\theta_{Dép,Chaud}$) reste régulée en fonction des conditions météorologiques, car ce type de générateur de chaleur module facilement la puissance. L’accumulateur d’énergie (AE) est intégré hydrauliquement en aval de la chaudière à gaz à condensation. La charge de l’accumulateur d’énergie continue jusqu’à ce que la température de consigne soit atteinte au droit de la sonde d’arrêt ($\theta_{Chaud,Hors}$). Pour que l’accumulateur d’énergie ne soit pas complètement chargé au moyen du gaz, la sonde d’arrêt doit être posée dans le tiers supérieur de l’accumulateur d’énergie.

Mode charge de l’accumulateur d’eau chaude:

il faut générer des températures aller élevées ($\theta_{Dép,EC}$) afin de charger l’accumulateur d’eau chaude (AEC). Si l’énergie d’évaporation de la PAC (au point de bivalence) est suffisante pour générer des températures aller élevées ($\theta_{Dép,PAC}$), le circuit de charge de l’eau chaude est assumé par la PAC. Il est

Tableau 2.6: Spécifications relatives à l’exemple 4 avec pompe à chaleur.

	Chauffage	Production d’eau chaude
Source	<ul style="list-style-type: none"> – Chaleur environnementale/rejets thermiques et courant électrique – Combustible solide (bois) – Combustible fossile (gaz naturel, mazout) 	–
Transformation	<ul style="list-style-type: none"> – Pompe à chaleur – Chaudière 	Echangeur de chaleur extérieur
Accumulation	Accumulateur d’énergie	AEC (charge par stratification)
Remarques	<ul style="list-style-type: none"> – Fonctionnement bivalent alternatif – Maintien de la température du retour en cas de chaudière à bois 	Circuit de charge de l’eau chaude avec circulateur régulé
Selon les [MoPEC], solution standard (SS) lors du remplacement d’un générateur de chaleur dans une habitation	<p>SS 2: Combustion de bois comme génération principale de chaleur Combustion de bois comme génération principale de chaleur et une part d’énergie renouvelable pour l’eau chaude. Production de l’eau chaude au moyen de la PAC ou du chauffage au bois pendant la période de chauffage.</p> <p>SS 10: générateur de chaleur à énergie renouvelable pour la charge de base et chaudière à combustible fossile en fonctionnement bivalent pour la charge de pointe La PAC pour la charge de base d’une puissance thermique d’au moins 25% environ de la puissance requise aux conditions de dimensionnement, complétée par un générateur de chaleur à combustible fossile en fonctionnement bivalent pour la charge de pointe et assigné toute l’année au chauffage et à l’eau chaude.</p>	

possible d'atteindre des températures aller élevées au moyen d'un circuit mélangeur (figure 2.42) ou encore au moyen d'un débit variable (figure 2.43) à travers la PAC. Lorsque l'on descend en dessous du point de bivalence, la PAC s'arrête et le chauffage d'appoint fournit la puissance thermique requise.

Si le fonctionnement d'une **chaudière à bois** génère des températures aller ($\theta_{D\acute{e}p, Chaud}$) supérieures à 65 °C, il faudrait réduire la température dans le circuit de charge de l'eau chaude au moyen d'un circuit mélangeur. Cela réduit le dépôt de calcaire au niveau de l'échangeur de chaleur EC. La température de l'eau chaude (θ_{EC}) est régulée au moyen du débit variable de la pompe (P_{EC}).

Avec une **chaudière à gaz à condensation** faisant office de chauffage d'appoint, l'inverseur à trois voies (Inv_2) se trouve en position de dérivation pendant la charge de l'eau chaude. Lors du fonctionnement de la PAC, l'inverseur à trois

voies (Inv_1) se trouve en position de passage. Lors de la commutation sur la chaudière à gaz à condensation, l'inverseur à trois voies (Inv_i) passe en position de dérivation. La température d'eau chaude (θ_{EC}) est régulée par la modulation de puissance de la chaudière à gaz à combustion.

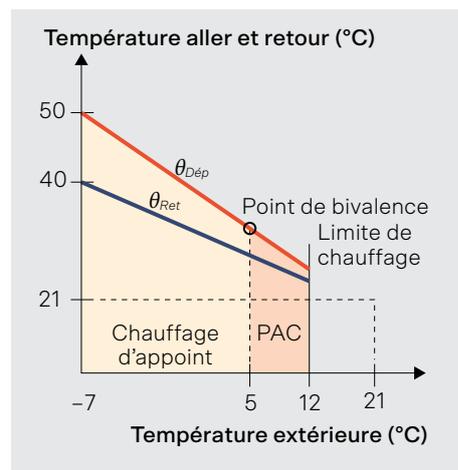


Figure 2.44: Exemple de fonction de régulation – fonctionnement bivalent alternatif en mode chauffage de la PAC ou du chauffage d'appoint selon les figures 2.42 et 2.43.

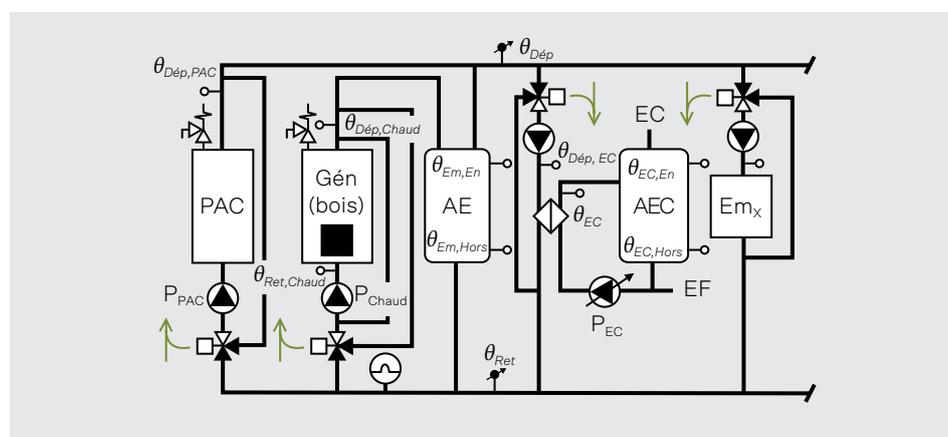


Figure 2.42: Pompe à chaleur, chaudière à bois et accumulateur d'énergie avec fonctionnement bivalent alternatif.

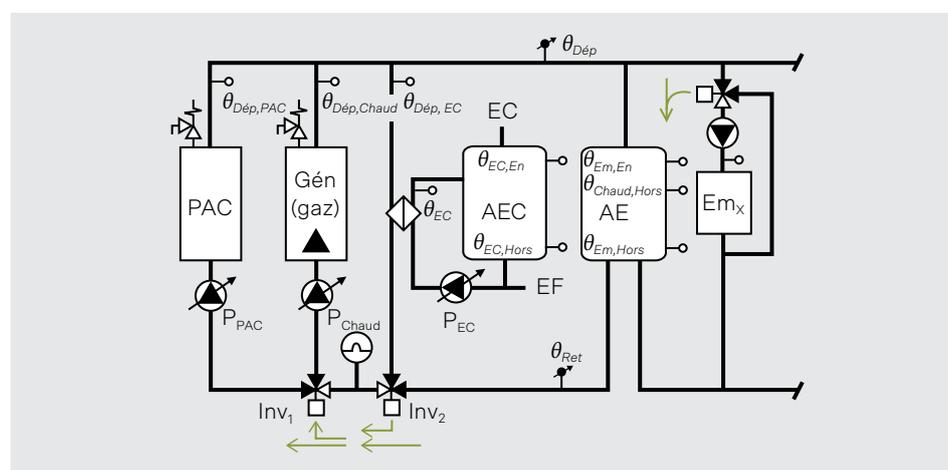
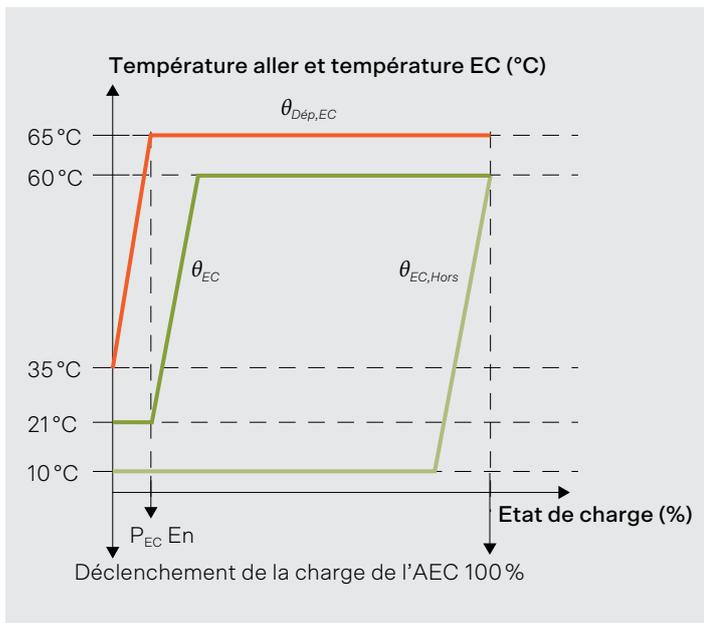


Figure 2.43: Pompe à chaleur, chaudière à gaz à condensation et accumulateur d'énergie avec fonctionnement bivalent alternatif.

Éléments critiques:

- Prise en compte de la température et de la puissance pour le point de commutation, respectivement pour le point de bivalence.
- La PAC doit fournir la puissance thermique requise jusqu'au point de bivalence.
- Dimensionnement du chauffage d'appoint en fonction du besoin maximal en chaleur.
- Les chaudières à bois sans condensation nécessitent un maintien de la température du retour, ce qui permet de basses températures retour sans condensation dans la chaudière.
- Le maintien de la température via la PAC péjore le COP; alternativement débit variable à travers la PAC (tenir compte du débit minimal à travers le condenseur).
- Pompe de circulation (P_{PAC}) avec au moins 2 points de fonctionnement: un point de fonctionnement pour le mode chauffage et l'autre pour la charge de l'eau chaude avec maintien de la température à travers la PAC ou alors recourir à une pompe de circulation régulée.
- Défaillance de haute pression par augmentation de la température d'entrée dans le condenseur à la fin de la charge du AEC.

Figure 2.45: Exemple de fonction de régulation – tracé de la charge de l'AEC lors du maintien de la température via la pompe à chaleur selon la figure 2.42.

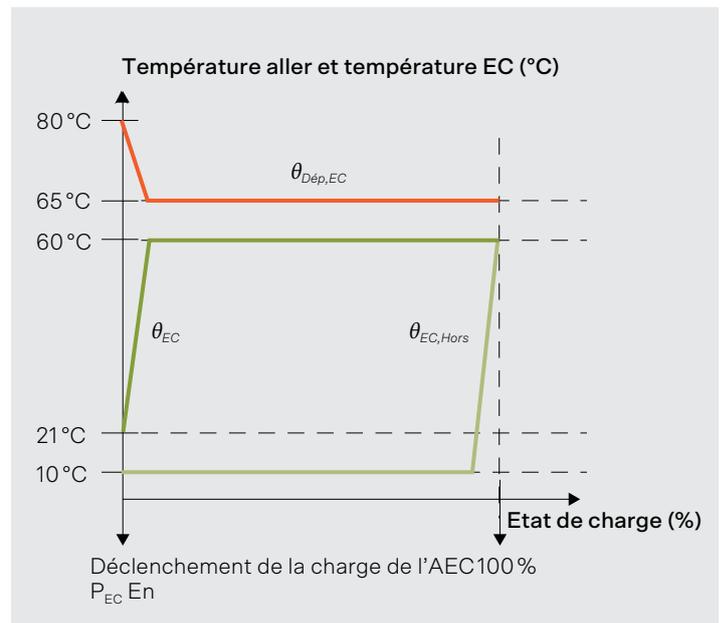


- Exploitation non optimale de l'accumulateur d'énergie lors du fonctionnement bivalent alternatif PAC – chaudière à bois.

Domaine d'application pour de tels systèmes:

- Maisons unifamiliales et plurifamiliales si on ne veut pas ou on ne peut pas remplacer un générateur de chaleur à combustible fossile.
- Installations importantes (bâtiments commerciaux et industriels).

Figure 2.46: Exemple de fonction de régulation – tracé de la charge du AEC avec régulation de la température aller via un échangeur de chaleur combiné à un circuit mélangeur selon la figure 2.42.



Exemple 5: PAC et chauffage d'appoint, avec fonctionnement bivalent parallèle, respectivement fonctionnement bivalent partiellement parallèle

Fonctionnement bivalent parallèle, mode chauffage: la PAC couvre le besoin en chaleur jusqu'au point de bivalence. Lorsqu'en présence de basses températures extérieures, on passe en dessous du point de bivalence, la PAC couvre le besoin en chaleur en commun avec le chauffage d'appoint. La PAC génère la température aller la plus élevée possible en dessous du point de bivalence, dans le cadre de ses capacités. Etant donné que la PAC et le chauffage d'appoint sont reliés en série, le chauffage d'appoint augmente la température de sortie de la PAC ($\theta_{Dép,PAC}$) jusqu'à la température aller requise ($\theta_{Dép,Em}$) (figure 2.47).

Fonctionnement bivalent partiellement parallèle, mode chauffage: avec une PAC air-eau, ce fonctionnement est judicieux. Dans ce cas, la PAC est complètement déclenchée en dessous d'une température extérieure donnée (point de commutation). Le chauffage d'appoint

couvre donc seul le besoin en chaleur. Cela permet de garantir un fonctionnement toujours efficace de la PAC. Entre le point de commutation et le point de bivalence, la PAC et le chauffage d'appoint fonctionnent simultanément et couvrent donc ensemble la puissance thermique requise (figure 2.48).

Mode charge de l'accumulateur d'eau chaude:

il faut générer des températures aller élevées ($\theta_{Dép}$) afin de charger l'accumulateur d'eau chaude (AEC). Si la PAC ne les atteint pas, le chauffage d'appoint la soutient. Avec un fonctionnement bivalent partiellement parallèle, la PAC est complètement déclenchée au point de commutation défini et le chauffage d'appoint fournit toute la puissance thermique requise.

Éléments critiques:

- Prise en compte de la température et de la puissance pour le point de commutation, respectivement pour le point de bivalence.
- La PAC doit couvrir toute la puissance thermique requise jusqu'au point de bivalence.

Tableau 2.7: Spécifications relatives à l'exemple 5 avec pompe à chaleur.

	Chauffage	Production d'eau chaude
Sources	<ul style="list-style-type: none"> – Chaleur environnementale/rejets thermiques et courant électrique – Combustible fossile (gaz naturel, mazout) 	–
Transformation	<ul style="list-style-type: none"> – Pompe à chaleur – Chaudière 	Echangeur de chaleur extérieur
Accumulation	Accumulateur d'énergie	AEC (charge par stratification)
Remarques	<ul style="list-style-type: none"> – Fonctionnement bivalent partiellement parallèle en cas de PAC air-eau – Fonctionnement bivalent parallèle en cas de PAC utilisant d'autres sources d'énergie – Mauvaise utilisation de la chaleur de condensation avec des générateurs de chaleur montés en série 	Circuit de charge de l'eau chaude avec circulateur régulé
Selon les [MoPEC], solution standard (SS) lors du remplacement d'un générateur de chaleur dans une habitation	<p>SS 10: générateur de chaleur à énergie renouvelable pour la charge de base et chaudière bivalente à combustible fossile pour la charge de pointe</p> <p>La PAC pour la charge de base d'une puissance thermique d'au moins 25 % environ de la puissance requise aux conditions de dimensionnement, complétée par un générateur bivalent de chaleur à combustibles fossiles pour la charge de pointe et assigné toute l'année au chauffage et à l'eau chaude</p>	

Figure 2.47: Pompe à chaleur, chaudière à gaz à condensation et accumulateur d'énergie en fonctionnement bivalent parallèle.

Figure 2.48: Pompe à chaleur, chaudière à gaz à condensation et accumulateur d'énergie en fonctionnement bivalent partiellement parallèle (p.ex. avec une PAC air-eau).

- Dimensionnement du chauffage d'appoint en fonction du besoin maximal en chaleur en cas de fonctionnement bivalent partiellement parallèle.
- Les chaudières à condensation requièrent de basses températures retour. Il est impossible de les garantir pour les générateurs de chaleur montés en série.
- Le maintien de la température au moyen de la PAC péjore le COP - alternativement, débit variable à travers la PAC (tenir compte du débit minimal à travers le condenseur).
- Avec un maintien de la température via la PAC; pompe de circulation (P_{PAC}) avec au moins 2 points de fonctionnement (pour le mode chauffage et le mode charge de l'eau chaude), ou alors, recourir à une pompe de circulation réglée.

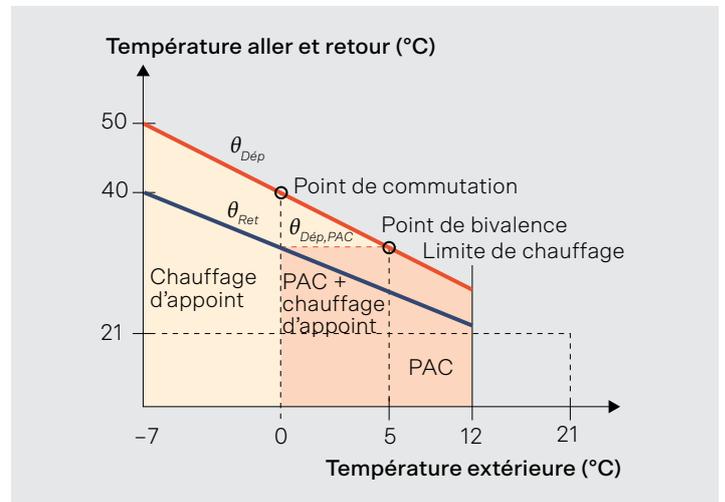
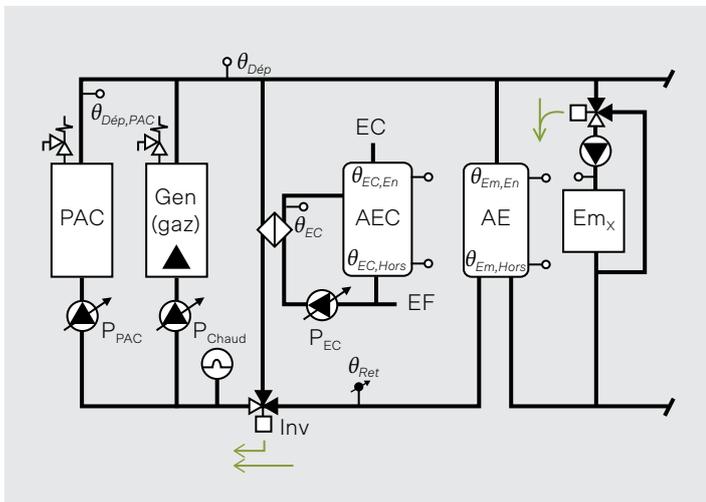
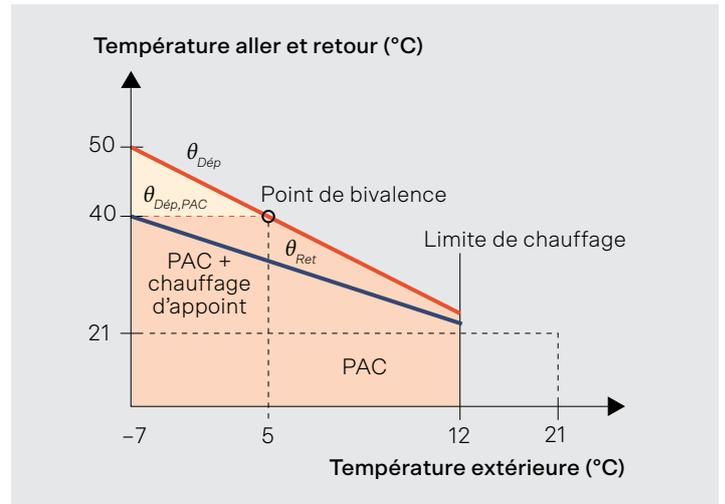
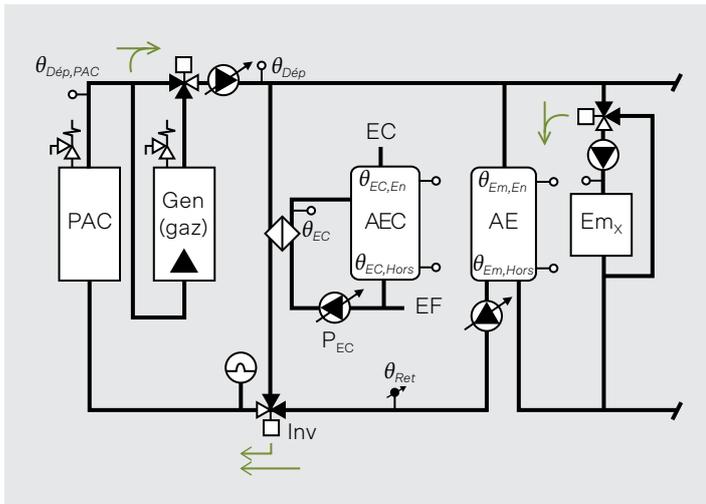
- Défaillance de haute pression par augmentation de la température d'entrée dans le condenseur à la fin de la charge de l'AEC.

Domaine d'application pour de tels systèmes:

- Maisons unifamiliales et plurifamiliales si on ne veut pas ou on ne peut pas remplacer un générateur de chaleur à combustible fossile.
- Installations importantes (bâtiments commerciaux et industriels).

Figure 2.49: Exemple de fonction de régulation: fonctionnement bivalent parallèle en mode chauffage - PAC et chauffage auxiliaire selon figure 2.47.

Figure 2.50: Exemple de fonction de régulation - fonctionnement bivalent partiellement parallèle en mode chauffage: PAC et chauffage auxiliaire selon figure 2.48.



2.5 Chauffages au bois

Se chauffer au bois est quasiment neutre en CO_2 , car la combustion du bois libère la même quantité de dioxyde de carbone (CO_2) que celle que les arbres ont prélevée de l'atmosphère tout au long de leur croissance. Le bois est un combustible solide et biogène, c'est-à-dire obtenu à partir de la biomasse. Le bois fait par conséquent partie des sources énergétiques renouvelables. Selon [Energie-bois Suisse], on évite, pour chaque kg de mazout remplacé par du bois, une émission de CO_2 de 3 kg environ polluant l'atmosphère. [SuisseEnergie] met à disposition le document Aide au dimensionnement, chauffages au bois. [QM Chauffages au bois] fournit un procédé pour assurer une conception, une planification et une réalisation de qualité des installations de chauffage au bois, y compris des réseaux de chauffage. Après contrôle, [Energie-bois Suisse] et [SuisseEnergie] attribuent des certificats et des labels de qualité pour les chauffages au bois qui respectent le niveau de qualité le plus élevé selon les normes européennes pour combustibles solides.

Types de combustible

Le bois en bûches est un combustible qui reste très prisé. Toute personne optant pour le bois en bûche dispose de suffisamment d'espace pour stocker le

combustible et entretient généralement un lien étroit avec la forêt et le bois. Les poêles pour bûches doivent être alimentés manuellement. Le bois en bûches est disponible auprès des exploitations forestières locales, des agriculteurs et sur les marchés, sous forme de rondins et de bois fendu d'une longueur de 100 cm, 50 cm, 33 cm ou 25 cm. Le bois en bûches doit être sec, ce qui implique un stockage pendant une durée d'une à deux années dans un endroit sec.

Depuis des années, **les copeaux de bois** (ou plaquettes de bois) sont utilisés avec succès dans des chauffages automatiques pour chauffer de grands bâtiments et de grandes exploitations industrielles, ainsi que pour exploiter des réseaux de chauffage de proximité. La qualité des copeaux utilisés est déterminante pour assurer un fonctionnement pauvre en émissions et engendrant peu de travaux de maintien. Grâce aux avancées techniques considérables, les chauffages aux plaquettes sont désormais également disponibles pour des objets avec une faible puissance thermique requise. Les plus petites chaudières fournissent des puissances thermiques réglables à partir de 5 kW.

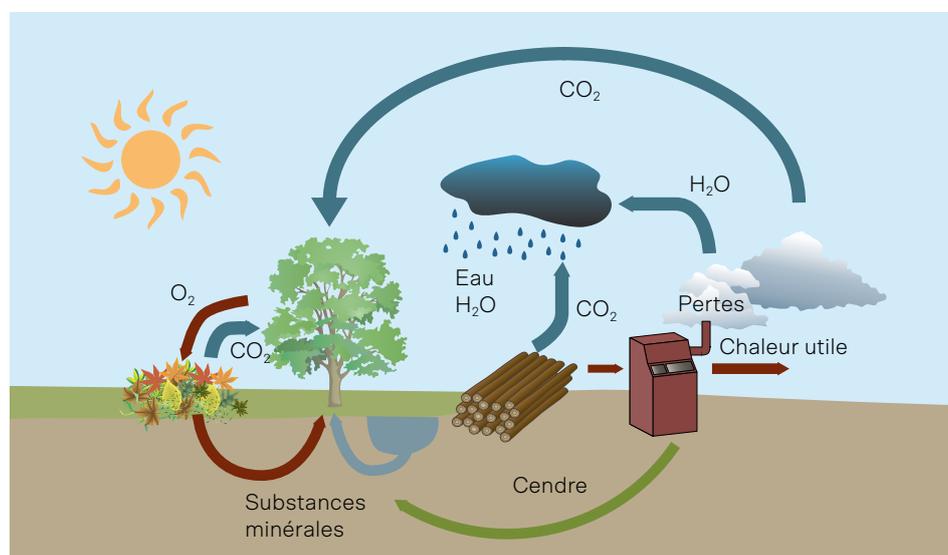


Figure 2.51: Cycle de la biomasse.



Figure 2.52: Bois en bûches. (Photo: Energie-bois Suisse)



Figure 2.53: Copeaux de bois (plaquettes de bois). (Photo: Energie-bois Suisse)



Figure 2.54: Pellets (granulés de bois). (Photo: Energie-bois Suisse)



Figure 2.55: Briquettes de bois. (Photo: Energie-bois Suisse)

Les pellets de bois se composent de sciure sèche et de copeaux, comprimés à haute pression en granulés de forme cylindrique d'une longueur comprise entre 5 et 45 mm. La sciure et les copeaux proviennent de l'industrie de transformation du bois. Dans les chauffages à pellets fonctionnant de façon entièrement automatique, ce combustible permet d'obtenir une combustion très efficace et uniforme grâce à son homogénéité, ne produisant ainsi que peu de cendres.

Selon le type de bois, la densité des pellets est 1,5 à 2 fois plus élevée que celle du bois en bûches. Par ailleurs, 2 kg de pellets remplacent 1 litre de mazout – leur stockage prend donc environ la moitié de la place nécessaire pour le stockage par rapport au bois en bûche. A l'inverse d'autres centrales de chauffage automatiques au bois, les chaudières à pellets sont disponibles déjà à partir d'une puissance réglable de 3 kW. Elles sont ainsi particulièrement appropriées à une utilisation dans des maisons familiales avec un faible besoin en énergie.

Les briquettes de bois se composent de restes de bois sec non traité, tels que des copeaux et de la sciure, comprimés à haute pression en briquettes dures. Elles sont disponibles sous différentes formes et tailles. Selon le matériau de départ, leur comportement de combustion peut varier. Ainsi, les unes brûleront à la façon d'une bûche, tandis que les autres auront davantage tendance à former des braises plutôt qu'une flamme. Le bois sous forme de briquette présente en général à peu près le même comportement de combustion que le lignite, ceci en raison de la densification importante qu'il subit lors de la fabrication. A la différence du lignite, les briquettes de bois produisent peu de suie, de cendre et de soufre lors de leur combustion. Elles sont donc plus écologiques et plus propres. En outre, leur bilan CO₂ reste quasiment équilibré, vu que les briquettes sont fa-

briquées à partir d'une matière première renouvelable.

Les briquettes présentent certains avantages par rapport au bois de chauffage classique. A volume égal, elles possèdent par exemple un pouvoir calorifique beaucoup plus élevé. En d'autres termes, le client a besoin de beaucoup moins de place pour le stockage. En fonction de la qualité de la briquette, 1 tonne de briquettes de bois (quantité de livraison classique) remplace environ 3 à 5 mètres cubes de bois de hêtre sec. Avec cela, l'encombrement d'une tonne de briquettes de bois n'est que d'environ 1,5 mètre cube.

Systèmes de chauffage au bois

Les systèmes de chauffage au bois libèrent l'énergie contenue dans le combustible en trois phases:

1. Dans la **phase de séchage**, l'eau contenue dans le bois s'évapore à des températures pouvant atteindre jusqu'à 150 °C.
2. Pendant la **phase de décomposition thermique** (pyrolyse), les composés gazeux présents dans le bois sont libérés. Le dégazage s'effectue à des températures comprises entre 150 et 600 °C. Après cette phase, le résidu est du charbon de bois.
3. La **phase de combustion** se produit avec l'ajout d'air (oxygène) et à une température de 400 à 1300 °C; le charbon de bois et les gaz libérés brûlent.

Intégration hydraulique

L'accumulateur d'énergie permet d'éviter un fonctionnement intermittent de l'installation lorsque la charge thermique est faible. Selon la technique de la chaudière, ce point est à prendre en compte. Pour les chaudières à bois sans modulation, un accumulateur d'énergie est primordial, car un fonctionnement intermittent entraîne une combustion incomplète et génère ainsi des émissions plus élevées. Pour les chaudières avec modulation, il est possible de dis-

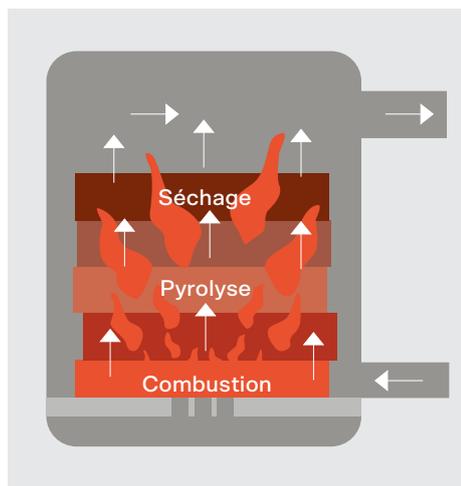


Figure 2.56: Phases de la combustion du bois dans un système de chauffage au bois.

Tableau 2.8: Chauffage d'habitation au bois dans un bâtiment Minergie selon [Minergie Bois].

Fonction	Chauffage central		Chauffage d'appoint		
	Sans échangeur de chaleur fonctionnant avec de l'eau	Avec échangeur de chaleur fonctionnant avec de l'eau	Pour la couverture des pointes	Chauffage secondaire	Foyer d'ambiance
Le générateur de chaleur couvre:	Besoin total en chaleur	Besoin total en chaleur et production d'eau chaude	En partie le besoin les jours froids, en plus du générateur de chaleur principal	Besoin en cas de panne ou pendant l'entre-saison	En général, aucune fonction de chauffage, sert à créer de l'ambiance
Combustible Bûches	Poêle à accumulation avec et sans satellite	Poêle avec échangeur de chaleur fonctionnant avec de l'eau	Poêle à accumulation, cheminée à accumulation		Poêle-cheminée, Cheminée (fermée)
Combustible pellets	Chauffage à pellets	Chauffage à pellets avec échangeur de chaleur fonctionnant avec de l'eau	Chauffage à pellets		
Utilisation appropriée	Particulièrement approprié aux bâtiments Minergie-P, selon les cas également aux bâtiments Minergie et Minergie-A		Tous les bâtiments Minergie en combinaison avec une pompe à chaleur (ou des chauffages fossiles en cas de rénovation)		

tribuer la chaleur sans recourir à un accumulateur d'énergie. Il faudrait alors séparer hydrauliquement le circuit de production de chaleur du circuit des consommateurs de chaleur, ceci au moyen d'une déviation. Mais l'hydraulique et la régulation sont nettement plus exigeantes pour de telles solutions. Si le débit dans le circuit de chaudière et la marge de manœuvre en termes de température sont faibles, il n'est en aucun cas envisageable de renoncer à un accumulateur d'énergie.

Indications de planification pour les chaudières à bûches:

- Facilité d'utilisation: on différencie entre les chaudières standard et les chaudières confort. Les chaudières confort fonctionnent en principe avec un seul chargement par jour. Cette caractéristique a pour effet de doubler la capacité de la chambre de remplissage de la chaudière en comparaison de la chaudière standard, qui est à deux chargements par jour.
- Taille de l'accumulateur: la plus petite puissance thermique respectant les prescriptions relatives aux émissions est déterminante pour le volume requis de l'accumulateur. Le volume d'accumulation minimum peut être défini conformément à la norme [SN EN 303-5].

Indications de planification pour chaudières à copeaux de bois:

- Adaptées pour les installations importantes: les plus petites installations ont une puissance de la chaudière de 5 kW environ.
- Puissance de la chaudière: la puissance de la chaudière nécessaire est égale à la puissance du générateur de chaleur $\Phi_{gen,out}$ selon la norme [SIA 384/1].
- Chaudière modulante: régulation variable de la puissance dans une plage comprise entre 30 et 100 % de la puissance nominale.
- Accumulateur de chaleur: pour les chauffages modulants à copeaux de bois, un accumulateur de chaleur n'est

pas impératif pour une exploitation optimale.

- Stockage du combustible: les copeaux de bois sont à conserver au sec. La résistance au feu des parois, des portes et du plafond du local de stockage doit respecter les prescriptions de protection incendie de l'[AEA]. Les mesures de sécurité pour le local de stockage sont à déterminer au moyen des listes de contrôle de la [Suva]. Le volume du local est à déterminer selon la norme [SIA 384/1].
- Qualité du combustible: elle est à prendre en compte lors du dimensionnement de la puissance de la chaudière.

Indications de planification pour les chaudières à pellets:

- Champ d'application: il est possible de recourir aux chauffages à pellets à partir d'une puissance nominale de la chaudière de 3 kW environ – elle est donc également appropriée pour les bâtiments de petite taille tels que les maisons unifamiliales.
- Puissance de la chaudière: la puissance de la chaudière nécessaire est égale à la puissance du générateur de chaleur $\Phi_{gen,out}$ selon la norme [SIA 384/1].
- Chaudières modulantes: régulation variable de la puissance dans une plage comprise entre 30 et 100 % de la puissance nominale.
- Accumulateur de chaleur: pour les chauffages modulants à pellets, un accumulateur de chaleur n'est pas impératif pour une exploitation optimale.
- Stockage du combustible: les pellets sont à conserver au sec. La résistance au feu des parois, des portes et du plafond du local de stockage doivent respecter les prescriptions de protection incendie de l'[AEA]. Les mesures de sécurité pour le local de stockage sont à déterminer au moyen des listes de contrôle de la [Suva]. Le volume du local est à déterminer selon la norme [SIA 384/1]. La ventilation naturelle ou mécanique du local de stockage est à dimensionner selon la directive [SICC HE200-01]. L'accès des camions-citernes doit être

garanti. Le local de stockage devrait être situé contre un mur extérieur près de la zone d'accès, ce qui permet une faible longueur du tuyau de remplissage; la longueur maximale du tuyau de remplissage s'élève à 30 m. La chaufferie est à placer à côté du local de stockage. Une vis de transport automatique alimente la chaudière en pellets; des systèmes de transport pneumatiques permettent néanmoins de surmonter jusqu'à 20 m.

- Qualité du combustible: il est important de recourir à des produits certifiés. Le label de qualité ENplus assure que la totalité de la chaîne logistique depuis la fabrication jusqu'à la livraison s'effectue conformément à un programme de certification normé.

2.6 Chauffages au bois – exemple pratique

Chauffages au bois avec ou sans accumulateur d'énergie

Mode chauffage pour les chaudières avec déviation:

si la puissance thermique requise baisse, il est possible de baisser également la puissance à fournir par le générateur de chaleur (figure 2.57). Une chaudière à bois modulante est alors indispensable. La déviation déconnecte hydrauliquement le circuit du générateur de chaleur du circuit des consommateurs de chaleur. Au moyen du maintien de la température du retour et de la vanne de régulation à 3 voies, la température d'entrée dans la chaudière est réglée à une valeur de consigne prédéfinie. En outre, la température de sortie de la chaudière ($\theta_{Dép,Chaud}$) peut être contrôlée par le régulateur de puissance de la chaudière pour être maintenue à une valeur de consigne prédéfinie. Pour une chaudière à bois modulante, il faut prévoir une pompe régulée (P_{Chaud}) si la différence de température entre l'entrée ($\theta_{Ret,Chaud}$) et la sortie de la chaudière ($\theta_{Dép,Chaud}$) est constante. Les groupes de chauffage peuvent être réglés via une courbe de chauffe prédéfinie.

Mode chauffage pour les chaudières avec accumulateur d'énergie:

des sondes de température disposées à l'intérieur de l'accumulateur d'énergie (AE) permettent de déterminer son état de charge (figure 2.59). Lorsque la température près de la sonde marche ($\theta_{CC,En}$) descend en dessous d'une valeur prédéfinie, la chaudière à bois se met en marche. L'apport de chaleur dans l'AE peut s'effectuer à une puissance constante de la chaudière. En revanche, avec une chaudière à bois modulante, la puissance de la chaudière peut être réglée par plusieurs sondes de température. La chaudière à bois régule la puissance en fonction de l'état de charge de l'AE.

Pour les chaudières à bois non modulantes, une pompe non régulée (P_{Chaud}) est à prévoir. Néanmoins, si la puissance est régulée et la différence de température entre l'entrée ($\theta_{Ret,Chaud}$) et la sortie de la chaudière ($\theta_{Dép,Chaud}$) est maintenue constante, la pompe (P_{Chaud}) doit fonctionner de manière régulée. Les groupes de chauffage peuvent être réglés via une courbe de chauffe prédéfinie.

Mode charge de l'accumulateur d'eau chaude:

si la température de l'accumulateur d'eau chaude (AEC) passe en dessous de la température de consigne

Tableau 2.9: Spécifications relatives au chauffage au bois pour l'exemple concret.

	Chauffage	Production d'eau chaude
Source	Combustible solide (bois)	–
Transformation	Chaudière	Echangeur de chaleur extérieur
Accumulation	– Déviation (figure 2.57) – Accumulateur d'énergie (figure 2.58)	AEC (charge par stratification)
Remarques	– Fonctionnement monovalent – Déconnexion hydraulique entre le circuit du générateur de chaleur et le circuit des consommateurs de chaleur (déviation ou accumulateur d'énergie) – Maintien de la température du retour en cas de chaudière à bois – Utilisation de l'énergie solaire recommandée en complément	Circuit de charge de l'eau chaude avec circulateur régulé
Selon les [MoPEC], solution standard (SS lors du remplacement d'un générateur de chaleur dans une habitation)	SS 2: Combustion de bois comme génération principale de chaleur Combustion de bois comme génération principale de chaleur et une part d'énergie renouvelable pour l'eau chaude. Production de l'eau chaude au moyen de la PAC ou du chauffage au bois pendant la période de chauffage.	

($\theta_{EC,En}$), le circuit de charge de l'eau chaude se met en marche. La puissance nécessaire pour la production d'eau chaude est prélevée de l'accumulateur d'énergie (AE) ou fournie directement par la chaudière à bois. La charge dure jusqu'à ce que la température de consigne soit atteinte à la sonde arrêt ($\theta_{EC,Hors}$).

Figure 2.57: Exemple de fonction de régulation – tracé des températures de la chaudière à bois en mode chauffage.

Figure 2.58: Chaudière à bois avec déviation, sans accumulateur d'énergie, avec maintien de la température du retour.

Éléments critiques:

- Pour les chaudières à bois sans condensation, formation de condensat dans la chaudière.
- Un maintien de la température du retour de chaudière de 60°C au minimum est à prévoir.
- Une certaine durée de démarrage, jusqu'à ce que le processus de combustion fournisse la puissance nécessaire,

respectivement la température aller requise.

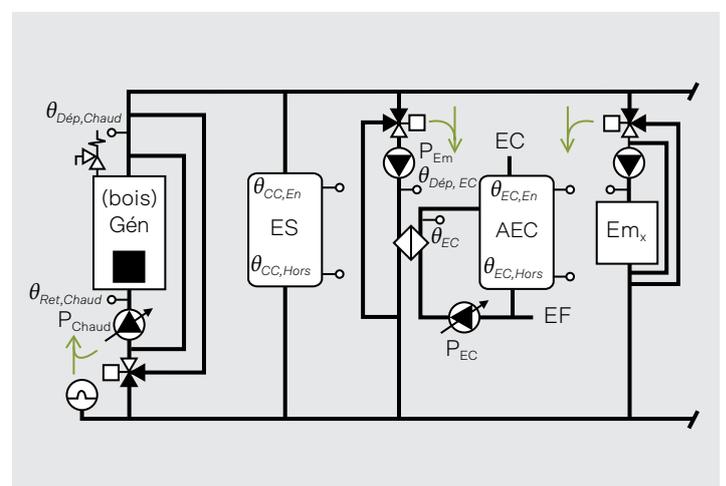
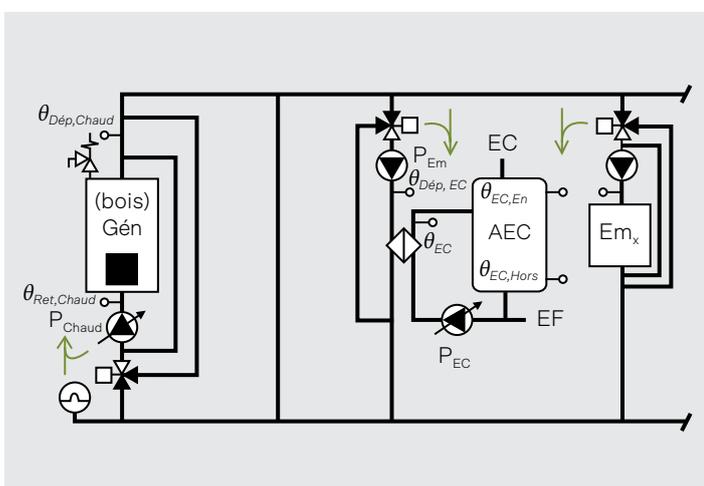
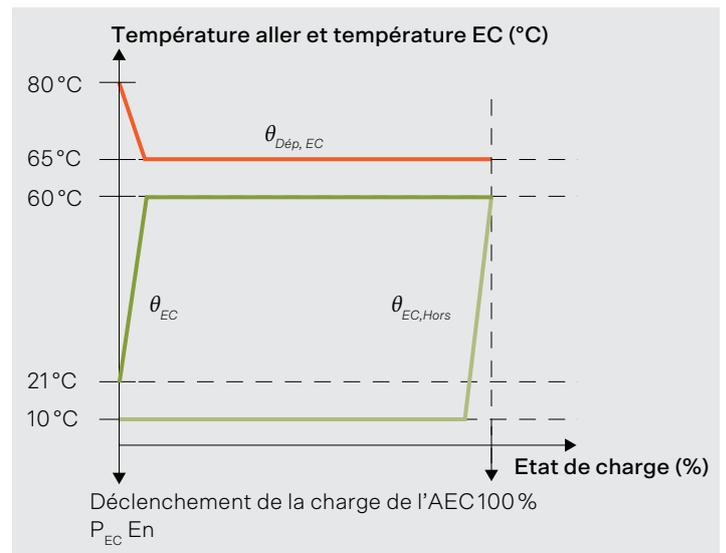
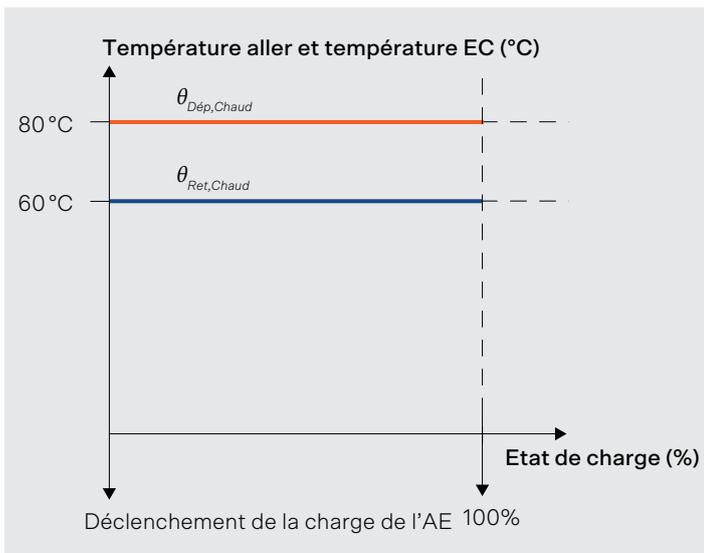
- Evacuation de l'énergie excédentaire de la chaudière qui est générée par la combustion; prévoir un accumulateur d'énergie.
- Couverture des charges de pointe lors des journées peu froides de l'année; prévoir des installations bivalentes ou un accumulateur d'énergie.
- Fonctionnement intermittent du générateur de chaleur; prévoir un accumulateur d'énergie ou une chaudière à bois modulante.

Domaine d'utilisation:

- Maisons familiales et plurifamiliales, lotissements (réseaux de chauffage).
- Bâtiments commerciaux et industriels.
- Fonctionnement bivalent.

Figure 2.59: Exemple de fonction de régulation – tracé de la charge de l'AEC avec régulation de la température aller via un échangeur de chaleur mélangeur côté primaire.

Figure 2.60: Chaudière à bois avec accumulateur d'énergie, avec maintien de la température du retour.



2.7 Réseaux thermiques

Dans les [Explications sur les réseaux thermiques], ceux-ci sont définis de la manière suivante: «Un réseau thermique, désigné habituellement par «chauffage à distance», est utilisé pour transmettre de l'énergie thermique au moyen d'un fluide pour une utilisation directe ou indirecte. En raison de la séparation spatiale entre le fournisseur et le consommateur, un transport est nécessaire, ce qui entraîne généralement une perte d'énergie thermique. La séparation spatiale est définie lorsque les [emplacements EGID] de la source/du puits de chaleur et d'au moins un consommateur de chaleur sont diffé-

rents». Ces réseaux fonctionnent comme un immense chauffage central approvisionnant en chaleur quartiers, communes, voire régions entières à partir d'une ou de plusieurs sources de chaleur majeures.

Voici les sources de chaleur à retenir: ordures ménagères, rejets de chaleur de centrales thermiques et de processus industriels, copeaux de bois, stations d'épuration, géothermie et chaleur environnementale. Les réseaux thermiques sont subdivisés en fonction du niveau de température de la conduite chaude (tableau 2.10).

Figure 2.61: Classification des réseaux thermiques en fonction de la température de la conduite chaude selon les [Explications sur les réseaux thermiques].

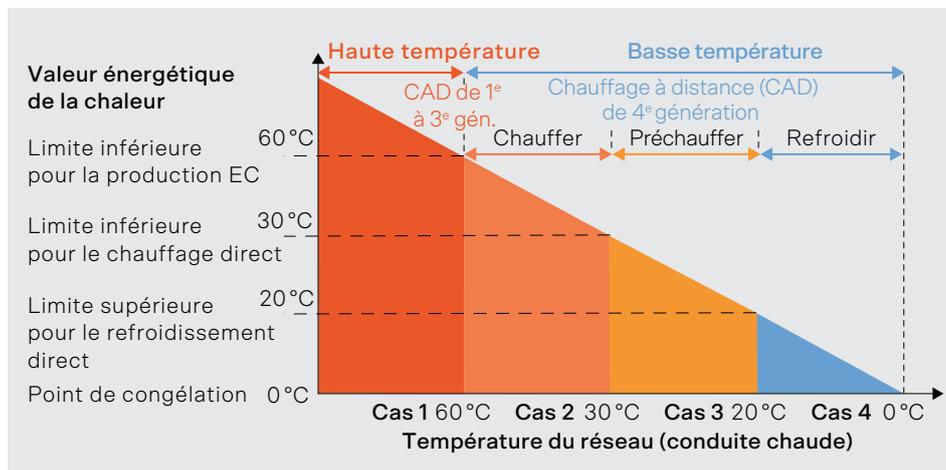


Tableau 2.10: Caractérisation des quatre cas de réseaux thermiques selon les [Explications sur les réseaux thermiques].

Réseaux thermiques				
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Temp. de la conduite chaude	≥ 60°C	60 jusqu'à 30°C incl.	30 jusqu'à 20°C	20 jusqu'à 0°C
Dénomination	Haute température (HT)	Basse température (BT)		
		Chauffer	Préchauffer	Refroidir
Critère déterminant	Limite pour la production EC: 60°C env.	Limite pour le chauffage direct: 30°C env.	Limite pour le refroidissement direct: 20°C env.	Point de congélation de l'eau: 0°C
Potentiel thermique du réseau	Chauffage et EC, directe	Chauffage direct, préchauffage EC	Chauffage et préchauffage de l'EC, UCP du refroidissement	Source de chaleur pour le chauffage et l'EC, refroidissement direct
Energie requise dans le bâtiment	Refroidissement et refroidissement de retour	Refroidissement et refroidissement de retour, réchauffage de l'EC	Refroidissement, réchauffage pour le chauffage, réchauffage de l'EC	Chauffage et production EC
Installations techniques nécessaires dans le bâtiment	Machine frigorifique (MF) et refroidisseur de retour, év. utilisation de la chaleur perdue (UCP) de la machine frigorifique pour le préchauffage de l'EC	MF et refroidisseur de retour, év. UCP de la MF pour l'EC et/ou injection dans le réseau thermique, réchauffage de l'EC, p. ex. par PAC	MF, UCP de la MF pour le chauffage, l'EC, et/ou injection dans le réseau thermique, chauffage et réchauffage de l'EC, p. ex. par PAC	Chauffage et production EC, p. ex. par PAC, év. MF pour les températures plus basses, UCP pour le chauffage, l'EC et/ou injection dans le réseau therm.

2.8 Réseaux thermiques – exemples pratiques

Exemple 1: réseau thermique avec raccordement direct

Mode chauffage: le groupe de chauffage est directement raccordé au réseau thermique. La régulation de la température aller en fonction des conditions météorologiques s'effectue au moyen d'un circuit d'injection. Selon le fournisseur d'énergie, la température retour maximale admise est limitée par un limiteur de température retour.

Mode charge de l'accumulateur d'eau chaude: des températures aller constantes et élevées sont exigées pendant la charge de l'eau chaude. Si le réseau thermique est exploité avec des températures aller élevées ($\theta_{D\acute{e}p,EC} > 65^\circ\text{C}$), il faudrait les réduire à 65°C au maximum. Cela permet de réduire le dépôt de calcaire au niveau de l'échangeur de chaleur. La température aller peut être régulée au moyen d'un circuit d'injection avec vanne de réglage de passage.

Si la température de l'eau froide augmente pendant la charge, la température retour augmentera également. Il est possible d'éviter cela en réduisant le débit côté secondaire au moyen d'une pompe régulée (P_{EC}).

Éléments critiques:

- La charge simultanée du chauffage et de l'eau chaude implique une régulation

plus exigeante, coûte plus cher et demande une puissance de raccordement plus haute. Meilleure solution: circuit intermittent du chauffage et de l'eau chaude avec circuit de l'eau chaude prioritaire; points à prendre en compte dans ce cas: masse thermique du bâtiment, refroidissement des locaux.

- Les températures retour élevées peuvent impliquer une limitation de la température retour.

- Les bâtiments de grande hauteur (différence de hauteur géodésique) sont raccordés indirectement.

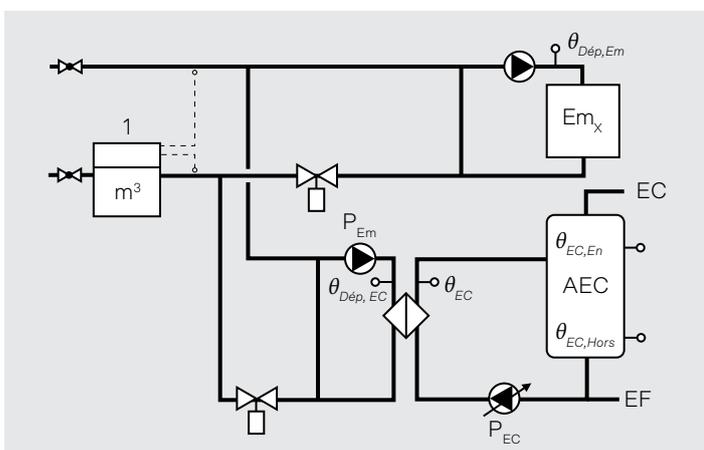
- Tenir compte de la pression du réseau et de la pression maximale admise dans l'installation de chauffage du bâtiment.

- Il est possible que la température retour monte en cas de températures variables d'eau froide pendant le processus de charge de l'eau chaude ou encore en cas de production d'eau chaude avec échangeur de chaleur intégré (charge par étapes).

Tableau 2.11: Spécifications relatives à l'exemple 1 – réseau thermique avec raccordement direct.

	Chauffage	Production d'eau chaude
Source	Réseau thermique	–
Transformation	<ul style="list-style-type: none"> – Raccordement direct – Sans échangeur de chaleur – Raccordement indirect – Avec échangeur de chaleur 	Echangeur de chaleur extérieur
Accumulation	–	AEC (charge par stratification)
Remarques	<ul style="list-style-type: none"> – Le fournisseur d'énergie exige de basses températures retour – Limiteur de température retour possible, si la température retour maximale admise est dépassée 	Circuit de charge de l'eau chaude avec pompe de circulation non régulée
Selon les [MoPEC], solution standard (SS) lors du remplacement d'un générateur de chaleur dans une habitation	SS 5: raccordement au CAD Raccordement à un réseau thermique fournissant de la chaleur issue d'une UIOM, d'une STEP ou d'énergies renouvelables. La chaleur doit alimenter (totalement ou en partie) le chauffage et l'eau chaude.	

Figure 2.62: Raccordement direct à un réseau thermique pour le chauffage et l'eau chaude. 1: compteur de chaleur



Domaine d'application pour de tels systèmes:

- Maisons unifamiliales et maisons unifamiliales mitoyennes (bâtiments de faible hauteur)

Exemple 2: réseaux thermiques avec raccordement indirect

Mode chauffage: un raccordement indirect à un réseau thermique signifie que le circuit du générateur de chaleur (côté primaire) et le circuit des consommateurs de chaleur (côté secondaire) sont hydrauliquement déconnectés par un échangeur de chaleur. Le côté primaire est relié hydrauliquement par un circuit d'étranglement. Il est possible d'atteindre de basses températures retour au moyen d'un circuit mélangeur côté secondaire. Les températures aller auprès des groupes de chauffage peuvent être régulées en fonction des conditions météorologiques.

Mode charge de l'accumulateur: afin de pouvoir atteindre les basses températures retour requises côté primaire, un échangeur de chaleur supplémentaire préchauffe l'eau en amont de la production d'eau chaude sanitaire proprement dite. Le deuxième échangeur de chaleur réchauffe l'eau à la température d'eau chaude sanitaire (θ_{EC}) requise.

Etant donnée que l'eau sanitaire préchauffée ($\theta_{EC,préch}$) peut avoir différentes températures, il faudrait réguler l'émission de chaleur côté primaire au moyen de la température de l'eau chaude (θ_{EC}).

Éléments critiques:

- La charge simultanée du chauffage et de l'eau chaude implique une régulation plus exigeante, coûte plus cher et demande une puissance de raccordement plus haute. Meilleure solution: circuit intermittent du chauffage et de l'eau chaude avec circuit de l'eau chaude prioritaire; points à prendre en compte dans ce cas: masse thermique du bâtiment, refroidissement des locaux.
- Les températures retour élevées peuvent impliquer une limitation de la température retour.
- Raccordement de l'échangeur de chaleur côté secondaire pour les groupes de chauffage - avec de préférence une faible différence de pression.

Domaine d'application pour de tels systèmes:

- Maisons unifamiliales et plurifamiliales, lotissements
- Bâtiments commerciaux et industriels

Figure 2.63: Raccordement indirect à un réseau thermique pour le chauffage et l'eau chaude.
CAD: chauffage à distance
EF: eau froide
EC: eau chaude
Em: émission de chaleur (p. ex. chauffage au sol, radiateurs)
Circ = circulation

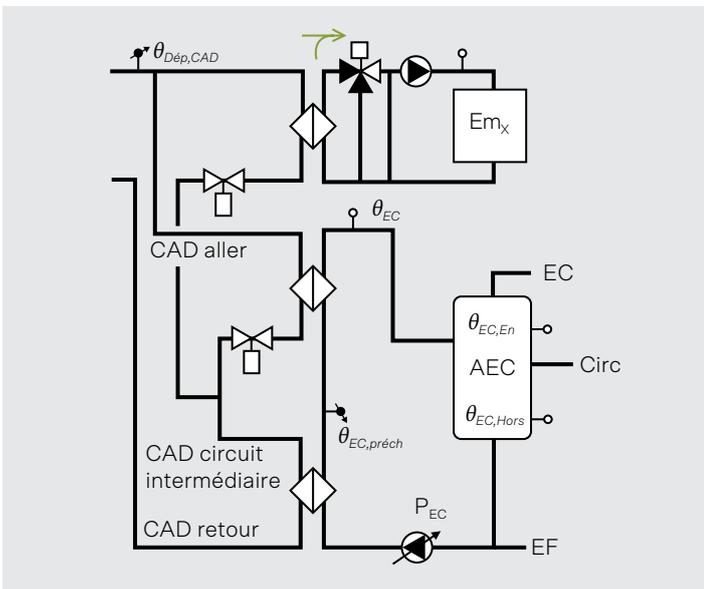
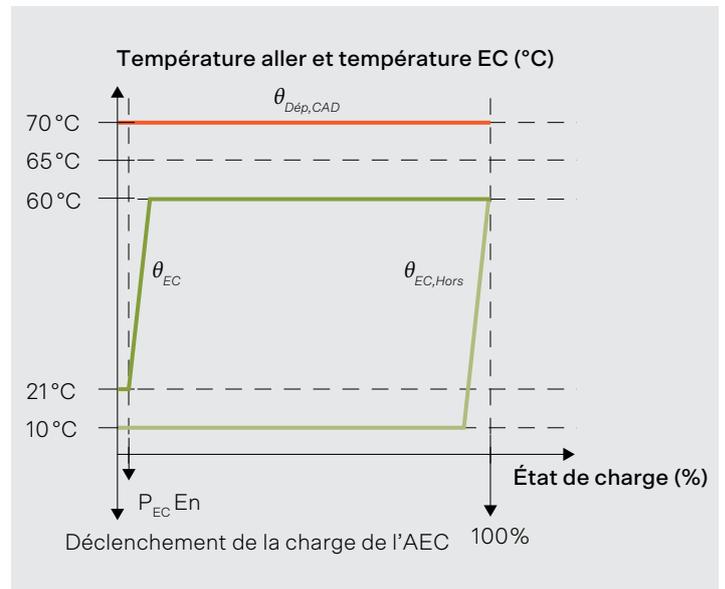


Figure 2.64: Exemple de fonction de régulation - tracé de la charge de l'AEC avec régulation de la température aller via un échangeur de chaleur avec un circuit d'étranglement du côté chauffage.



2.9 Couplage chaleur-force

Un couplage chaleur-force (CCF) produit de l'électricité en plus de la chaleur. Les deux types d'énergie les plus importants sont ainsi fournis au consommateur. La chaleur produite lors de la génération de courant électrique est ici intelligemment utilisée pour produire de l'eau de chauffage, de la vapeur ou de la chaleur de séchage. Le combustible est ainsi exploité à hauteur de 90 % à 95 %.

La plupart des installations CCF sont basées sur la production de chaleur. En d'autres termes, les installations CCF entrent en service dès qu'il y a une demande de chaleur.

Le micro-couplage chaleur-force (micro-CCF) désigne une catégorie d'installations CCF couvrant le segment de puissance le plus bas réalisable par cette technique. Il fournit environ 1 à 15 kW_{el} ainsi que 3 à 70 kW_{th}. Le mini-CCF correspond à la plage de 3 à 50 kW_{el}.

La question de savoir à quel point une installation CCF est durable ou écologique dépend de la source d'énergie utilisée. Etant donné que les sources citées ci-dessus sont considérées comme durables, la Confédération subventionne le recours à des CCF dans les installations de biogaz, les stations d'épuration et les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM).

Centrales de cogénération

Les installations CCF sont pour la plupart des centrales de cogénération (centrales CCF) constituées d'un moteur à combustion et d'un générateur. Le combustible le plus couramment utilisé est le gaz. La plage de puissance de cette technologie s'étend de 15 à 1000 kW_{el}. Une centrale CCF est une installation modulaire, exploitée de préférence sur le lieu même de la consommation de chaleur. Mais elle est capable également d'injecter de la chaleur utile dans un réseau thermique.

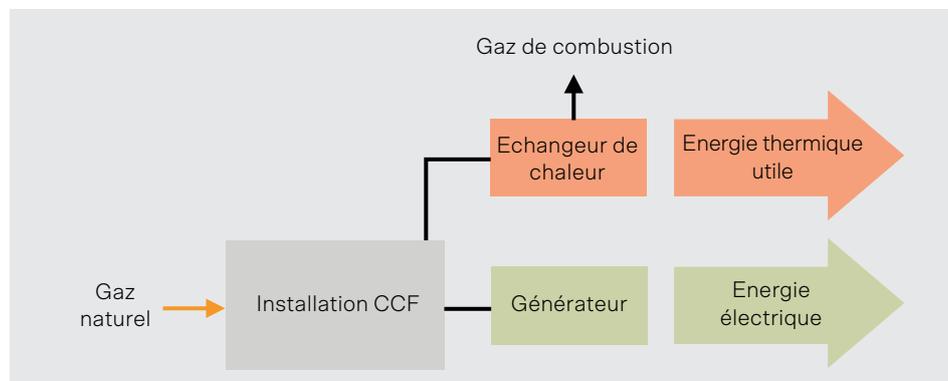


Figure 2.65: Energies produites à partir d'une installation couplage chaleur-force à gaz.



Figure 2.66: Exemple d'une centrale CCF. (Photo: Viessmann Werke)

2.10 Couplage chaleur-force – exemples pratiques

Exemple 1: centrale CCF et chaudière à combustible gazeux, fonctionnement bivalent parallèle

Mode chauffage: l'accumulateur d'énergie (AE) permet d'avoir de longues durées de fonctionnement de la centrale CCF. Si les températures aller ($\theta_{D\acute{e}p,CC}$) requises sont plus élevées que celles pouvant être fournies par la centrale CCF, un chauffage d'appoint est à prévoir. Avec un fonctionnement bivalent parallèle, les deux générateurs de chaleur fournissent la température aller requise ($\theta_{D\acute{e}p,CC}$) en commun. Le chauffage d'appoint couvre donc les pointes de puissance. Un maintien de la température du retour est à prévoir, si aucun condensat ne doit se produire dans la centrale CCF.

Mode charge de l'accumulateur d'eau chaude: le chauffage d'appoint soutient la centrale CCF lorsque la température aller ($\theta_{D\acute{e}p,CC}$) ne suffit pas pour la production de l'eau chaude sanitaire. La fourniture de puissance côté primaire

Tableau 2.12: Spécifications relatives à l'exemple 1, couplage chaleur-force (centrale CCF).

	Chauffage	Production d'EC
Source	<ul style="list-style-type: none"> Centrale CCF: combustible gazeux ou solide Générateur de chaleur: combustible gazeux 	-
Transformation	<ul style="list-style-type: none"> Couplage chaleur-force (CCF) Chaudière 	Echangeur de chaleur extérieur
Accumulation	Accumulateur d'énergie	AEC, charge par stratification
Remarques	Fonctionnement bivalent parallèle	Circuit de charge de l'eau chaude avec circulateur régulé
Selon les [MoPEC], solution standard (SS) lors du remplacement d'un générateur de chaleur dans une habitation	SS 6: couplage chaleur-force Rendement électrique minimal de 25 % et couverture minimale de 60 % des besoins de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude. Il est admis de recourir à des systèmes à combustibles fossiles pour l'installation CCF ainsi que pour la couverture des pointes.	

est régulée au moyen d'un circuit d'étranglement et d'une pompe régulée ($P_{EC,1}$). Il est possible de prévoir une pompe non régulée ($P_{EC,2}$) dans le circuit de charge de l'eau chaude. Si la température d'eau chaude est atteinte au droit de la sonde d'arrêt ($\theta_{EC,Hors}$), les circuits de charge primaire et secondaire de l'eau chaude s'arrêtent.

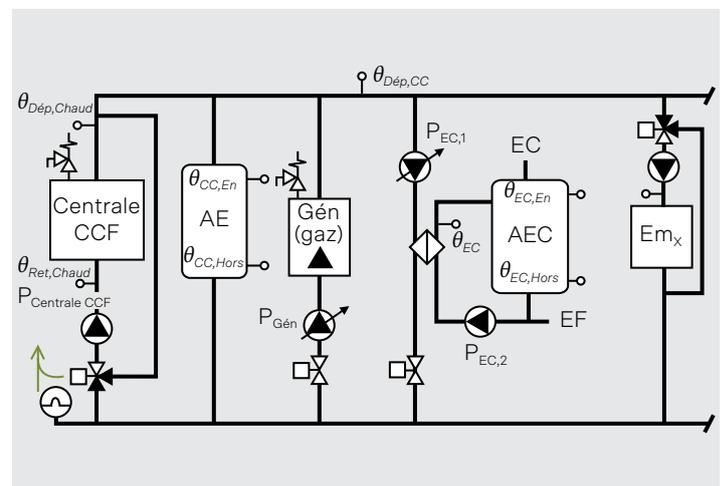
Éléments critiques:

- De basses températures retour ne sont pas souhaitables en cas de centrales CCF sans condensation; prévoir un maintien de la température du retour.
- Pour les chaudières à gaz à condensation, de basses températures retour sont favorables.
- De longues durées de fonctionnement de la centrale CCF sont favorables; prévoir un accumulateur d'énergie.
- Gestion de la charge de l'accumulateur d'énergie.
- Chaudière à gaz à condensation modulante; prévoir une pompe de circulation régulée $P_{G\acute{e}n}$.

Domaine d'application pour de tels systèmes:

- Maisons unifamiliales et maisons unifamiliales mitoyennes (bâtiment de petite taille) avec micro-CCF.
- Maisons plurifamiliales et bâtiments commerciaux avec mini-CCF.
- Grands immeubles d'habitation, bâtiments industriels, réseaux de chauffage avec centrale CCF.

Figure 2.67: Centrale CCF et chaudière à gaz à condensation, fonctionnement bivalent parallèle.



Exemple 2: centrale CCF et PAC avec chauffe-eau instantané, fonctionnement bivalent parallèle

Mode charge de l'accumulateur d'énergie: il est possible de subdiviser l'accumulateur d'énergie (AE) en deux zones d'accumulation ayant des températures différentes et de les charger séparément. La zone supérieure de l'AE alimente le chauffe-eau instantané. La zone inférieure de l'AE stocke l'énergie pour les groupes de chauffage ayant des températures aller plus basses que celles nécessaires pour la production d'eau chaude.

Lors de la **charge pour l'eau chaude** (zone supérieure de l'AE), la sonde de température supérieure de l'AE ($\theta_{EC,En}$) réagit. La PAC et la centrale CCF se mettent alors en marche. La PAC chauffe l'eau de retour à la température aller la plus élevée qu'elle est en mesure de fournir. La centrale CCF chauffe l'eau de chauffage, préalablement préchauffée, à la température de consigne ($\theta_{EC,Hors}$) et l'injecte dans la zone supérieure de l'AE. L'eau de chauffage coule sans à-coups dans l'AE jusqu'à ce que la sonde arrêt pour l'eau chaude ($\theta_{EC,Hors}$) réagisse.

Tableau 2.13: Spécifications relatives à l'exemple 2, couplage chaleur-force (centrale CCF).

	Chauffage	Production d'EC
Source	<ul style="list-style-type: none"> Combustible gazeux ou solide (centrale CCF) Chaleur environnementale/rejets thermiques et courant électrique 	-
Transformation	<ul style="list-style-type: none"> CCF Pompe à chaleur 	Echangeur de chaleur ext.
Accumulation	<ul style="list-style-type: none"> Accumulateur d'énergie Accumulateur combiné possible 	-
Remarques	Fonctionnement bivalent partiellement parallèle	Chauffe-eau instantané: pas de stockage ECS
Selon les [MoPEC], solution standard (SS) lors du remplacement d'un générateur de chaleur dans une habitation	<p>SS 6: couplage chaleur-force Rendement électrique minimal de 25% et couverture minimale de 60% des besoins de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude. Il est admis de recourir à des systèmes à combustibles fossiles pour l'installation CCF ainsi que pour la couverture des pointes.</p>	

Lors de la **charge en mode chauffage** (zone inférieure de l'AE), la sonde de température supérieure de l'AE ($\theta_{Em,En}$) réagit. La PAC se met alors en marche. Elle chauffe l'eau de retour à la température aller max. requise pour les groupes de chauffage. L'eau de chauffage coule sans à-coups dans l'AE jusqu'à ce que la sonde arrêt pour le chauffage ($\theta_{Em,Hors}$) réagisse. Si la température extérieure passe sous le point de bivalence, la centrale CCF est également enclenchée.

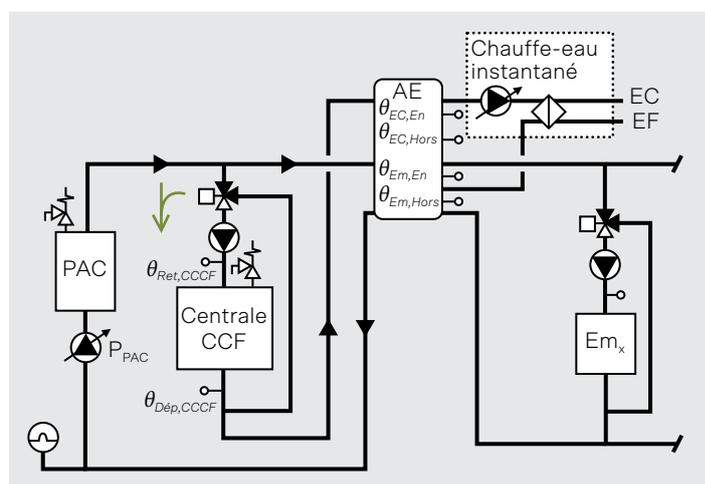
Eléments critiques:

- De basses températures retour ne sont pas souhaitables en cas de centrales CCF sans condensation; prévoir un maintien de la température du retour.
- Pour les PAC, de basses températures de fonctionnement sont souhaitées, elles accroissent leur efficacité.
- De longues durées de fonctionnement de la centrale CCF sont favorables; charger tout l'AE en mode parallèle.
- Gestion de la charge de l'accumulateur d'énergie.
- Flux entrant sans à-coups dans l'AE, choisir une vitesse d'entrée < 0,1 m/s.
- Besoin en puissance élevé pour le chauffe-eau instantané.
- Intégration hydraul. de la centrale CCF.

Domaine d'application pour de tels systèmes:

- Maisons plurifamiliales.
- Bâtiments ayant un besoin élevé en eau chaude (p. ex. installat. sportives).

Figure 2.68: Centrale CCF et PAC, fonctionnement bivalent partiellement parallèle, avec chauffe-eau instantané.



2.11 Installations solaires thermiques

Les installations solaires thermiques utilisent l'énergie solaire pour couvrir ou aider à couvrir les besoins domestiques en eau chaude et en chauffage. Le principal composant est le capteur solaire. Les absorbeurs constituent la pièce maîtresse du capteur solaire. Il s'agit de surfaces métalliques noires chauffées par le rayonnement solaire. Les absorbeurs sont traversés par de petits tubes dans lesquels circule un fluide caloporteur. Il s'échauffe et transmet ensuite la chaleur au système d'eau chaude et/ou de chauffage du bâtiment via un échangeur de chaleur. La chaleur solaire est disponible pour les utilisateurs, par exemple, au point de prélèvement de l'eau chaude, au système d'émission de la chaleur (radiateurs, chauffage au sol) ou dans une piscine. Lorsque les nuages font de l'ombre aux capteurs, la chaleur apportée par le soleil ne suffit souvent pas à couvrir les besoins immédiats en puissance thermique d'un bâtiment. Une autre source de chaleur, le chauffage d'appoint, prend alors en charge le chauffage du contenu de l'accumulateur.

Rayonnement solaire à la surface de la Terre

Les rayons du soleil sont des ondes électromagnétiques. Leur teneur éner-

gétique diminue après leur entrée dans l'atmosphère terrestre, par réflexion et absorption sur des composants de l'air (p. ex. vapeur d'eau, ozone). Ainsi, la puissance totale du rayonnement solaire au niveau de l'enveloppe extérieure de l'atmosphère terrestre est d'environ 1355 kW/m^2 – cette puissance est appelée constante solaire. À la surface de la Terre, il en reste au maximum environ 1000 W/m^2 . Ce rayonnement, appelé rayonnement global, se compose:

- du rayonnement direct: la lumière du soleil qui, par ciel dégagé, atteint directement le sol terrestre et
- du rayonnement indirect: le rayonnement diffus; la lumière solaire qui atteint le sol après avoir été dispersée (déviée) par des nuages.

Capteurs plans

Les capteurs plans représentent le type de capteurs le plus répandu. Ils peuvent être posés sur des châssis ou installés sur des toitures par-dessus la couverture (capteurs apposés), ou encore être intégrés dans la toiture ou dans la façade de la maison (capteurs intégrés). Les capteurs non vitrés font également partie des capteurs plans. Ils sont utilisés dans la plage de température inférieure, par exemple pour chauffer l'eau de piscines en plein air. Lors du choix de capteurs plans, il convient de tenir compte des détails techniques suivants:

Figure 2.69: Composants d'une installation solaire thermique.

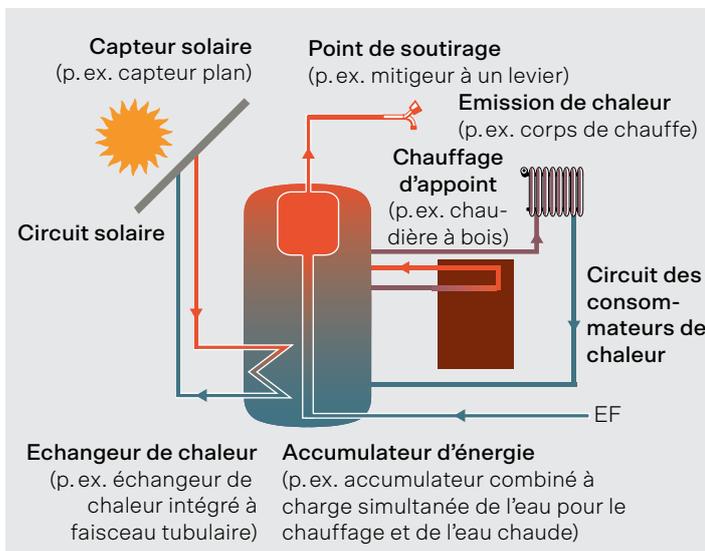
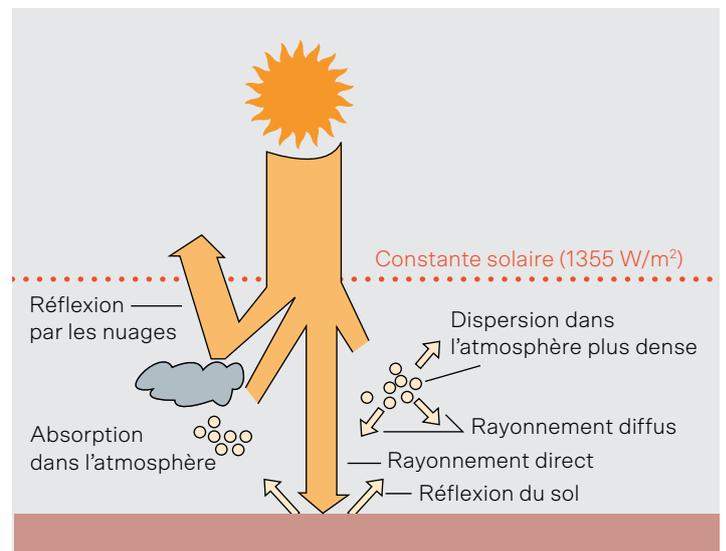


Figure 2.70: Notions autour du rayonnement solaire.



- Certification: l'Institut de technique solaire (SPF) de l'OST (Ostschweizer Fachhochschule) teste les capteurs solaires sur le plan du rendement et d'autres critères. Les résultats sont publiés sur www.solarenergy.ch.
- Revêtement de l'absorbeur: l'absorbeur doit être noir ou être pourvu d'un revêtement spécial agissant de façon sélective (revêtement d'absorbeur sélectif).
- Capteur de grande surface: celui-ci présente des avantages par rapport à une solution comportant plusieurs modules séparés.
- Isolation: le capteur doit être bien isolé contre les déperditions thermiques, à l'aide d'un isolant minéral.

Capteurs à tubes sous vide

Le vide possède des propriétés d'isolation thermique particulièrement bonnes. C'est pourquoi les capteurs à tubes sous vide présentent des déperditions thermiques nettement inférieures à celles des capteurs plans. D'autres avantages sont les absorbeurs rotatifs, qui restent performants même si le capteur est mal orienté. Les capteurs à tubes sous vide sont des capteurs particulièrement puissants, utilisés pour mettre à disposition de la chaleur de process dans une plage comprise entre 100 et 150 °C.

Indications de planification pour les installations solaires thermiques

- Première évaluation: à l'aide du [calculateur solaire], il est possible d'estimer le potentiel de production de chaleur sur site, voire les coûts globaux et la durée d'amortissement. Le [Programme Bâtiments] informe au sujet des subventions auxquelles a droit le maître d'ouvrage, entre autres.

- Conventions définies avec les utilisateurs: si la décision est prise de réaliser une installation solaire thermique après la première évaluation, les données de l'installation qui sont contraignantes pour la planification sont à consigner par écrit. Il s'agit entre autres de l'emplacement des capteurs, des contraintes spatiales générales, du degré de couverture

Figure 2.71: Capteur plan.

Figure 2.72: Capteur à tubes sous vide.

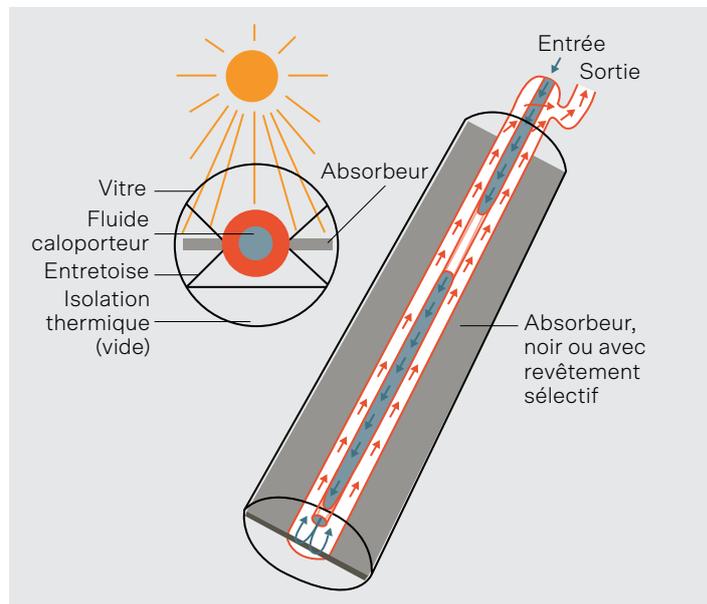
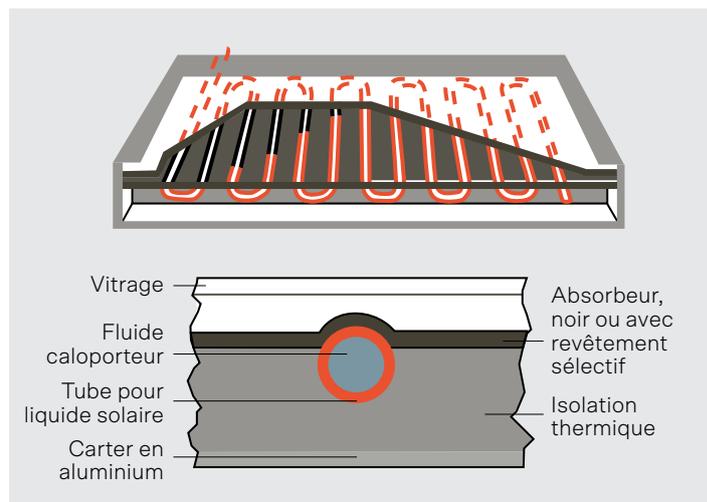


Tableau 2.14:
Domaine d'utilisation
des capteurs plans
et à tubes sous vide.

Types de capteurs	Domaine d'utilisation	Application typique
Capteurs plans non vitrés en matière synthétique	20 à 40 °C	Production d'eau chaude pour piscines, préchauffage de l'eau chaude sanitaire, régénération de sondes géothermiques
Capteurs plans vitrés avec revêtement spectralement sélectif	30 à 100 °C	Production d'eau chaude sanitaire et chauffage des locaux
Capteurs à tubes sous vide avec absorbeur métallique	50 à 150 °C	Production d'eau chaude sanitaire, chauffage des locaux et chaleur de process

solaire, des délais de livraison des capteurs, des applications de l'énergie solaire, des besoins en chaleur et en eau chaude, des limites d'investissement, des contraintes des installations techniques conventionnelles.

- Obligation d'autorisation ou de déclaration: il convient de vérifier auprès de l'autorité compétente en matière de construction si l'installation solaire thermique doit faire l'objet d'une autorisation ou seulement d'une déclaration.
- Dépose des demandes de subventions possibles.
- Place suffisante à prévoir pour les capteurs, l'accumulateur et les conduites.
- Demande et comparaison de différentes offres de capteurs ou d'installations solaires thermiques entières: il vaut la peine de comparer plusieurs offres en ce qui concerne les marques, les systèmes, la qualité, la quantité, les prix, les remises, la rentabilité, la puissance, les délais, l'organisation, etc.
- Estimation correcte du besoin en eau chaude: pour le dimensionnement des installations de production d'eau chaude, il convient d'établir des profils de besoins. Les valeurs de consommation standard suivantes sont admises: maisons unifamiliales, 40 litres d'eau chaude à 60 °C par personne et par jour contre 35 litres pour les maisons plurifamiliales.
- Orientation des capteurs plans pour la production d'eau chaude: l'angle

- d'inclinaison devrait être compris entre 20° et 50°. Un angle d'inclinaison inférieur à 20° entraîne un manque d'aération et ainsi des dépôts de condensation sur la face intérieure du capteur. En outre, la neige y glisse difficilement. L'orientation optimale des capteurs plans est le sud. Toute autre orientation doit être compensée par une augmentation de la surface des capteurs. Une déviation de $\pm 90^\circ$ par rapport au sud, pour un angle d'inclinaison jusqu'à 50°, doit être compensée par une augmentation de la surface de capteurs d'environ 50 à 75 %.
- Pour un angle d'inclinaison jusqu'à 75°, il est recommandé de s'écarter au maximum de $\pm 45^\circ$ de l'orientation plein sud.
- Orientation des capteurs plans pour l'assistance au chauffage: l'angle d'inclinaison devrait être compris entre 30° et 70°. Les installations ayant un angle d'inclinaison élevé présentent l'avantage de ne recevoir en été que très peu de chaleur en excès et aussi, celui de pouvoir être débarrassées de la neige sans problème en hiver. Orientation: un écart de $\pm 45^\circ$ environ par rapport au sud pour un angle d'inclinaison jusqu'à 75° doit être compensé par une augmentation de la surface de capteurs d'environ 20 %. Pour des angles d'inclinaison supérieurs, il est recommandé de limiter l'écart à $\pm 45^\circ$.
- Chauffage d'appoint: le choix du chauffage d'appoint a une grande influ-

Tableau 2.15:
Choix des capteurs appropriés (plus d'infos sous [Swissolar]).

Légende:
++ très approprié
+ approprié
- à éviter
-- inapproprié

Domaine d'utilisation	Capteur plan non vitré	Capteur plan vitré	Capteurs à tubes sous vide
Piscine, uniquement pendant l'été	++	-	--
Piscine couverte, pendant l'hiver et l'été	--	++	+
Production d'eau chaude sanitaire	--	++	+
Production d'eau chaude sanitaire et piscine	--	++	+
Préchauffage de l'eau chaude sanitaire	+	++	--
Production d'eau chaude sanitaire et assistance au chauffage	--	++	++
Application commerciale pour le préchauffage jusqu'à 50 °C (hôtels, cantines, campings, etc.)	--	++	+
Application commerciale pour l'utilisation de la chaleur jusqu'à 80 °C (blanchisseries, tunnels de lavage, etc.)	--	++	++
Application commerciale pour la chaleur de process jusqu'à 150 °C (industrie alimentaire, etc.)	--	-	++
Préchauffage de l'air (installations de ventilation)	--	++	+

ence sur l'écologie de la globalité du système. Les chauffages au bois et les pompes à chaleur sont particulièrement appropriés à cet effet. En outre, une régulation prédictive, c'est-à-dire tenant compte des prévisions météorologiques, peut augmenter l'efficacité d'une installation solaire thermique. Cela permet d'éviter un apport simultané d'énergie de chauffage d'appoint et d'énergie solaire.

- Protection contre la surchauffe: si l'offre en matière d'énergie solaire est supérieure au besoin thermique, l'accumulateur risque de surchauffer, ou le mélange eau-glycol de s'évaporer dans le capteur. Il convient donc de planifier des mesures de prévention contre la surchauffe (hydraulique, régulation). [Swissolar] et [SuisseEnergie] proposent des fiches techniques à ce sujet.
- Débits volumiques à travers les capteurs: pour un gain d'énergie optimal, il convient d'utiliser une installation haut débit avec un débit volumique compris

entre 30 et 50 l par heure et par m² de surface de capteurs. Pour la génération de températures élevées, les installations bas débit avec un débit volumique compris entre 10 l et 20 l par heure et par m² de surface de capteurs sont les plus adaptées.

- Charge par stratification: les strates de température dans l'accumulateur peuvent être maintenues plus facilement en mode bas débit qu'en mode haut débit.

Valeurs indicatives pour la construction d'installations solaires thermiques

Le [calculateur solaire] aide à la première évaluation. Il permet d'évaluer facilement la production d'énergie approximative, les coûts totaux et la durée d'amortissement. Les installations plus grandes et plus complexes devraient être conçues par un spécialiste du solaire.

Bâtiment d'habitation	Occupation	Installations de production d'eau chaude		Installations combinées (prod. d'eau chaude et assistance au chauffage)	
		Surface de capteurs plans ¹⁾ m ² abs/pers.	Volume de préchauffage solaire ²⁾ l/m ²	Surface de capteurs plans ¹⁾ m ² /(MWh a)	Volume de préchauffage solaire ²⁾ l/m ²
Bâtiment de petite taille	Jusqu'à 20 pers.	1,2	50	1	120
Bâtiment de taille moyenne	Jusqu'à 20 pers.	0,8	40	0,8	90
Bâtiment de grande taille	Plus de 100 pers.	0,5	30	0,8	60

1) abs: surface de référence = surface d'absorbeur

2) Le volume de préchauffage solaire (VPréch) fait partie du volume total (VT) dans le chauffe-eau. Le volume total est la somme du volume disponible (VD) et du volume de préchauffage solaire (VPréch).
Donc: VT = VD + VPréch

Tableau 2.16: Valeurs indicatives approximatives pour la surface de capteurs nécessaire avec une orientation optimale.

Orientation	Augmentation en cas de production d'eau chaude		Augmentation en cas d'installations combinées (prod. d'eau chaude et assistance au chauffage)	
	Inclinaison	Correction de la surface de capteurs	Inclinaison	Correction de la surface de capteurs
Sud, sud-ouest (+45°), sud-est (-45°)	20 à 50°	Aucune correction	30 à 50°	Aucune correction
	60°	+15%	75°	+20%
	75°	+50%	> 75°	Calculer la correction
	> 75°	Calculer la correction		
Ouest (+90°), Est (-90°)	20 à 50°	+5%	20 à 45°	Aucune correction
	50°	+10%	50°	+10%
	> 50°	Calculer la correction	> 50°	Calculer la correction

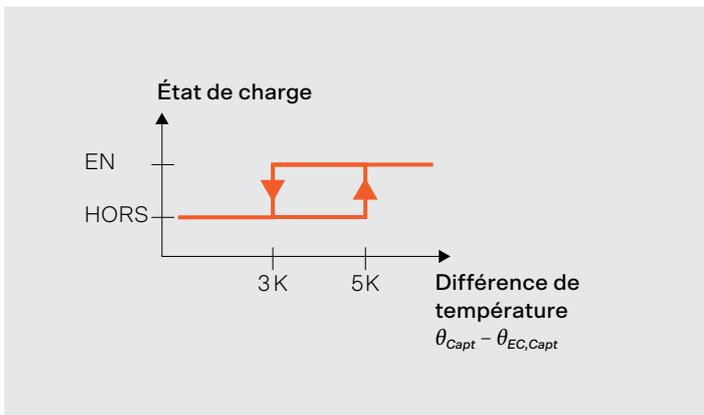
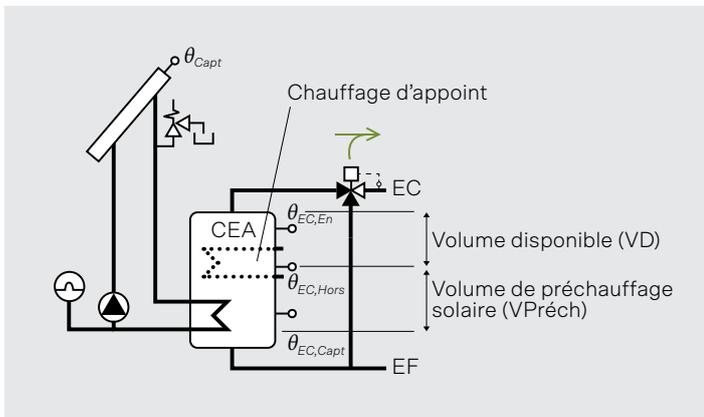
Tableau 2.17: Augmentation de la surface de capteurs en cas d'une orientation non optimale.

2.12 Installations solaires thermiques – exemples pratiques

Exemple 1: installation solaire thermique avec échangeur de chaleur intégré pour la production EC
Systèmes de charge haut débit, charge d'eau chaude: lorsque la température du champ de capteurs (θ_{Capt}) est supérieure de 3 à 5 K à la température dans la zone du volume de préchauffage solaire ($\theta_{EC,Capt}$), la pompe solaire entre en service. La charge de l'accumulateur s'effectue de bas en haut par les courants de convection induits. Dès que la différence de température entre le champ de capteurs et le volume de préchauffage ($\theta_{Capt} - \theta_{EC,Capt}$) est inférieure de 3 K à 5 K, la pompe solaire se désactive à nouveau. Lorsque l'installation solaire ne permet pas d'atteindre les températures d'eau chaude requises dans le volume disponible, le chauffage d'appoint fournit la puissance thermique nécessaire.

Figure 2.73: Installation solaire haut débit pour le chauffage indirect de l'eau.

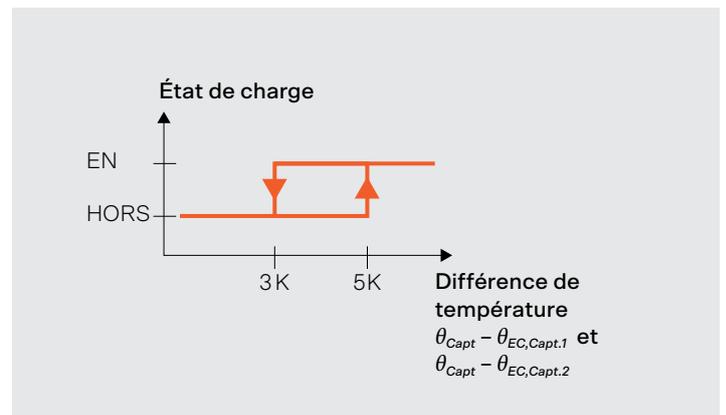
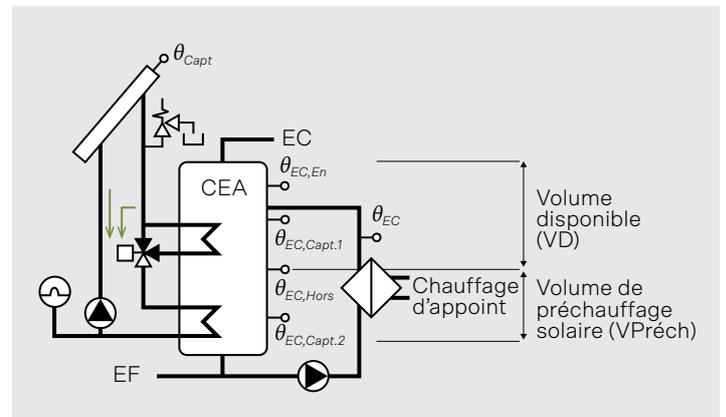
Figure 2.74: Exemple de fonction de régulation – déclenchement de la pompe du circuit de charge solaire (selon figure 2.73).



Systèmes de charge bas débit, charge d'eau chaude: les sondes de température ($\theta_{EC,Capt1}$ et $\theta_{EC,Capt2}$) situées dans le CEA déclenchent le circuit solaire dès que l'une des deux températures est inférieure à la température du champ de capteurs (θ_{Capt}). Si l'on mesure dans la zone supérieure ($\theta_{EC,Capt1}$) une différence de température de 3 à 5 K par rapport au champ de capteurs (θ_{Capt}), la vanne à 3 voies passe en position de « déviation » et le volume disponible est chargé. La chaleur résiduelle du circuit solaire est acheminée jusqu'au volume de préchauffage à l'aide du second échangeur de chaleur. En revanche, si la température dans le volume disponible ($\theta_{EC,Capt1}$) est plus élevée que la température du champ de capteurs (θ_{Capt}), la chaleur disponible est transférée à l'eau chaude sanitaire uniquement par l'échangeur de chaleur inférieur. L'eau chaude sanitaire est préchauffée. Le chauffage d'appoint chauffe le volume disponible, lorsque la température de consigne n'est pas atteinte à la sonde marche ($\theta_{EC,En}$).

Figure 2.75: Installation solaire bas débit pour le chauffage indirect de l'eau.

Figure 2.76: Exemple de fonction de régulation – déclenchement de la pompe du circuit de charge solaire, charge de la zone supérieure ou inférieure de l'accumulateur (selon figure 2.75).



Eléments critiques:

- Problèmes de surchauffe dans le circuit solaire et le circuit de charge EC.
- Dégradation des strates de température dans l'accumulateur pendant la charge solaire – choisir un débit à faible impulsion dans l'accumulateur avec une vitesse d'entrée < 0,1 m/s.
- Vitesse d'écoulement dans le circuit solaire.
- Maintien de la pression dans le circuit solaire.

Domaine d'utilisation:

- Maisons unifamiliales et plurifamiliales

Exemple 2: installation solaire thermique avec échangeur de chaleur non intégré pour la production EC

Description du fonctionnement:

lorsque les températures de l'accumulateur ($\theta_{EC,Capt1}$) sont inférieures de 3 à 5 K à celles du champ de capteurs (θ_{Capt}), le circuit primaire et le circuit secondaire entrent en service. Grâce au débit à faible impulsion, le CEA est chargé par stratification jusqu'à ce que la température à la sonde ($\theta_{EC,Capt2}$) soit de 3 K à 5 K inférieure à la température du champ de capteurs (θ_{Capt}).

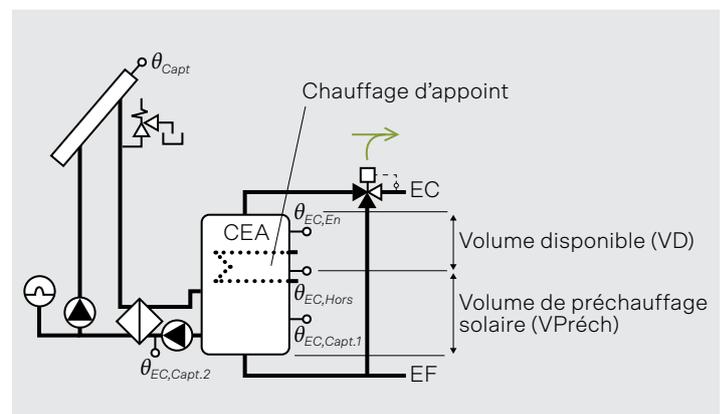
Eléments critiques:

- Problématique de surchauffe dans le circuit solaire et le circuit de charge EC.
- Dépôt de calcaire dans l'échangeur de chaleur.
- Pertes dans l'échangeur de chaleur.
- Dégradation des strates de température dans l'accumulateur pendant la charge solaire – choisir un débit à faible impulsion dans l'accumulateur avec une vitesse d'entrée < 0,1 m/s.
- Vitesse d'écoulement dans le circuit solaire.
- Maintien de la pression dans le circuit solaire.

Domaine d'utilisation:

- Equipement ultérieur de maisons unifamiliales et plurifamiliales
- Grandes installations solaires

Figure 2.77: Installation solaire thermique, échangeur de chaleur non intégré pour le chauffage indirect de l'eau.



Exemple 3: installations solaires thermiques, accumulateur de préchauffage séparé avec inversion de stratification

Description du fonctionnement: l'utilisation thermique de l'énergie solaire est identique à celle de l'exemple 1 (charge de l'eau chaude au moyen d'une installation solaire haut débit). Lorsque la température ($\theta_{EC,Préch}$) dans l'accumulateur de préchauffage (Préch) est supérieure à la température ($\theta_{EC,En}$) dans l'accumulateur de réchauffage (Réch), la vanne à 3 voies passe en position de «passage». La pompe de circulation

(P_{EC}) se met en marche. L'eau plus chaude est alors acheminée depuis l'accumulateur de préchauffage via l'échangeur de chaleur à l'accumulateur de réchauffage. Cette inversion de stratification se déroule sans apport thermique de l'échangeur de chaleur.

Le réchauffeur est activé lorsque la sonde «marche» ($\theta_{EC,En}$) passe en dessous de la température de consigne. Dès que la chaleur exigée est atteinte à l'échangeur de chaleur, la pompe de circulation (P_{EC}) se met en marche. L'eau est acheminée depuis l'accumulateur de

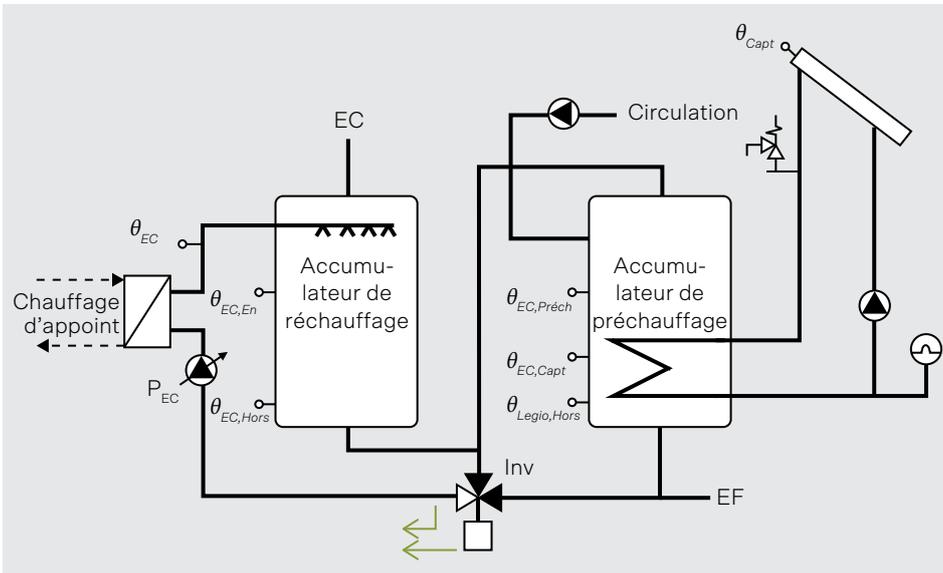


Figure 2.78: Préchauffage avec inversion de stratification et circuit de prévention de légionellose. EF: eau froide EC: eau chaude

	Chauffage	Production d'eau chaude
Source	-	- Energie solaire - Combustible gazeux, liquide ou solide, courant électrique (chauffage d'appoint)
Transformation	-	- Capteurs solaires - Echangeur de chaleur intégré ou non intégré
Accumulation	-	- Accumulateur avec échangeur de chaleur intégré (côté solaire) - Accumulateur avec échangeur de chaleur non intégré possible côté solaire
Remarques	-	- Chauffage d'appoint avec échangeur de chaleur non intégré en mode bas débit - Chauffage d'appoint avec échangeur de chaleur intégré possible
Selon les [MoPEC], solution standard (SS) lors du remplacement d'un générateur de chaleur dans une habitation	SS 1: installation solaire thermique pour la production EC La surface minimale de capteurs solaires s'élève à 2% de la SRE (surface d'absorbeurs en cas de capteurs plans et surface d'entrée en cas de capteurs à tubes). La SS 1 est bien adaptée pour remplacer un générateur de chaleur à combustible fossile par un système similaire.	

Tableau 2.18: Spécifications relatives aux exemples 1, 2 et 3 avec installation solaire thermique.

réchauffage via la vanne à 3 voies en position «déviation», chauffée à la température souhaitée (θ_{EC}) et réinjectée sans à-coups dans la zone supérieure de l'accumulateur. Cette disposition hydraulique permet de désinfecter thermiquement l'accumulateur de préchauffage. Dans ce cas, la vanne passe en position «passage». L'eau est chauffée dans l'accumulateur de préchauffage par l'échangeur de chaleur à la température souhaitée (θ_{EC}) jusqu'à ce que celle-ci soit atteinte au droit de la sonde arrêt ($\theta_{Legio,Hors}$).

Éléments critiques:

- Problèmes de surchauffe dans le circuit solaire et le circuit de charge EC.
- Dégradation des strates de température dans les accumulateurs pendant la

charge solaire – choisir un débit à faible impulsion dans les accumulateurs de préchauffage et de réchauffage avec une vitesse d'entrée $< 0,1$ m/s.

- Le retour de la circulation doit être sans à-coups.
- Conditions hygiéniques dans l'accumulateur de préchauffage lors de températures inférieures à 50°C ; utilisation de l'eau préchauffée sans exigences pour la qualité hygiénique (eau industrielle).

Domaine d'utilisation:

- Grandes installations de production d'eau chaude.
- Utilisation de la chaleur rejetée dans l'accumulateur de préchauffage (à la place d'une installation solaire thermique).

Figure 2.79: Maison avec installation solaire thermique.
(Photo: Swissolar)



Exemple 4: installation solaire thermique pour la production EC et l'assistance au chauffage

Mode charge de l'accumulateur d'énergie (AE) via l'installation solaire thermique: le point d'activation du circuit solaire est défini par la différence de température ($\theta_{AE,Capt.2} - \theta_{Capt}$). Celle-ci résulte des mesures de température ($\theta_{AE,Capt.2}$) dans l'accumulateur d'énergie (AE) et dans le champ de capteurs (θ_{Capt}).

Lorsque la température dans le champ de capteurs est supérieure de 3 à 5 K à celle de l'accumulateur d'énergie, la pompe solaire (P_{Capt}) s'active. L'inverseur (Inv) passe en position «déviation» et l'accumulateur d'énergie est chargé à partir de la zone inférieure. La charge s'effectue jusqu'à ce que la différence entre la température de l'accumulateur et celle du champ de capteurs est inférieure 3 à 5 K.

Mode charge de l'accumulateur d'eau chaude via l'installation solaire: l'utilisation de l'énergie solaire est identique à celle de l'exemple 1 (charge de l'eau chaude au moyen d'une installation solaire faible débit). L'accumulateur d'eau chaude (AEC) est chauffé au moyen des

capteurs solaires lorsque l'offre en énergie solaire est suffisante. Si la température de consigne dans l'AEC n'est pas atteinte, celle-ci peut être augmentée jusqu'à la température de consigne à l'aide de la PAC.

La charge de l'eau chaude par la PAC s'effectue par étapes. L'eau se chauffe alors par étapes et se place dans l'accumulateur en fonction de sa température.

Éléments critiques:

- Problèmes de surchauffe dans le circuit solaire et le circuit de charge EC.
- Les échangeurs de chaleur internes peuvent provoquer un mélange des strates de température.
- Placement correct de la sonde de température dans le champ de capteurs
- Charge par étapes via une PAC avec échangeur de chaleur externe: un débit d'entrée à faible impulsion dans l'AEC est nécessaire, choisir une vitesse d'entrée < 0,1 m/s.

Domaine d'utilisation:

- Maisons plurifamiliales
- Bâtiments commerciaux

Figure 2.80: PAC avec fonctionnement monovalent et assistance solaire.

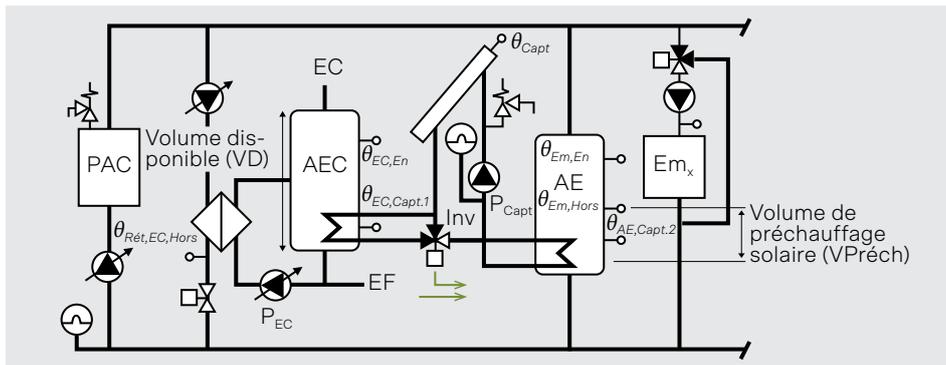


Tableau 2.19: Spécifications relatives à l'exemple 4 avec installation solaire thermique.

	Chauffage	Production d'eau chaude
Source	- Chaleur environnementale/ rejets thermiques et courant électrique - Énergie solaire (ES)	Énergie solaire (AEC)
Transformation	- Pompe à chaleur - Capteurs solaires	- Capteurs solaires - Échangeur de chaleur intégré (charge par étapes)
Accumulation	Accumulateur d'énergie	Accumulateur d'eau chaude
Remarques	Fonctionnement monovalent avec PAC	Charge par étapes avec échangeur de chaleur non intégré

Exemple 5: installation solaire thermique, chauffage au bois, accumulateur combiné

Remarque générale: étant donné le risque de formation de condensat dans la chaudière à bois, la température retour de la chaudière ($\theta_{Ret,Chaud}$) est augmentée et maintenue (maintien de la température de retour de la chaudière). L'accumulateur combiné est chargé en fonction de la différence de densité de l'eau de chauffage qui afflue.

Mode charge du volume disponible «eau chaude» par le chauffage d'appoint: lorsque la sonde de l'accumulateur combiné ($\theta_{EC,En}$) réagit, la chaudière à bois et la pompe de circulation (P_{Chaud}) se mettent en marche. La partie supérieure de l'accumulateur combiné est chargée en eau de chauffage, jusqu'à ce que la valeur de consigne soit à nouveau atteinte au droit de la sonde de

température ($\theta_{EC,Hors}$). Le volume disponible «eau chaude» est à nouveau entièrement prêt pour les utilisateurs.

Mode charge du volume disponible «chauffage» par le chauffage d'appoint: les groupes de chauffage sont réglés en fonction des conditions météorologiques. C'est pourquoi la température aller via le groupe de chauffage dépend de la courbe de chauffe réglée. Lorsque la température au droit de la sonde marche ($\theta_{Em,En}$) du volume disponible «chauffage» de l'accumulateur combiné descend en dessous de la température aller du groupe de chauffage, la chaudière à bois et la pompe de circulation (P_{Chaud}) se mettent en marche. La zone inférieure de l'accumulateur combiné est chargée en eau de chauffage, jusqu'à ce que la température de consigne soit atteinte au droit de la sonde arrêt ($\theta_{Em,Hors}$).

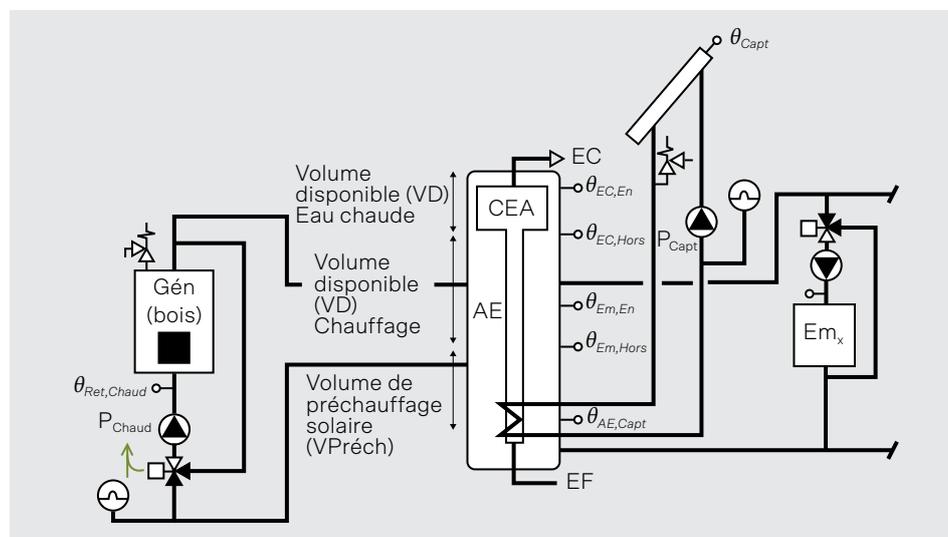


Figure 2.81: Chauffage au bois, installation solaire thermique, accumulateur combiné.

	Chauffage	Production d'eau chaude
Source	- Combustible solide - Energie solaire (ES)	-
Transformation	- Chaudière - Capteurs solaires	CEA intégré
Accumulation	Accumulateur d'énergie (accumulateur combiné)	CEA intégré (accumulateur combiné)
Remarques	- Fonctionnement monovalent avec chaudière - Installation solaire thermique avec charge par étapes (système haut débit)	-

Tableau 2.20: Spécifications relatives à l'exemple 5 avec installation solaire thermique.

Mode charge du volume de préchauffage par l'installation solaire thermique:

l'utilisation de l'énergie solaire est identique à celle de l'exemple 1 (charge de l'eau chaude au moyen d'une installation solaire haut débit). Lorsque la température du champ de capteurs (θ_{Capt}) est supérieure de 3 à 5 K à la température de l'accumulateur combiné ($\theta_{AE,Capt}$), la pompe solaire (P_{Capt}) entre en service. L'apport de chaleur se fait dans la zone inférieure de l'accumulateur combiné. Dès que la différence de température entre le champ de capteurs (θ_{Capt}) et l'accumulateur combiné ($\theta_{AE,Capt}$) descend en dessous de 3 ou 5 K, la pompe solaire s'arrête.

Éléments critiques:

- Formation de condensat dans la chaudière à bois pour les chaudières sans condensation – prévoir un maintien de la température du retour de chaudière d'au moins 60 °C.
- Problèmes de surchauffe dans le circuit solaire et le circuit de charge EC.
- Évaporation du mélange eau-glycol dans le circuit solaire.
- Vitesse d'écoulement dans le circuit solaire.
- Déperditions thermiques accrues en raison de la taille supérieure de l'accumulateur combiné.
- Lors d'un apport important de puissance solaire, il peut arriver que les strates de température dans l'accumulateur combiné soient dérangées.
- Dégradation des strates de température dans l'accumulateur combiné – choisir un débit d'entrée à faible impulsion dans l'accumulateur combiné pour le circuit du générateur de chaleur avec une vitesse d'entrée < 0,1 m/s.
- En cas de plusieurs groupes de chauffage ayant différentes températures aller, il faut stocker la température la plus élevée requise dans l'accumulateur combiné.

Domaine d'utilisation:

- Maisons unifamiliales et plurifamiliales

Exemple 6: installation solaire thermique, PAC, accumulateur combiné

Remarque générale: l'accumulateur combiné peut charger d'une manière contrôlée le volume disponible «eau chaude» ou le volume disponible «chauffage», ceci au moyen de vannes inverseurs à trois voies (Inv_1 et Inv_2).

Mode charge du volume disponible

«eau chaude» par le chauffage d'appoint:

la PAC chauffe le volume disponible «eau chaude» dès que la sonde marche ($\theta_{EC,En}$) réagit. Les deux vannes inverseurs à trois voies (Inv_1 et Inv_2) se mettent alors en position «passage». Le volume disponible «eau chaude» est chargé par étapes s'il ne s'agit pas d'une PAC à puissance régulée. En revanche, s'il s'agit d'une PAC à puissance régulée, elle atteint dès le début la température aller requise pour chauffer l'eau chaude sanitaire aux températures requises. La sonde arrêt ($\theta_{EC,Hors}$) met hors service le circuit de charge dès que la température de consigne est atteinte.

Mode charge du volume disponible

«chauffage» par le chauffage d'appoint:

il faut stocker dans l'accumulateur d'énergie la température aller la plus élevée requise dans les groupes de chauffage. Lorsque la température au droit de la sonde marche ($\theta_{Em,En}$) passe en dessous de cette température, les deux vannes inverseurs à trois voies (Inv_1 et Inv_2) se mettent en position «déviation». La PAC chauffe le volume disponible «chauffage» jusqu'à ce que la température de consigne soit atteinte au droit de la sonde arrêt ($\theta_{Em,Hors}$).

Mode charge de l'accumulateur combiné par l'installation solaire thermique:

l'utilisation thermique de l'énergie solaire est identique à celle de l'exemple 1 (charge de l'eau chaude au moyen d'une installation solaire faible débit). La température dans le champ de capteurs (θ_{Capt}) est comparée aux températures dans l'accumulateur d'énergie ($\theta_{AE,Capt.1}$ et $\theta_{AE,Capt.2}$). Si la température de l'accumu-

lateur d'énergie est inférieure de 3 à 5 K à celle du champ de capteurs, l'énergie solaire est transférée dans le circuit solaire «volume disponible eau chaude» et/ou le circuit «volume disponible préchauffage solaire». Dès que la différence de température entre le champ de capteurs (θ_{Capt}) et l'accumulateur combiné ($\theta_{AE,Capt.1}$ ou $\theta_{AE,Capt.2}$) descend en dessous de 3 à 5 K, la pompe solaire s'arrête.

Éléments critiques:

- Problèmes de surchauffe dans le circuit solaire et le circuit de charge EC.
- Evaporation du mélange eau-glycol dans le circuit solaire.
- Vitesse d'écoulement dans le circuit solaire.
- Déperditions thermiques accrues en raison de la taille supérieure de l'accumulateur combiné.

- En cas de charge stratifiée, une forte élévation de la température de la PAC est nécessaire pour charger la zone supérieure de l'accumulateur.
- Dégradation des strates de température dans l'accumulateur combiné – choisir un débit d'entrée à faible impulsion dans l'accumulateur combiné pour le circuit du générateur de chaleur avec une vitesse d'entrée < 0,1 m/s. En cas de plusieurs groupes de chauffage ayant différentes températures aller, il faut stocker la température la plus élevée requise dans l'accumulateur combiné.

Domaine d'utilisation:

- Maisons unifamiliales et plurifamiliales

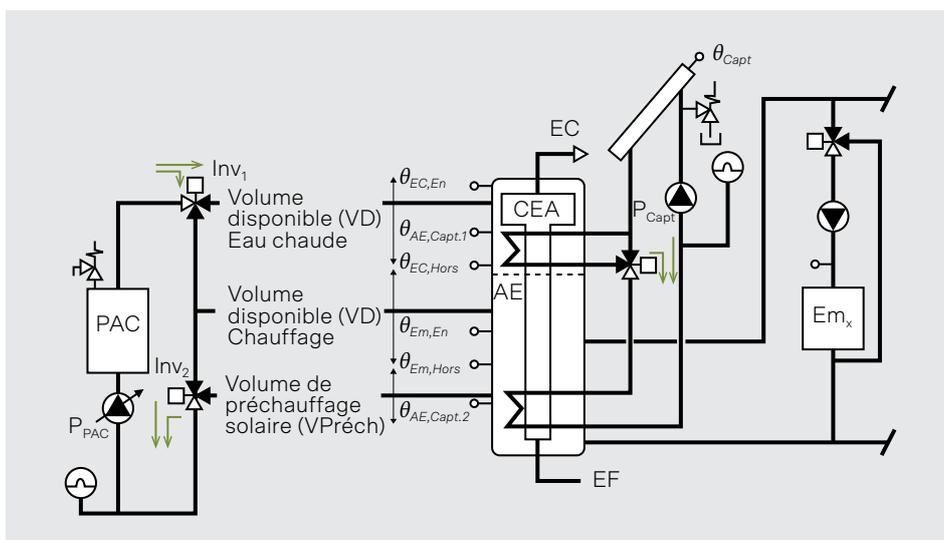


Figure 2.82: Pompe à chaleur avec fonctionnement monovalent, installation solaire thermique, accumulateur combiné.

	Chauffage	Production d'eau chaude
Source	- Chaleur environnementale et rejets thermiques - Énergie solaire (ES)	-
Transformation	- Pompe à chaleur - Capteurs solaires	CEA intégré
Accumulation	Accumulateur d'énergie (accumulateur combiné)	CEA intégré (accumulateur combiné)
Remarques	- Fonctionnement monovalent avec PAC - Installation solaire thermique avec charge par étapes (système bas débit)	-

Tableau 2.21: Spécifications relatives à l'exemple 6 avec installation solaire thermique.

2.13 Emission de chaleur

Remarques générales

Dans les nouvelles comme dans les anciennes installations, il convient d'utiliser exclusivement des systèmes d'émission de chaleur ayant la même température de dimensionnement au sein d'un circuit de chauffage, respectivement de groupes de chauffage ou de zones. Les systèmes d'émission de chaleur comportent entre autres les corps de chauffe, les chauffages de surface, les systèmes d'éléments de construction thermoactifs, les réchauffeurs d'air, etc. Si cela n'est pas possible, de nouveaux circuits de chauffage doivent être créés.

Disposition des systèmes d'émission de chaleur et confort thermique

La disposition, le type et la taille des surfaces de chauffe ainsi que les caractéristiques du local influencent la température ambiante (température opérative), l'asymétrie de rayonnement et la vitesse de l'air ambiant. Dans des situations critiques, il convient de déterminer conjointement avec le maître d'ouvrage les pièces pour lesquelles est réalisé le calcul du confort thermique, p. ex. l'asymétrie de la température de rayonnement. La zone de séjour prédéfinie est déterminante. Les températures aller

des surfaces de chauffe (et des réchauffeurs d'air) doivent être dimensionnées en fonction des valeurs limites et des valeurs cibles conformément au tableau 2.22.

Puissance des surfaces de chauffe

Les surfaces de chauffe doivent être dimensionnées sur la base de la charge thermique nominale déterminée par pièce conformément à la norme [SIA 384/2], respectivement à la norme [SN EN 12831-1]. La planification doit inclure tous les facteurs qui peuvent influencer notablement la performance des surfaces de chauffe. Il s'agit par exemple des éléments suivants: habillages, raccords, débits, recouvrements, enduits, revêtements de sol, tapis, rideaux.

Même avec un dimensionnement précis des systèmes d'émission de chaleur, la température ambiante garantie ne pourra pas être respectée si

- la température extérieure moyenne est inférieure à la température extérieure de base,
- les pièces adjacentes sont chauffées à une température inférieure à l'hypothèse de départ,
- les apports de chaleur internes ou le nombre d'occupants divergent des données de base du projet,
- l'utilisation diffère des données de base du projet.

Installation de ventilation avec réchauffement d'air (chauffage à air chaud)

Les installations de ventilation doivent être utilisées pour le chauffage des locaux uniquement si le débit d'air neuf

Tableau 2.22: Températures aller pour différentes conditions de dimensionnement selon la norme [SIA 384/1].

Tableau 2.23: Limites de puissance et niveaux de température des systèmes d'émission de chaleur selon la norme [SIA 382/2]. Les valeurs sont purement indicatives. Selon la solution choisie, elles peuvent différer des valeurs indiquées. Les limites entre les différents systèmes, notamment, ne sont pas toujours univoques. SPN: surface de plancher nette
P: personne

Type d'émission de chaleur	Valeur limite	Valeur cible
Emission de chaleur en général, chauffage au sol exclu	50 °C	40 °C
Chauffage au sol (jusqu'à des temp. ambiantes de 22 °C)	35 °C	30 °C

Système	Puissance max. Chauffer		Température aller ou temp. d'air fourni max. °C	Fluide caloporteur	Remarques
	W/m ² SPN	W/P			
Corps de chauffe	50		50	Eau	
Chauffage de plafond	40		30	Eau	
Chauffage au sol	40		35	Eau	
Système d'éléments de construction thermoactifs	40		30	Eau	
Chauffage à air chaud		360	50	Air	à 36 m ³ /(h P)

nécessaire à cet effet reste inférieur au débit hygiénique exigé au régime normal de ventilation. Un chauffage à air chaud tel qu'il est défini par la norme [SIA 382/5], à savoir sans débits ou températures d'air neuf augmentés inutilement, permet d'atteindre une puissance thermique spécifique maximale d'environ 10 W/m² de surface de réf-

rence énergétique. En général, cette exigence n'est respectée que dans les nouveaux bâtiments dotés d'une isolation thermique extrêmement performante, par exemple les bâtiments Minergie-P. Pendant le chauffage, il convient notamment de prendre en compte le risque d'avoir une humidité de l'air ambiant trop faible.

2.14 Sources

[Ouvrage spécialisé OéE]	Balmer, Matthias et al. Optimisation énergétique de l'exploitation – Rendre les bâtiments plus efficaces. 2020. Faktor Verlag, Zurich, 2020. ISBN: 978-3-905711-57-8.
[Sites EGID]	Office fédéral de la statistique. Identificateur fédéral de bâtiment (EGID). Via www.bfs.admin.ch → Registres. Consulté en juillet 2020.
[SuisseEnergie] [OEEE]	SuisseEnergie. www.suisseenergie.ch . Mai 2022. Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique d'installations, de véhicules et d'appareils fabriqués en série (Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique, OEEE). Berne, 2017. www.admin.ch
[Explications sur les réseaux thermiques]	Hangartner D. et al. Bases et explications sur les réseaux thermiques. Haute école de Lucerne – Technique & architecture (HSLU). Horw, 2018.
[GSP]	Groupe professionnel suisse pour les pompes à chaleur. www.fws.ch . Consulté en juillet 2020.
[Programme Bâtiments]	Office fédéral de l'énergie, Office fédéral de l'environnement. Le Programme Bâtiments. www.dasgebaeudeprogramm.ch . Consulté en juillet 2020.
[Energie-bois Suisse]	Energie-bois Suisse. www.energie-bois.ch . Consulté en mai 2022.
[OPair]	Ordonnance sur la protection de l'air (OPair). Berne, 1985. www.bag.admin.ch
[OPB]	Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB). Berne, 1985. www.bag.admin.ch
[Minergie Bois]	Minergie Suisse et Énergie-bois Suisse. Le bois, source de chaleur – Chauffage au bois dans un bâtiment Minergie. Bâle, 2017. www.minergie.ch
[MoPEC]	Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK). Modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC). Édition 2014 (mise à jour en 2018 – en raison de la modification des normes). Berne, 2018.
[QM Chauffages au bois]	QM Chauffages au bois. www.qmholzheizwerke.ch . Consulté en mai 2022.
[SIA 382/2]	Norme SIA 382/2. Bâtiments climatisés – Puissance requise et besoins d'énergie. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2011; en cours de révision, désormais norme SIA 380/2.

- [SIA 382/5] Norme SIA 382/5. Ventilation mécanique dans les bâtiments d'habitation. SIA. Zurich, 2021.
- [SIA 384/1] Norme SIA 384/1. Installations de chauffage dans les bâtiments – Bases générales et performances requises. SIA. Zurich, 2009; en cours de révision.
- [SIA 384/2] Norme SIA 384/2. Systèmes de chauffage dans les bâtiments – Puissance requise. SIA. Zurich, 2020.
- [SIA 384/3] Norme SIA 384/3. Systèmes de chauffage dans les bâtiments – Besoins en énergie. SIA. Zurich, 2020.
- [SIA 384/6] Norme SIA 384/6. Sondes géothermiques. SIA. Zurich, 2021.
- [SIA 411] Norme SIA 411. Représentation modulaire des installations. SIA. Zurich, 2016.
- [SN EN 12831-1] Norme suisse SN EN 12831-1:2017+C1:2020. (Norme SIA 384.201). Performance énergétique des bâtiments – Méthode de calcul de la charge thermique nominale – Partie 1: Charge de chauffage des locaux, module M3-3. SIA. Zurich.
- [SN EN 15450] Norme suisse SN EN 15450 (Norme SIA 384.348). Systèmes de chauffage dans les bâtiments – Conception des systèmes de chauffage par pompe à chaleur. SIA. Zurich, 2007.
- [SN EN 303-5] Norme suisse SN EN 303-5. Chaudières de chauffage – Partie 5: Chaudières spéciales pour combustibles solides, à chargement manuel et automatique, puissance utile inférieure ou égale à 500 kW – Définitions, exigences, essais et marquage. Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour, 2012.
- [Calculateur solaire] Swissolar. Calculateur solaire, www.swissolar.ch → Pour maîtres d'ouvrage → Outils de planification. Consulté en juillet 2020.
- [Suva] Caisse nationale d'assurance en cas d'accidents (SUVA). Liste de contrôle n° 67006. Silos à plaquettes de bois vert (2016) et liste de contrôle n° 67007. Silos à copeaux de bois (2013). Lucerne. www.suva.ch
- [Swissolar] Swissolar. www.swissolar.ch. Consulté en juillet 2020.
- [SICC HE200-01] Directive SICC HE200-01. Stockage des granulés de bois chez le client final. Société suisse des ingénieurs en technique du bâtiment (Die Planer, SICC). Urtenen-Schönbühl, 2018.
- [topten] Topten GmbH. www.topten.ch. Consulté en juillet 2020.
- [VDI 4640-2] Richtlinie VDI 4640 Blatt 2. Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI). Düsseldorf, 2019.
- [AEAI] Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI). Prescriptions de protection incendie AEA1 2015, état 1.8.2021. Berne, 2021. www.vkg.ch
- [Manuel Pompes à chaleur] Dott, Ralf et al. Pompes à chaleur – Planification, optimisation, fonctionnement, entretien. Faktor Verlag, Zurich, 2018. ISBN: 978-3-905711-41-7.

Froid climatique

Zoran Alimpic 3.1 Signification, termes

Ce chapitre abordera principalement les installations frigorifiques fonctionnant à des températures d'eau froide comprises entre 0 et 20°C environ; en font partie, notamment, les installations de climatisation douce. Toutes les autres installations de congélation industrielles et de procédés industriels, par exemple la lyophilisation, la liquéfaction de gaz, la technique du vide et les supraconducteurs, ne sont pas traitées dans cet ouvrage.

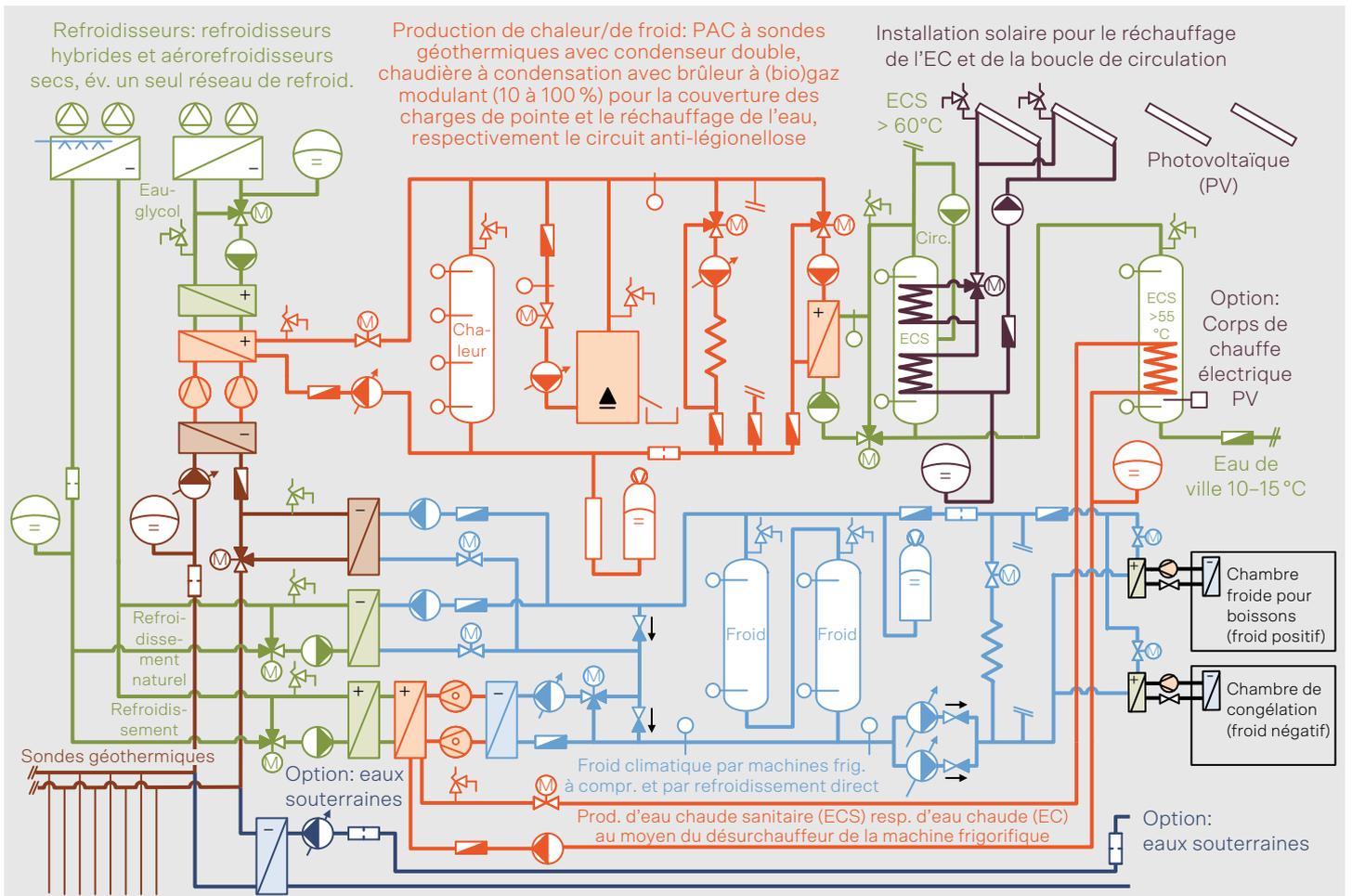
Importance du froid climatique: la technique frigorifique a gagné en importance au cours de ces dernières années. D'une part, les exigences des utilisateurs en matière de confort ont augmenté, d'autre part la chaleur perdue générée dans le bâtiment s'est accrue en rai-

son du niveau de technicité plus élevé des appareils. En outre, le climat suisse changera sans doute de manière significative au cours du 21^{ème} siècle. Selon les régions et les scénarios retenus, les prévisions indiquent que la température annuelle moyenne augmentera d'environ 3 à 5°C. Il faut donc s'attendre à ce que le besoin de froid pour le refroidissement croisse de manière exponentielle.

Efficacité énergétique: il est possible de réduire la consommation d'énergie destinée au refroidissement au moyen des mesures simples, valables pour les constructions nouvelles et existantes, que voici:

- Régler la température ambiante en été le plus haut possible, par exemple à 26°C.

Figure 3.1: Exemple de l'intégration d'une installation frigorifique dans une alimentation en énergie complexe avec divers circuits de base.



- Réduire au maximum les charges internes en déclenchant les sources de chaleur telles que l'éclairage artificiel.
- Utiliser les protections solaires extérieures de manière correcte.
- Recourir au refroidissement naturel pour refroidir le bâtiment durant la nuit, respectivement pour refroidir l'air fourni des ventilations hygiéniques par le froid des sondes géothermiques ou encore des eaux souterraines.

Circuit hydraulique de base

Pour les circuits de base correspondant à la figure 3.1, il est important de dimensionner avec la plus grande précision les différents circuits, tels que le refroidissement de la machine frigorifique, la production de froid et la distribution de froid. Il faut veiller à ce que le circuit du générateur (circuit primaire) soit découplé hydrauliquement du circuit des consommateurs (circuit secondaire) moyennant un système d'accumulation de froid. De cette manière, la pompe du circuit primaire (pompe de l'évaporateur) peut charger les deux accumula-

teurs de froid sans porter atteinte aux deux pompes du circuit secondaire (pompes principales). Celles-ci déchargent à leur tour les accumulateurs sans influencer sur le circuit primaire des machines frigorifiques.

Remarque: l'efficacité énergétique maximale est atteinte si une machine permet simultanément de chauffer et de refroidir. Il faut de plus exploiter de manière optimale toutes les sources de chaleur perdue, celles des installations de froid industriel par exemple.

Précisions générales pour la planification

- Les températures de refroidissement sont à choisir le plus bas possible, à 34/28 °C par exemple.
- Machine frigorifique: il est primordial de pouvoir régler la puissance de la machine, car elle fonctionne le plus souvent en charge partielle. Pour cette raison, son rendement maximal selon la norme [SIA 382/1 → ESEER] doit se trouver dans la plage de puissance comprise entre 50 et 75 %, plage dans laquelle la

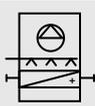
Symbole	Signification	Symbole	Signification
	Aérorefroidisseur à évaporation fermé		Vase d'expansion fermé à membrane avec compresseur d'air
	Compresseur: symbole général		Vase d'expansion fermé à membrane
	Compresseur à pistons, 2 étages, structure ouverte		Echangeur de chaleur à plaques
	Compresseur à pistons, 1 étage, semi-hermétique		Compteur de chaleur avec compteur électronique
	Compresseur à pistons, 1 étage, structure hermétique		Vanne mélangeuse à 3 voies avec entraînement
	Compresseur à pistons rotatifs		Vanne de régulation à passage droit avec entraînement
	Turbocompresseur, 1 étage		Soupape de sécurité à ressort
	Compresseur à vis		Dispositif anti-retour, clapet anti-retour
	Pompe de circulation		Filtre, piège à impuretés
	Ventilateur		Capteur de mesure, sonde: température

Tableau 3.1: Symboles de la technique frigorifique. (Sources: normes SIA 410 et 411).

machine frigorifique est en activité à peu près pendant 74 % de la durée totale de fonctionnement.

- Fluide frigorigène: le choix du fluide frigorigène optimal permet d'augmenter l'efficacité de 10 à 15 %.
- Les accumulateurs sont à concevoir de sorte que chaque compresseur puisse fonctionner sans interruption pendant au moins 20 minutes après avoir été enclenché. De surcroît, l'écart de température entre l'entrée et la sortie devrait être de ≥ 6 K.
- Distribution de froid: au moyen de circuits d'étranglement, il faut garantir que le débit massique est accordé à tout moment à la charge frigorifique actuelle.
- Les températures de l'eau de refroidissement doivent être fixées aussi haut que possible. Selon la norme [SIA 382/1], voici les températures aller qui sont requises: climatisation sans déshumidification ≥ 14 °C, avec déshumidification partielle en cas de plafonds refroidissants ≥ 10 °C, avec déshumidification contrôlée ≥ 6 °C (traitement d'air de processus industriels).
- Convertisseur de fréquence: dans les grandes installations, il est recommandé d'installer le dispositif de mesure de pression différentielle à l'extrémité du réseau de conduites, ou alors au niveau du consommateur le plus éloigné. Ainsi, on obtient que les deux pompes princi-

ales Inline (pompes à moteur ventilé) consomment nettement moins d'électricité.

Interfaces avec d'autres domaines

La technique frigorifique ne doit jamais être considérée de manière isolée, car elle est toujours rattachée à d'autres corps de métier; c'est pourquoi ces interfaces constituent un thème important (tableau 3.2).

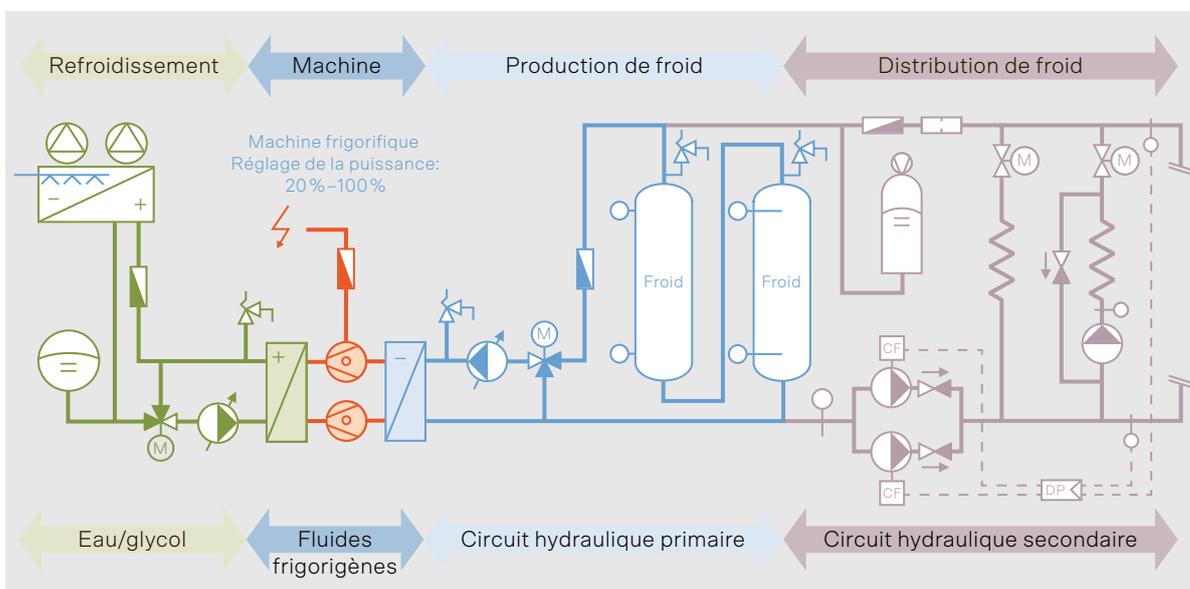


Figure 3.2: Circuit hydraulique de base d'une grande installation frigorifique.

Corps de métier, discipline	Principales interfaces avec le froid climatique
Architecture, pourcent artistique	<ul style="list-style-type: none"> - Esthétique de l'aéroréfrigérant sur le toit plat - Concepts de couleur et de matériaux - Concertations avec le service des monuments historiques - Assistance pour la demande d'autorisation de construire - Voies d'accès et dimensions des ouvertures pour mettre en place les composants - Prise en compte de procédures d'autorisation plus longues (pour des installations à l'extérieur) et de délais de livraison - Evaluation des assainissements de toiture, des parois de protection phonique et de la séparation des locaux techniques
Acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Protection phonique, notamment des compresseurs, des ventilateurs et des pompes de circulation à régime variable - Différenciation entre le mode jour et le mode nuit
Physique de la constr.	<ul style="list-style-type: none"> - Ajout de matériaux d'isolation phonique sur les murs et les plafonds
Statique de la construction, solidité	<ul style="list-style-type: none"> - Poids de la machine frigorifique, de l'aéroréfrigérant et de l'accumulateur d'énergie - Percements et socles pour tous les appareils
Installations électriques	<ul style="list-style-type: none"> - Raccordement de tous les moteurs électriques, notamment des compresseurs, du dispositif de traitement de l'eau, des ventilateurs de refroidissement et des pompes principales
Installations de chauffage	<ul style="list-style-type: none"> - Intégration de l'utilisation de la chaleur perdue dans l'hydraulique de la génération de chaleur - Utilisation double de la pompe à chaleur également en tant que machine frigorifique - Refroidissement direct au moyen de sources d'énergie telles que les sondes géothermiques et les eaux souterraines
Froid industriel	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de la chaleur perdue pour d'autres processus, notamment la production d'EC - Evaluation d'un refroidisseur commun - Raccordement év. du refroidisseur au froid climatique pour que la récupération de chaleur puisse être traitée de façon centralisée. Les refroidisseurs du froid industriel peuvent alors être supprimés.
Installations de ventilation et de climatisation	<ul style="list-style-type: none"> - Lors du dimensionnement, choix de températures de service au niveau le plus élevé possible pour le refroidissement de l'air et la déshumidification (cf. SIA 382/1) - Planification d'ouvertures de révision pour les monoblocs
Installations sanitaires	<ul style="list-style-type: none"> - Intégration de l'utilisation de la chaleur perdue dans l'hydraulique de la génération de chaleur - Traitement de l'eau pour les refroidisseurs à pulvérisation resp. les refroidisseurs à eau - Montage de siphons adaptés pour l'évacuation de l'eau de condensation resp. des condensats (remplissage de glycérine pour éviter le dessèchement)
Commande et régulation	<ul style="list-style-type: none"> - Définition du temps de fonctionnement min. pour chaque étage de compresseur (env. 20 min.) - Analyse du comportement en charge partielle - Découplage hydraulique de la production et de la distribution d'énergie - Régulation en cascade optimale de tous les générateurs d'énergie
Sécurité	<ul style="list-style-type: none"> - Remplissage avec un mélange antigèle de toutes les conduites d'eau à l'extérieur - Protection anticorrosion des conduites avec une peinture à deux composants (alternative: matière synthétique ou acier inoxydable) - Choix des isolations prescrites entre compartiments coupe-feu - Surveillance à distance par des spécialistes - Ventilation tempête dans les centrales techniques pour l'aspiration des fluides frigorigènes en cas de panne - Ventilation minimale des centrales techniques pour prévenir une accumulation de chaleur - Garde-corps et barrières de protection ou caissons pour les appareils installés à l'extérieur
Hygiène	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle périodique de la qualité de l'eau, en particulier dans les installations de ventilation et de refroidissement (légionelles) - Evacuation immédiate des condensats ou de l'eau de condensation des refroidisseurs d'air, des refroidisseurs à circulation d'air, etc. (pas d'eau stagnante!)
Energie	<ul style="list-style-type: none"> - Garantie d'un COP et d'un EER maximaux vu le comportement en charge partielle - Mesure et évaluation de tous les flux d'énergie importants - Isolation optimale pour réduire les déperditions d'énergie et prévenir les condensats - Examen d'options telles que désurchauffeurs, condenseurs doubles et refroidissement naturel

Tableau 3.2: Interfaces de la technique du froid.

3.2 Fluides frigorigènes

Généralités

Selon la norme DIN 8960, un fluide frigorigène est un fluide utilisé dans le processus d'une machine frigorifique qui absorbe la chaleur à une température et une pression basses et la dégage à une température et une pression plus élevées. Font par exemple partie des fluides frigorigènes:

- R290: propane; R600a: isobutane; R717: NH₃/ammoniac; R718: H₂O/eau.
- CFC: chlorofluorocarbones entièrement halogénés (en anglais Chlor Fluor Carbone).
- HFC: hydrofluorocarbones (en anglais Hydro Fluor Carbone).
- HCFC: hydrochlorofluorocarbones partiellement halogénés (en anglais Hydro Chlor Fluor Carbone).
- PFC: hydrofluorocarbures partiellement halogénés.
- HFO (hydrofluoro-oléfines): hydrocarbures insaturés, partiellement halogénés tels que le HFO-1234yf (CH₂ = CFCF₃ ou C₃H₂F₄) et le HFO-1234ze (CHF = CHCF₃ ou C₃H₂F₄). Ces fluides frigorigènes synthétiques sont non stables dans l'air contrairement aux autres fluides frigorigènes synthétiques. En d'autres termes, ils ne demeurent dans l'air que pendant quelques jours, donc nettement moins de 2 ans. Pour cette raison, ils ont seulement un faible impact sur le climat.

Une classification systématique des fluides frigorigènes se trouve à la figure 3.3.

Termes importants

- Entièrement halogéné: composé d'hydrocarbures dont tous les atomes d'hydrogène ont été remplacés par des atomes d'halogène, à savoir le brome, le chlore, le fluor ou le iode; le halon 1211 (bromochlorodifluorométhane) par exemple, utilisé comme agent propulseur dans les extincteurs à main.
- Partiellement halogéné: composé dont les atomes d'hydrogène ne sont que partiellement remplacés par des atomes de chlore ou de fluor.
- Mélanges, blends: fluides frigorigènes constitués de plusieurs substances différentes.
- Mélanges zéotropiques: à la place des PFC, on peut également utiliser des mélanges zéotropiques tels que par exemple le R407c. Ces derniers ont ceci de particulier que le changement de phase liquide - gazeux met en évidence leur composition effective; en effet, l'évaporation et la condensation se déroulent à une pression constante, mais pas à une température constante (glissement de température).
- Mélanges azéotropiques: en font partie les mélanges tels que le fluide frigorigène R410a. Contrairement aux mélanges zéotropiques, il se comportent comme des fluides frigorigènes purs.

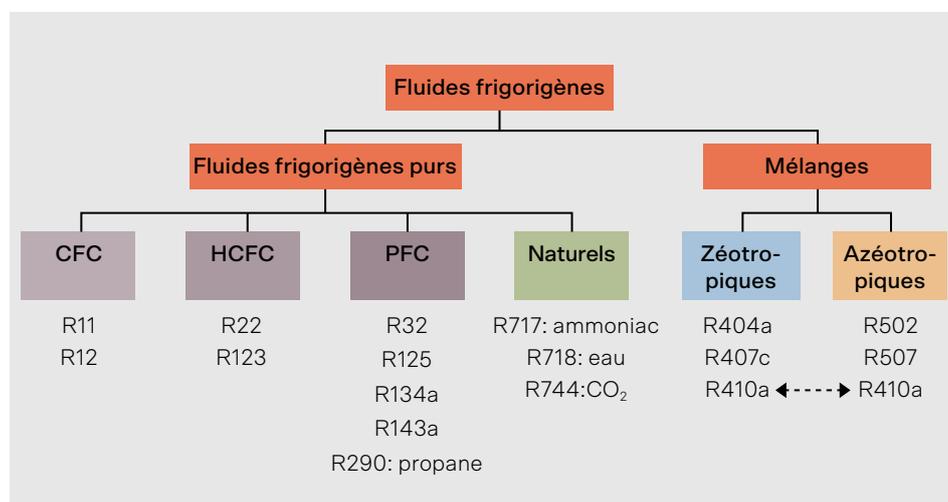


Figure 3.3: Classification systématique des fluides frigorigènes.

Les fluides frigorigènes halogénés risquent d'appauvrir la couche d'ozone dans la haute atmosphère. La valeur du potentiel de destruction de l'ozone, ODP (Ozone Depletion Potential), quantifie ce risque-là. Leur impact sur le climat est indiqué au moyen de la valeur GWP (Global Warming Potential, potentiel d'effet de serre). Elle quantifie de combien, sur une durée de 100 ans, une masse d'un gaz à effet de serre rapportée à la même masse de CO₂ contribue au réchauffement global. L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) publie régulièrement les valeurs ODP, GWP et les groupes de sécurité des fluides frigorigènes les plus importants.

Fluides frigorigènes non autorisés

Divers fluides frigorigènes ne sont plus autorisés à cause de leur effet nocif pour le climat respectivement pour la couche d'ozone. Les CFC font partie des fluides frigorigènes interdits. La plupart des HCFC tels que le R22 sont entre-temps aussi proscrits. Les fluides frigorigènes interdits sont listés au tableau 3.3. Dans les installations nouvelles, les fluides frigorigènes figurant sur cette liste ne peuvent pas être utilisés. Les installations existantes qui contiennent des fluides frigorigènes

non autorisés ne peuvent être ni vendues, ni agrandies ou transformées. Leur exploitation est autorisée, par contre il est interdit de les remplir à nouveau. Il est obligatoire de déclarer des installations existantes contenant plus de 3 kg de fluide frigorigène interdit (www.smkw.ch), tout comme de tenir un livret d'entretien et d'effectuer des contrôles d'étanchéité réguliers.

Fluides frigorigènes naturels

Pour les installations de climatisation, il faudrait en principe recourir à des fluides frigorigènes naturels. Cela s'applique notamment aux nouvelles installations, aux agrandissements et aux transformations. Les HFO sont également autorisées dans ce cas de figure. La tenue d'un livret d'entretien est obligatoire pour les installations contenant plus de 3 kg de fluide. Une vue d'ensemble des fluides frigorigènes naturels figure au tableau 3.4.

Fluides frigorigènes stables dans l'air

Depuis fin 2013, il est interdit de réaliser de nouvelles installations ainsi que d'agrandir et de transformer des installations existantes qui dépassent une puissance frigorifique donnée et qui recourent à des fluides frigorigènes

Tableau 3.3:
Fluides frigorigènes interdits.
¹GWP: Global Warming Potential, potentiel d'effet de serre.
²Groupe de sécurité selon la norme SN EN 378-1.
(Source: Office fédéral de l'environnement, état septembre 2020, les GWP sont issus du rapport IV de l'IPPC de 2007; pour les mélanges, les valeurs GWP correspondent aux pourcentages massiques respectifs.)

Statut légal des fluides frigorigènes selon l'annexe 2.10 de l'ORRChim	Catégorie		Fluides frigorigènes	GWP ¹	Groupe de sécurité ²	
Fluides frigorigènes appauvrissant la couche d'ozone, interdits	CFC (chloré, perhalogéné)	Fluides frigorigènes purs	R11	4750	A1	
			R12	10 900	A1	
			R13	14 400	A1	
			R13B1	7140	A1	
		Mélanges (blends)	R502 (mélange)	4657	A1	
	HCFC (chlorés, partiellement halogénés)	Fluides frigorigènes purs	R22	1810	A1	
			Mélanges (blends), en général à base de R22	R401A (MP39)	1182	A1
				R402A (HP80)	2788	A1
				R402B (HP81)	2416	A1
				R408A (FX-10)	3152	A1
R409A (FX-56)	1585	A1				
HCFO (fluorochloro-oléfinés partiellement halogénés)	Fluides frigorigènes purs	R1233zd(E)	3,7	A1		
		R1233zd(Z)	0,4	A1		
		R1224yd(Z)	0,8	A1		

stables dans l'air. Condition pour obtenir une dérogation: selon l'état de la technique, les fluides frigorigènes stables dans l'air sont incontournables si l'on veut respecter les exigences de sécurité de la norme [SN EN 378].

La déclaration est obligatoire pour les installations contenant plus de 3 kg de

fluide de ce type-là (www.smkw.ch), tout comme la tenue d'un livret d'entretien et des contrôles d'étanchéité réguliers. Pour des installations plus petites, l'utilisation des fluides frigorigènes listés au tableau 3.5 à la place des fluides naturels est autorisée, mais ils doivent être déclarés.

Tableau 3.4: Fluides frigorigènes autorisés sous réserve du respect des exigences de sécurité. ¹GWP: Global Warming Potential, potentiel d'effet de serre. ²R723 n'est pas répertorié dans la norme SN EN 378-1:2017. ³Nouveau groupe de sécurité selon la norme SN EN 378-1:2017. (Source: Office fédéral de l'environnement, état sep. 2020)

Statut légal des fluides frigorigènes selon l'annexe 2.10 de l'ORRChim	Catégorie		Fluides frigorigènes	GWP ¹	Groupe de sécurité ²
Frigorigènes autorisés sous réserve du respect des exigences de sécurité	Fluides frigorigènes naturels	Fluides frigorigènes purs	R170 (éthane)	6	A3
			R290 (propane)	3	A3
			R717 (NH ₃)	0	B2L ³
			R718 (H ₂ O)	0	A1
			R744 (CO ₂)	1	A1
			R600 (butane)	4	A3
			R600a (isobutane)	3	A3
			R1270 (propène)	2	A3
			Mélanges (blends)	R290/R600a	3
	R290/R170	3		A3	
R723 (DME/NH ₃)	8	- 4			
HFO (fluorochloroléfines partiellement halogénées)	Fluides frigorigènes purs	R1234yf	<1	A2L ³	
		R1234ze	<1	A2L ³	
		R1336mzz(Z)	2	A1	

Statut légal des fluides frigorigènes selon l'annexe 2.10 de l'ORRChim	Catégorie		Fluides frigorigènes	GWP ¹	Groupe de sécurité ²	
Frigorigènes stables dans l'air à utilisation restreinte dans les installations et appareils nouveaux	HFC/PFC (fluorocarbures partiellement ou totalement halogénés)	Fluides frigorigènes purs	R23	14 800	A1	
			R32	675	A2L	
			R125	1430	A1	
			R134a	3500	A1	
			R143a	4470	A2L	
			Mélanges (blends)	R404A	3922	A1
				R407C	1774	A1
				R407F	1825	A1
				R410A	2088	A1
				R413A	2053	A2
				R417A	2346	A1
				R422A	3143	A1
			R422D	2729	A1	
	R437A	1805	A1			
	R507A	3985	A1			
	R-508A	13 214	A1			
	R-508B	13 396	A1			
	Mélanges avec HFO (blends)	R448A	1386	A1		
		R449A	1396	A1		
		R450A	601	A1		
R-452A		2140	A1			
R-454C		146	A2L			
R-455A		146	A2L			
R513A		630	A1			

Tableau 3.5: Fluides frigorigènes stables dans l'air avec restriction d'utilisation pour les installations et les appareils nouveaux. ¹GWP: Global Warming Potential, potentiel d'effet de serre. ²Selon la norme SN EN 378-1:2017. (Source: Office fédéral de l'environnement, état sep. 2020)

Restrictions d'utilisation

L'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim) fixe les restrictions concernant l'utilisation des fluides frigorigènes stables dans l'air pour les installations frigorifiques stationnaires et les pompes à chaleur. Elles sont définies à l'aide de la puissance frigorifique \dot{Q}_0 . La puissance frigorifique indiquée par l'ORRChim correspond à la puissance utile de pointe d'une installation. Les valeurs y relatives sont listées au tableau 3.6.

Il faut notamment respecter les prescriptions légales suivantes, en vigueur depuis début 2020:

- Les règles relatives à la commercialisation d'installations stationnaires fon-

ctionnant avec des fluides frigorigènes stables dans l'air ont été renforcées (annexe 2.10, ch. 2.1, al. 3 [ORRChim]).

- Il est interdit de remplir des installations d'une capacité de 40 tonnes d'équivalent CO₂ ou plus avec des fluides frigorigènes stables dans l'air non régénérés dont le potentiel d'effet de serre est de 2500 ou plus (annexe 2.10, ch. 3.3 et 7, al. 5 [ORRChim]).

Groupes de fluides frigorigènes

La figure 3.4 représente les fluides frigorigènes par groupes en fonction de leur impact sur l'environnement:

- Les fluides frigorigènes contenant du chlore et/ou du fluor (marqués en rouge) tels que les R11, R12, R22 et R502 sont

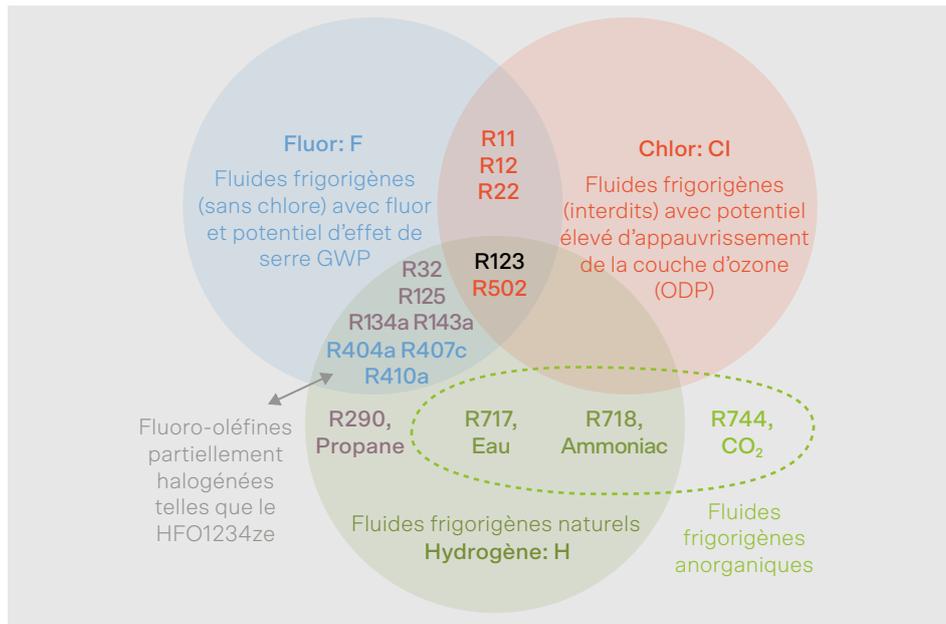


Figure 3.4: Fluides frigorigènes regroupés en fonction de leur impact environnemental; en rouge: fluides frigorigènes interdits; en vert: peuvent être utilisés sans danger; en bleu, noir et mauve: fluides frigorigènes autorisés mais avec potentiel d'effet de serre.

Tableau 3.6: Restrictions d'utilisation des fluides frigorigènes stables dans l'air selon l'ORRChim. (Source: Office fédéral de l'environnement, état avril 2018)

Installations de climatisation douce (fonctionnement pendant 8 mois/année au maximum)				Fluides frigorigènes, à titre d'exemples
GWP < 1900	Autorisé	Refroidissement à l'air non autorisé si la quantité du fluide frigorigène >0,4 kg/kW, respectivement >0,48 kg/kW avec UPC	Non autorisé	R134a, R407C
GWP > 1900	Autorisé	Refroidissement à l'air non autorisé si la quantité du fluide frigorigène >0,18 kg/kW, respectivement >0,22 kg/kW avec UPC	Non autorisé	R410A, R427A
		$Q_0 \leq 100 \text{ kW}$ $100 \text{ kW} < Q_0 \leq 600 \text{ kW}$	$Q_0 > 600 \text{ kW}$	
Installations frigorifiques (industrie)				Fluides frigorigènes, à titre d'exemples
GWP < 1900	Autorisé	Refroidissement à l'air non autorisé si la quantité du fluide frigorigène >0,4 kg/kW, respectivement >0,48 kg/kW avec UPC	Non autorisé	R134a, R407C
GWP > 1900	Autorisé	Refroidissement à l'air non autorisé si la quantité du fluide frigorigène >0,18 kg/kW, respectivement >0,22 kg/kW avec UPC	Non autorisé	R410A, R427A
		$Q_0 \leq 100 \text{ kW}$ $100 \text{ kW} < Q_0 \leq 400 \text{ kW}$	$Q_0 > 400 \text{ kW}$	

équivalents; l'EER se rapporte aux installations frigorifiques, le COP aux PAC.

$$EER = \frac{Q_{Ktot}}{P_e}$$

P_e = Puissance absorbée du compresseur, de la pompe de l'évaporateur, de la pompe du condenseur ainsi que des systèmes de régulation, de commande et de sécurité

European Seasonal EER

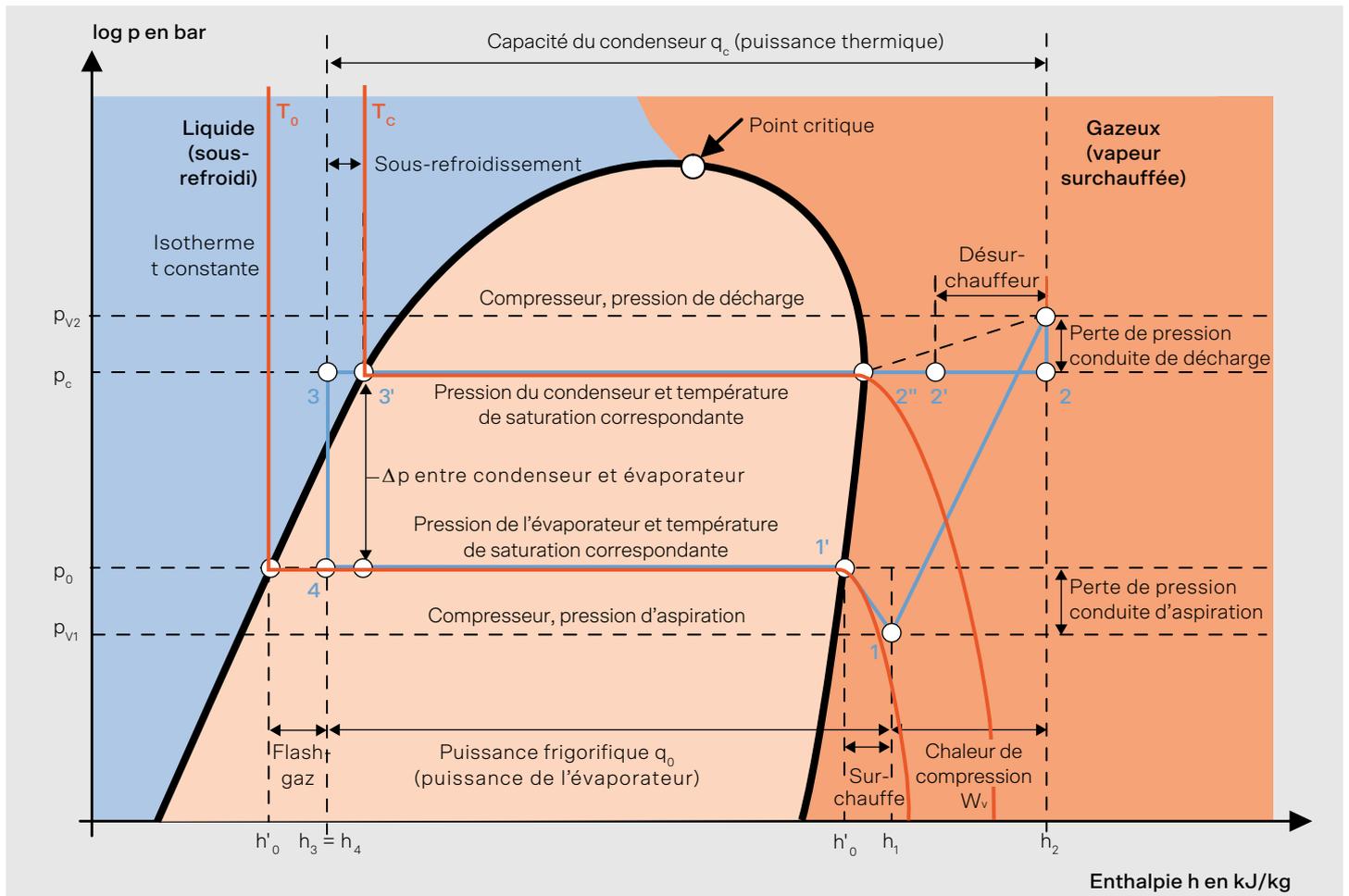
En Europe, on recourt souvent au coefficient saisonnier d'efficacité énergétique, European Seasonal EER (ESEER), pour évaluer les réfrigérateurs, les machines frigorifiques et les installations de climatisation. Il est déterminé par l'Eurovent Certification Company. Sur la base de l'EER à des régimes de 100 %, 75 %, 50 % et 25 %, l'ESEER (selon la norme SIA 382/1) est calculé de la manière suivante:

$$\begin{aligned} ESEER &= 0,03 \cdot EER_{100\%} \\ &+ 0,33 \cdot EER_{75\%} \\ &+ 0,41 \cdot EER_{50\%} \\ &+ 0,23 \cdot EER_{25\%} \end{aligned}$$

Processus cyclique

Dans les machines frigorifiques, le fluide frigorigène passe par quatre phases constituant un processus cyclique (figure 3.6): le trajet 4-1 correspond à la puissance de refroidissement et représente la puissance utile de l'installation frigorifique. Le trajet 1-2 est la puissance d'entraînement dépensée par le compresseur. Le trajet 2-3 correspond à la puissance thermique délivrée par le condenseur, donc à la chaleur perdue d'une installation de froid. Le coefficient de performance COP peut être déterminé à partir du rapport entre la puissance utile et la puissance d'entraînement. Le COP est utilisé pour les pompes à chaleur.

Figure 3.6: Processus frigorifique cyclique représenté dans un diagramme pression-enthalpie (ou diagramme log-p/h).



3.3 Charges frigorifiques

Exigences et quantification

En principe, les bâtiments doivent être conçus de manière à ce qu'il n'y ait aucun besoin de refroidissement mécanique en cas d'une utilisation normale; ils doivent donc être munis de protections solaires extérieures, par exemple. Lors de la planification, il est important de lister toutes les hypothèses et de faire ensuite le point avec les utilisateurs, respectivement le maître d'ouvrage ou l'exploitant. Ce n'est qu'après avoir obtenu l'accord de toutes les parties que doit être effectué le dimension-

nement de l'installation. Les apports thermiques internes rapportés à la surface de plancher nette ainsi que les possibilités d'une ventilation par les fenêtres permettent d'estimer si un refroidissement est nécessaire. Cette estimation peut se faire à l'aide du tableau 3.7, basé sur la norme SIA 382/1. Si une ventilation par les fenêtres n'est pas possible, par exemple en raison de conditions acoustiques, architecturales ou thermiques défavorables, il convient d'étudier, à partir des organigrammes des normes SIA 382/1 et SIA 382/2, les exigences techniques relatives à une installation frigorifique. Si sur la base de

Tableau 3.7 (à gauche): Estimation de la nécessité ou de l'opportunité d'un refroidissement selon la norme SIA 382/1.

Apports de chaleur internes par jour, en Wh/m ²			Refroidissement
Avec ventilation par les fenêtres jour et nuit	Locaux occupés, avec ventilation par les fenêtres	Sans ventilation par les fenêtres	
> 200	> 140	> 120	Nécessaire
140 – 200	100 – 140	80 – 120	Souhaitable*
< 140	< 100	< 80	Non nécessaire*

*Seul un refroidissement minimal est autorisé: 7 W/m² au maximum (surface de plancher nette). Dans les installations existantes ou dans le cadre de rénovations, on autorise même 12 W/m².

Tableau 3.8 (en bas): Evaluation des risques d'un confort thermique insuffisant et évaluation du système retenu. (Source: Cahier technique SIA 2021)

	Somme journalière moyenne de l'apport thermique total (apports de chaleur solaires et internes) Q _{total} en Wh/m ² d			
	150	250	350	450
Système de ventilation et de climatisation	Evaluation des risques d'un confort thermique insuffisant et évaluation du système retenu			
[0] Ventilation par les fenêtres uniquement** – Confort avec ventilation par les fenêtres, le jour – Choix d'un système technique	Event. suffisant Event. suffisant	Insuffisant Insuffisant	Inacceptable Insuffisant	Inacceptable Insuffisant
[1] Ventilation mécanique et ventilation nocturne – Taux de renouvellement d'air 2,0/h – Confort sans ventilation par les fenêtres, le jour – Confort avec ventilation par les fenêtres, le jour** – Choix d'un système technique	28 °C à 29 °C Event. suffisant Suffisant Adéquat	29 °C à 31 °C Insuffisant Event. suffisant Event. suffisant	30 °C à 32 °C Inacceptable Insuffisant Insuffisant	31 °C à 34 °C Inacceptable Insuffisant Insuffisant
[2] Comme 1 et refroidissement de l'air primaire – Confort sans ventilation par les fenêtres, le jour – Confort avec ventilation par les fenêtres, le jour** – Choix d'un système technique	26 °C à 27 °C Bon Très bon Optimal	27 °C à 29 °C Suffisant Bon Adéquat	28 °C à 31 °C Insuffisant Event. suffisant Event. suffisant	29 °C à 33 °C Inacceptable Insuffisant Insuffisant
[3] Comme 2 et refroidissement à 20 W/m ² , le jour – Confort sans ventilation par les fenêtres, le jour – Confort avec ventilation par les fenêtres, le jour** – Choix d'un système technique	<< 26 °C Bon Bon Surdimensionné	< 26 °C Bon Très bon Optimal	26 °C à 27 °C Suffisant* Bon Adéquat	27 ° à 28 °C Insuffisant* Event. suffisant* Event. suffisant*

Remarques:

* Si les apports de chaleur totaux sont élevés, le refroidissement supplémentaire (puissance ou temps de fonctionnement) doit être augmenté à son tour afin d'obtenir le confort thermique souhaité.

** La ventilation complémentaire par les fenêtres le jour doit être réalisable à l'emplacement donné (pollution sonore): une ouverture manuelle adéquate des fenêtres par les utilisateurs est présumée. En outre, la surface des fenêtres à ouvrir doit présenter une dimension minimale, c.-à-d. plus de 3% de la SRE.

cette première estimation un refroidissement mécanique semble nécessaire, celui-ci doit s'effectuer de la manière la plus efficace possible sur le plan énergétique. Voici quelques mesures envisageables:

- Utilisation de l'air extérieur plus frais pendant la nuit (refroidissement nocturne)
- Refroidissement direct à l'aide de sondes géothermiques, d'échangeurs de chaleur géothermiques, d'eaux souterraines ou de surface (free-cooling)
- Refroidissement par absorption à partir de chaleur perdue, de chaleur à distance provenant d'une UIOM, d'énergie solaire thermique, etc.

Pour dimensionner correctement un générateur de froid, il convient tout d'abord de calculer la puissance frigorifique selon la norme [SIA 382/2]. A cet effet, on peut par exemple utiliser les valeurs standard des apports de chaleur totaux selon la norme [SIA 2024] sous forme de somme journalière moyenne. Celles-ci fournissent des données de base que la pratique a confirmées.

Le calcul de la puissance frigorifique requise est exigeant (figure 3.7) et doit être effectué par l'ingénieur en technique du bâtiment. Il est donc primordial que les planificateurs/trices estiment la charge thermique suffisamment tôt dans l'élaboration du projet. Voici quelques facteurs déterminants à ce propos: occupation moyenne et maximale par des personnes, temps de fonctionnement et durée d'activation des apports de chaleur internes, conditions souhaitées ou prescrites dans la pièce. Important: il faut lister toutes les hypothèses et faire ensuite le point avec les utilisateurs, respectivement le maître d'ouvrage ou l'exploitant. Ce n'est qu'après avoir obtenu l'accord de toutes les parties que doit être effectué le dimensionnement définitif de l'installation.

Apports de chaleur dans la pièce

Les apports de chaleur qui interviennent dans une pièce se divisent en apports externes et apports internes. La figure 3.8. donne un aperçu des différentes sources.

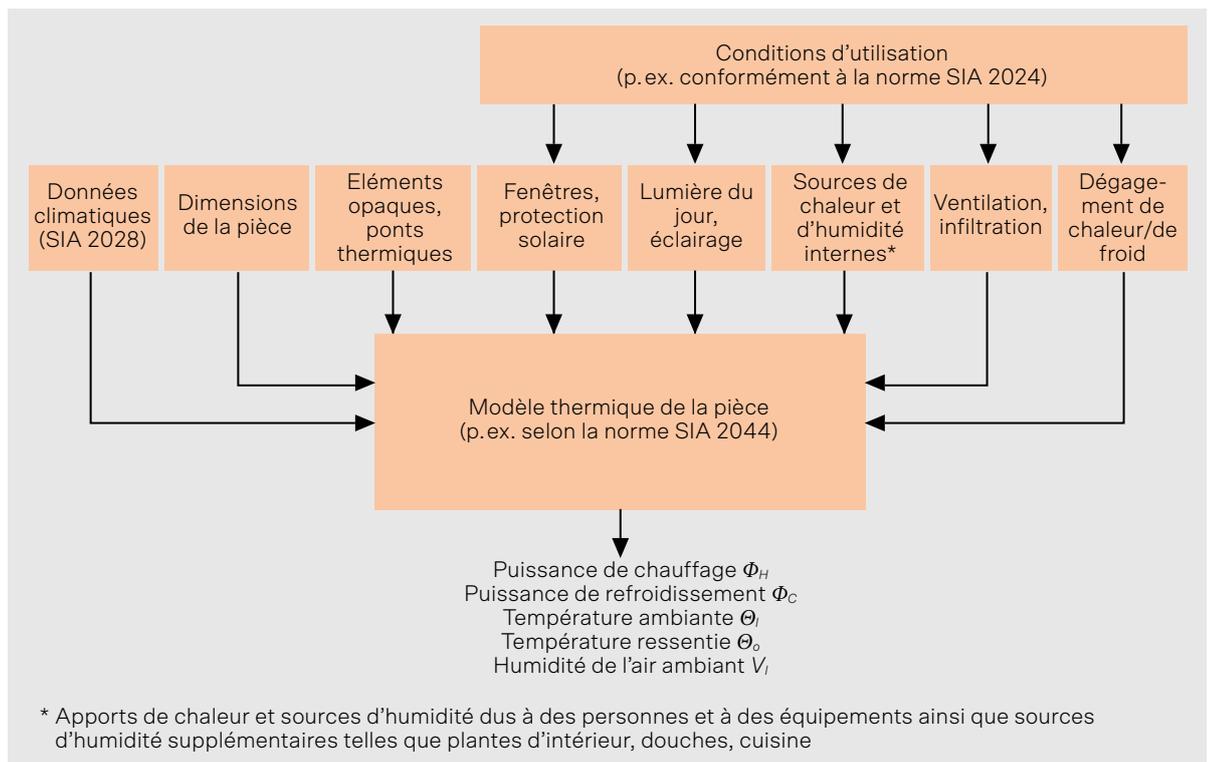


Figure 3.7: Modèle thermique du local selon SIA 382/2 (descriptions dans les normes SIA 2024 et 2044).

Apports de chaleur externes: il s'agit là des apports parvenant depuis l'extérieur dans le bâtiment, soit par transmission ou encore par rayonnement. Ils sont déterminés par les facteurs exposés ci-après:

- Situation géographique du bâtiment: orientation, emplacement, altitude, rayonnement solaire (rayonnement direct et diffus).
- Ombrage du bâtiment, protection solaire extérieure et mobile des éléments translucides, utilisation correcte de la protection solaire, aménagement et matérialisation du parvis du bâtiment, garantie d'un refroidissement nocturne efficace sur le plan énergétique.
- Géométrie du bâtiment (facteur d'enveloppe), mode de construction optimal (éléments opaques et fenêtres), façades et toit ventilés; détermination de la part appropriée de vitrages en fonction de l'orientation.
- Choix de la masse d'accumulation optimale du bâtiment avec activation de l'accumulateur pour un climat ambiant homogène; en présence d'éléments translucides tels que des fenêtres ou des lanterneaux, la chaleur parvient immédiatement dans le bâtiment. En revanche, en raison de l'inertie de masse,

la chaleur pénètre à travers des éléments de construction opaques avec un décalage de plusieurs heures dans les locaux. Dans tous les cas, le facteur de transmission totale d'énergie (valeur g) doit être inférieur à 15%.

Le facteur de transmission totale d'énergie du vitrage avec protection solaire (valeur g) désigne le rapport entre l'énergie solaire qui parvient dans la pièce et l'énergie du rayonnement solaire vertical à l'extérieur. Un bon vitrage et des stores à lamelles extérieurs clairs, par exemple, permettent d'obtenir un facteur favorable. Le tableau 3.9 montre que les fenêtres dotées de stores à lamelles extérieurs clairs présentent les valeurs les plus basses. Par conséquent, les locaux refroidis et climatisés devraient autant que possible être pourvus de ce type de stores (valeur g inférieure à 0,15), [SIA 380/1], [EN 13363-1/2].

Les stores à lamelles extérieurs permettent de réduire le rayonnement solaire par les fenêtres à tel point que ce sont avant tout les apports de chaleur internes qui sont déterminants pour le calcul de la puissance frigorifique requise. C'est pourquoi les principes sui-

Type de vitrage	Description de la combinaison: vitrage avec dispositif de protection solaire	Facteur de transmission totale d'énergie g
2-IV	Verre non teinté	0,75
	Verre non teinté + stores à lamelles extérieurs clairs	0,15
	Verre non teinté + stores à lamelles intérieurs clairs	0,45
2-IV-IR	Verre de protection thermique	0,55
	Verre de protection thermique + stores à lamelles extérieurs clairs	0,12
	Verre de protection thermique + stores à lamelles intérieurs clairs	0,47
2-IV	Verre réfléchissant	0,26
3-IV	Verre non teinté	0,70
	Verre non teinté + stores à lamelles extérieurs clairs	0,13
	Verre non teinté + stores à lamelles intérieurs clairs	0,43
3-IV-IR	Verre de protection thermique avec 2 revêtements	0,45
	Verre de protection thermique + stores à lamelles extérieurs clairs	0,11
	Verre de protection thermique + stores à lamelles intérieurs clairs	0,42
3-IV	Verre réfléchissant	0,23

Tableau 3.9:
Exemples de facteurs de transmission totale d'énergie de différents vitrages (valeur g).
IV: vitrage isolant

vants s'appliquent aux locaux ayant des apports de chaleur internes élevés:

- Une protection solaire optimale doit être réglable de sorte à laisser passer assez de lumière du jour dans les locaux. L'éclairage ne doit en conséquence être allumé que dans les zones situées à plus de 5 m des fenêtres.
- Dans de telles zones périphériques et sans éclairage artificiel enclenché, les calculs se basent sur des apports externes de 10 W/m².

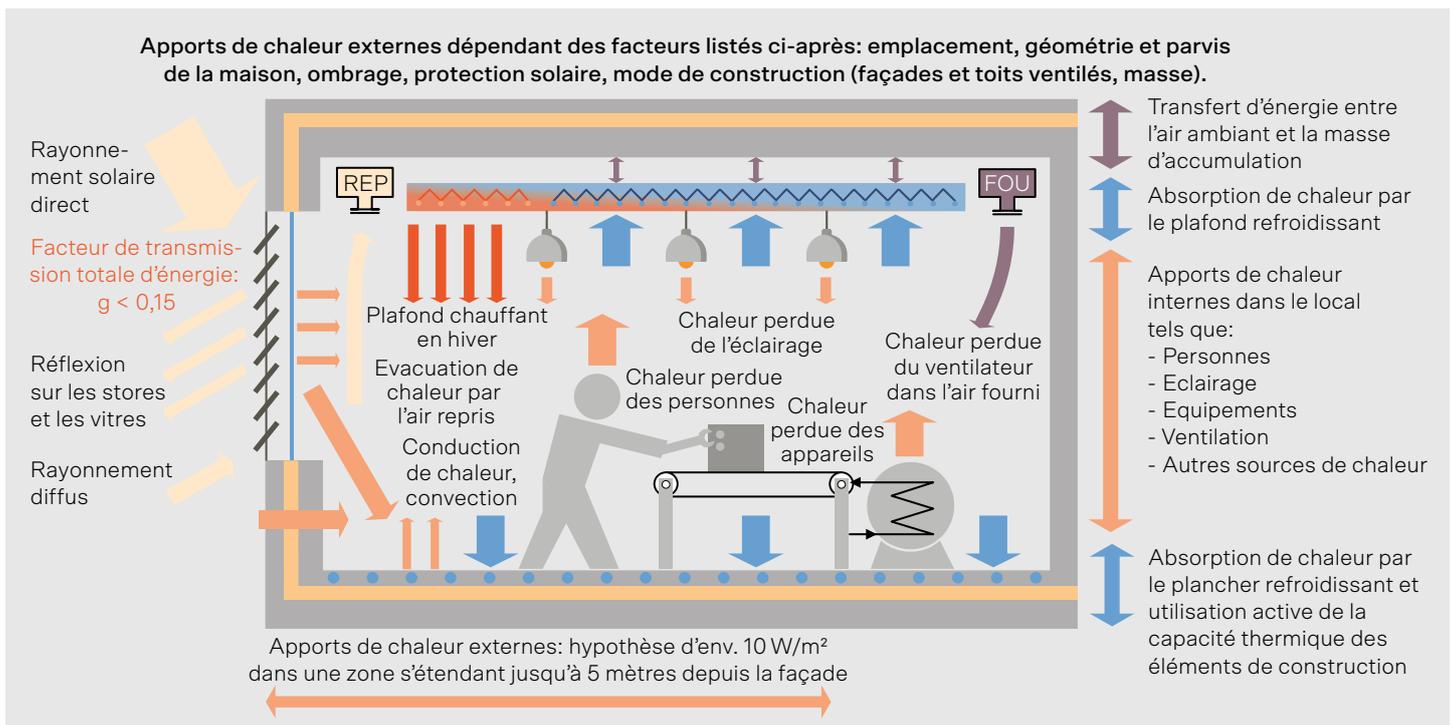
Apports de chaleur internes: il s'agit là des sources de chaleur perdue à l'intérieur d'un bâtiment. Dans le cas d'un bureau individuel ou d'un bureau collectif (selon la norme [SIA 2024]), il est question, entre autres, des sources énumérées ci-après:

- Personnes: les facteurs suivants sont déterminants: occupation, activité, habillement et heures à pleine charge en h/d. Exemple: à une température ambiante de dimensionnement de 26 °C et pour une activité de bureau, le dégage-

Tableau 3.10: Dégagement de chaleur par personne, en watts.

Cat.	Activité	Domaine d'application	Dégagement de chaleur sensible resp. perceptible (q_s) et latent (q_l) en watts par personne, en fonction de la temp. ambiante							
			26 °C		24 °C		22 °C		20 °C	
			q_s	q_l	q_s	q_l	q_s	q_l	q_s	q_l
1	Assis au repos	Théâtre, école primaire	61	41	68	34	74	28	79	23
1	Assis, travail très facile	Ecole secondaire	62	54	70	46	77	39	80	36
1	Travail de bureau	Bureau, hôtel, université	63	68	71	60	80	51	86	45
2	Debout, déplacement lent	Grand magasin, boutique, banque (guichet)	64	83	75	72	82	65	87	60
2	Assis	Restaurant	71	91	83	79	91	71	96	66
2	Travail d'atelier facile	Usine, travail facile	72	148	86	134	100	120	115	105
3	Danse	Salle de danse	80	169	95	154	109	140	124	125
3	Marche	Usine, travail assez astreignant	97	196	112	181	127	166	143	150
3	Travail astreignant	Piste de bowling, usine	142	284	154	272	167	259	184	242

Figure 3.8: Influences thermiques sur une pièce.



ment de chaleur sensible (perceptible) est de 63 W/personne environ.

- Equipements: les appareils avec leurs heures de mise en veille et les heures à pleine charge en h/d. Exemples: dans un bureau individuel ou collectif, la chaleur perdue des outils de travail tels que les ordinateurs, les écrans, les imprimantes, les réfrigérateurs, les appareils de bureau et les appareils ménagers est comprise entre env. 3 et 7 W/m² dans les constructions nouvelles. Dans les bâtiments existants, elle s'élève jusqu'à 15 W/m². Pour les centres de calcul modernes dotés d'équipements de pointe ou pour les cuisines de production, l'apport de chaleur interne peut de nos jours parfois même s'élever à plus de 2000 W/m².
- Eclairage: les facteurs suivants sont déterminants: la puissance électrique spécifique, les facteurs de correction pour détecteurs de présence et variables ainsi que les heures à pleine charge en h/d. Exemple: dans un bureau individuel ou collectif, la chaleur perdue de l'éclairage du local est comprise entre env. 11,6 et 15,9 W/m².
- Ventilation: les facteurs déterminants sont les suivants: puissance spécifique des ventilateurs et les heures à pleine charge. Exemple: dans un bureau individuel ou collectif, la chaleur perdue d'un ventilateur dans le local est comprise entre 0,9 et 1,4 W/m² environ dans les constructions nouvelles. Dans les bâtiments existants, elle peut s'élever jusqu'à 2,3 W/m².
- Humidification: si un local doit être humidifié ou déshumidifié, la consommation d'énergie augmente. Elle ne devrait ainsi s'appliquer qu'à des pièces spéciales telles que salles d'opération, unités de soins intensifs et salles de radiologie.

Le tabl. 3.10 représente le dégagement de chaleur par pers. pour différentes activités et températures ambiantes, ceci à un taux d'humidité ambiante relative de 30 à 70 %. La figure 1.17 fournit d'autres informations à propos de la chaleur dégagée par des personnes.

3.4 Production de froid

Dimensionnement

Après le calcul de la charge frigorifique maximale, la machine frigorifique est dimensionnée, y compris le refroidissement en circuit fermé. Voici les points qui doivent alors être pris en compte (voir aussi la figure 3.2):

- Condenseur/refroidisseur: la température de fonctionnement dans le circuit eau-antigel devrait être fixée au niveau le plus bas possible, par exemple à 34/28 °C. Une exploitation maximale en free-cooling du refroidisseur devrait être garantie notamment en hiver, à l'entre-saison ainsi que durant les nuits d'été. En présence d'une utilisation de la chaleur perdue (UPC), par exemple pour chauffer de l'eau, il est possible de faire monter les températures de fonctionnement à une température comprise entre 50 et 70 °C, pendant de courtes durées et selon le fluide frigorigène choisi.
- Utilisation de la chaleur perdue: la rentabilité d'une UCP à partir d'un processus frigorifique doit toujours être vérifiée. La première possibilité consiste à intégrer un condenseur-désurchauffeur. Ce dernier permet d'utiliser au maximum 15 % de la chaleur perdue à un niveau de température plus élevé, p. ex. pour la production d'eau chaude (désurchauffage entre le compresseur et le condenseur, env. 60 °C). Cette solution présente un avantage puisque la machine frigorifique peut alors se passer d'une pression de condensation plus élevée. Il en résulte des indices de performance supérieurs (COP/EER) et une durée de vie technique plus longue de la machine frigorifique. La seconde possibilité se résume à utiliser l'ensemble de la chaleur du condenseur pour les consommateurs basse température tels que le chauffage au sol ou les ECTA. Si des températures de service supérieures à env. 50 °C sont requises, la température de condensation et donc la pression côté fluide frigorigène doivent être augmentées. Cette solution présente l'avantage de permettre l'utilisation d'une grande partie de la chaleur rejetée.

– Evaporateur: les températures de l'eau de refroidissement au niveau de l'évaporateur doivent être aussi élevées que possible. La norme [SIA 382/1] définit les exigences suivantes par rapport à la température aller: climatisation sans déshumidification $\geq 14^\circ\text{C}$, avec déshumidification partielle en cas de plafonds refroidissants $\geq 10^\circ\text{C}$, avec déshumidification contrôlée $\geq 6^\circ\text{C}$. Avec un plancher refroidissant, des plafonds refroidissants et des éléments refroidissants (ECTA), il est même possible d'augmenter la température aller et la température retour du fluide frigorigène à au moins $18/21^\circ\text{C}$.

– Machine frigorifique: étant donné que les machines fonctionnent le plus souvent dans la plage de charge partielle, il est important qu'elles soient dotées d'une régulation de la puissance. Pour cette raison, leur rendement maximal [selon la norme SIA 381/1 \rightarrow ESEER] doit être atteint dans une plage de puissance de 50 à 75%. C'est dans cette plage que la machine frigorifique fonctionne pendant environ 74% de l'ensemble des heures de fonctionnement.

– Fluide frigorigène: le choix du fluide frigorigène optimal permet d'augmenter l'efficacité de 10 à 15%.

– Accumulateurs: ils sont à concevoir de sorte que chaque compresseur puisse fonctionner sans interruption pendant au moins 20 min. après avoir été enclenché. En outre, l'écart de température entre l'entrée et la sortie devrait être de $\geq 6\text{ K}$.

– Distribution de froid: il faut garantir au moyen de circuits d'étranglement que le débit massique est accordé à tout moment à la charge frigorifique actuelle. La perte de pression dans les conduites devrait être inférieure à 80 Pa/m (valeur indicative).

– Perte de pression: afin d'éviter les défaillances, les débits au droit du condenseur et de l'évaporateur devraient être aussi constants que possible, avec une perte de pression côté eau de $0,3\text{ bar}$ au maximum.

Concepts techniques des installations frigorifiques

Il existe trois technologies principales pour la production de froid (tableau 3.11). L'EER désigne ici la consommation spé-

Tableau 3.11:
Concepts techniques pour la production de froid
(Source: HKW Infocentrum, Internet)

Concepts techniques des installations frigorifiques				
	1. Installation frigorifique à compression	2. Installation frigorifique à absorption	3. Installation frigorifique à adsorption	4. Installation DEC ¹
Effet physique de refroidissement	Evaporation du fluide frigorigène (processus d'évaporation à froid)			Evaporation du fluide frigorigène
Principe de compression	Compression mécanique	Thermique, circuit de la solution d'absorption	Thermique, adsorption de vapeur d'eau	Déshumidification par sorption
Energie d'entraînement	Energie électrique	Energie thermique 85 à 180°C	Energie thermique 55 à 95°C	Energie thermique 50 à 100°C
Fluides frigorigènes	Hydrocarbures chlorés ou sans chlore	Eau avec bromure de lithium (LiBr) ou ammoniac (NH_3) comme solution d'absorption	Eau avec composé solide comme agent d'adsorption (gel de silice)	Eau
Consommation spécifique d'énergie primaire ²	1,3 à 1,65	0,3 à 1,3	0,4 à 0,6	0,3
Indice de performance/EER	3 à 5	0,6 à 1,3 (LiBr) 0,3 à 0,7 (NH_3)	0,4 à 0,6	0,5 à 0,7
Température du froid	-50 à 15°C	5 à 15°C (LiBr) -50 à 5°C (NH_3)	6 à 15°C	4 à 8 K déshumidification
Puissance frigorifique	50 à 5000 kW	15 bis 5000 kW (LiBr) 150 bis 5500 kW (NH_3)	50 à 450 kW	20 à 350 kW

¹ Desiccative and Evaporative Cooling, à savoir refroidissement par séchage et évaporation.

² Consommation spécifique d'énergie primaire calculée à partir du rapport entre la quantité de froid produite et l'énergie électrique ou thermique utilisée. En guise d'exemple, une installation frigorifique à absorption produit $0,3$ à $1,3$ kilowattheure de froid par kilowattheure de chaleur.

cifique d'énergie primaire, qui est calculée à partir du rapport entre la quantité de froid produite et l'énergie électrique ou thermique utilisée.

Installations frigorifiques à compression: pour produire du froid climatique, on utilise le plus souvent des machines frigorifiques à compression fonctionnant à l'électricité. Pour de faibles puissances, on recourt plutôt à des compresseurs à pistons et des compresseurs scroll, pour des puissances moyennes à élevées, plutôt à des machines à vis et des turbomachines. Le tableau 3.12 donne un aperçu des solutions techniques les plus courantes.

Installations frigorifiques à absorption:

le principe de fonctionnement de l'absorbeur repose sur le fait que l'eau en dépression s'évapore même à des températures basses (à env. 5 °C à une pression de 800 à 900 Pa p. ex.). Pour maintenir le processus, une solution de bromure de lithium fixe et condense les molécules d'eau dans l'air. La solution saline ainsi diluée est ensuite à nouveau concentrée par évaporation de l'eau, dans le bouilleur, moyennant une forte chaleur. La vapeur d'eau ainsi générée se condense dans le refroidisseur, et l'eau de condensation est réacheminée jusqu'à l'évaporateur. Le circuit de l'absorbeur est ainsi bouclé.

Tableau 3.12: Types de compresseurs. Source: Pompes à chaleur. *à B0/W35, à savoir à une température aller de 0 °C côté froid de la machine frigorifique et de 35 °C côté chaud.

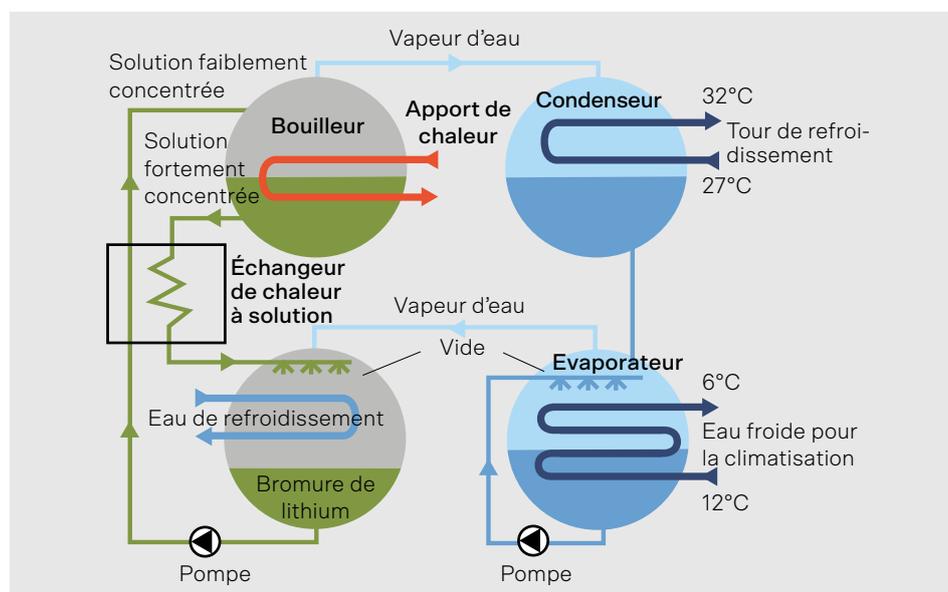


Figure 3.9: Principe de la génération de froid au moyen de l'absorption.

Type de compresseur	Pistons	Pistons en spirale (scroll)	Vis	Turbo
Principe de fonctionnement	Déplaceur	Déplaceur	Déplaceur	Turbomachine
Compression	Statique	Statique	Statique	Dynamique
Volume de déplacement	Géométrique	Géométrique	Géométrique	Dépendant de la contre-pression
Refoulement	Par impulsions	Constant	Constant	Constant
Débit volumique, plage	Jusqu'à 1000 m ³ /h	Jusqu'à 500 m ³ /h	100 Jusqu'à 10 000 m ³ /h	100 Jusqu'à 50 000 m ³ /h
Puissance de chauffe, plage*	Jusqu'à 800 kW	Jusqu'à 400 kW	80 Jusqu'à 8000 kW	80 Jusqu'à 40 000 kW
Rapport de pression standard (à une vitesse)	Jusqu'à 10	Jusqu'à 10	Jusqu'à 30	Jusqu'à 5
Possibilité de régulation à régime constant	Vitesses	Difficile	A vitesse variable	A vitesse variable
Régulation du régime	Possible	Possible	Possible	Possible
Sensibilité aux chocs hydraul.	Elevée	Faible	Faible	Faible
Production de vibrations	Oui	Non	Non	Non

Vu que les modules frigorifiques à absorption fonctionnent sans aucune pièce mécanique mobile, ils peuvent quasiment se passer d'entretien. Pour cette raison, la durée d'utilisation minimale des installations frigorifiques à absorption est supposée être de 20 ans, tandis que celle d'une machine frigorifique à compression est seulement de 15 ans au minimum. A l'inverse d'une machine frigorifique à compression, l'adsorbant ne nécessite quasiment aucune énergie électrique et son fluide frigorigène ne contient aucun hydrocarbure nocif pour l'environnement. L'encombrement d'une installation frigorifique à absorption avec son refroidissement en circuit fermé est cependant nettement supérieur à celui d'une machine frigorifique à compression. Les machines frigorifiques à absorption sont intéressantes notamment lorsque la chaleur achetée est très bon marché ou qu'elle provient d'énergies renouvelables.

Installations frigorifiques à adsorption: dans le domaine de la technique de processus, le terme «adsorption» désigne le

phénomène par lequel des gaz ou des fluides se fixent sur une surface solide, tandis que la désorption qualifie le phénomène contraire. En conséquence, une installation frigorifique à adsorption est composée d'un adsorbant, respectivement d'un désorbant et d'un évaporateur, respectivement d'un condenseur. Ces composants principaux sont soit montés dans un seul contenant ou alors reliés entre eux par un tuyau (figure 3.10). L'avantage de l'adsorption réside dans un froid qui peut être généré simplement en tempérant l'agent de sorption. Pour cette raison, le contenant peut être hermétique et étanche au gaz. Si c'est l'eau qui fait office de fluide frigorigène, une machine frigorifique à adsorption travaille toujours en dépression. Etant donné que l'adsorption du fluide frigorigène va de pair avec la condensation de ce dernier, elle est favorisée par une température basse et une pression élevée. L'adsorption réduit le volume du fluide frigorigène; de la chaleur est libérée. La désorption va de pair avec l'évaporation du fluide frigorigène, elle produit par conséquent l'effet contraire.

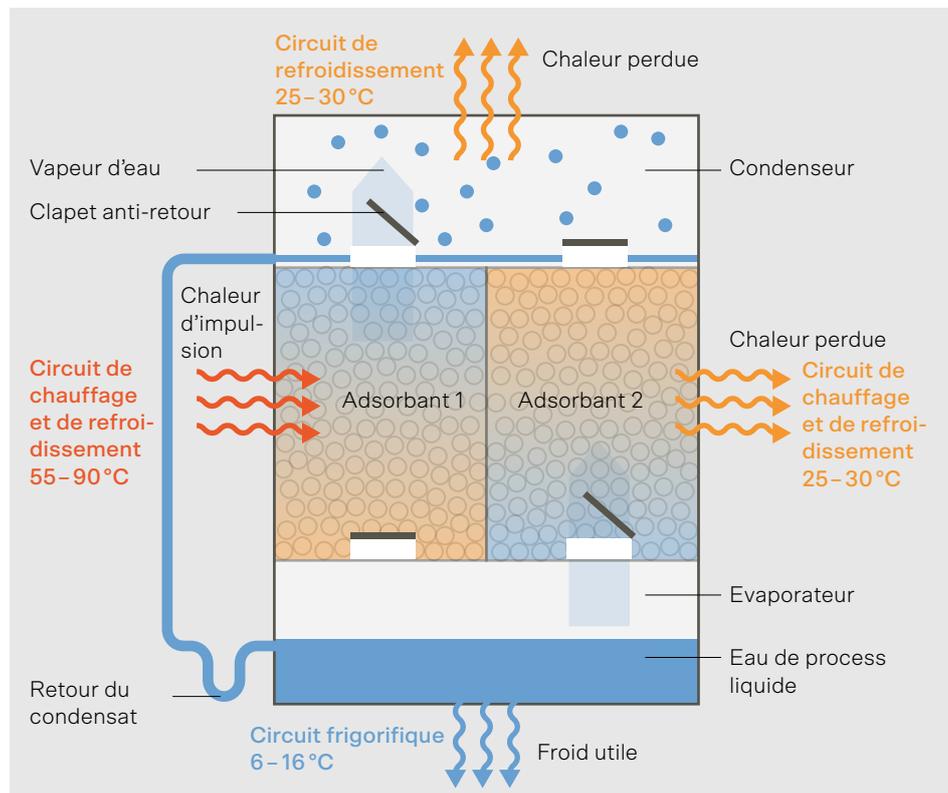


Figure 3.10: Structure d'une machine frigorifique à adsorption. (Source: Sortech, BHKW-Infozentrum)

Lors de la désorption et à pression constante, la température est toujours égale au point d'ébullition du fluide frigorigène. La différence principale entre machines frigorifiques à compression et celles à sorption est donc la suivante: dans le cas des machines à compression, l'énergie primaire est fournie sans exception par un travail mécanique, dans celui des machines à sorption, elle l'est sous forme de chaleur.

Desiccative and Evaporative Cooling (DEC): le refroidissement par évaporation constitue une alternative aux machines frigorifiques. Ce procédé est connu depuis bien longtemps dans l'industrie. Pour la climatisation douce, il n'a pu s'imposer qu'au cours des 15 dernières années sous l'appellation de refroidissement adiabatique ou d'humidification adiabatique de l'air rejeté. Ces systèmes sont surtout utilisés pour la ventilation douce. La figure 3.11 en illustre le principe.

Vu que le refroidissement direct par humidification dans le flux d'air neuf ou d'air fourni augmente l'humidité relative de l'air fourni, il provoque généralement des réclamations de la part des utilisateurs. Cela est dû au fait que l'évacuation de la chaleur du corps humain par évapotranspiration est plus difficile à un taux plus élevé d'humidité de l'air. La sueur reste sur la peau sous forme de film aqueux, ce qui entraîne une sensation d'inconfort. Pour cette raison, les occasions qui permettent de recourir à ce procédé-là sont limitées dans le domaine de la climatisation douce. Pour une climatisation assistée par sorption, il existe un procédé spécial pour refroidir l'air, à savoir la technique DEC. Celle-ci consiste à faire suivre la sorption (séchage à l'air) d'un refroidissement par évaporation, d'où son nom: Desiccative and Evaporative Cooling. Ce système est un perfectionnement du refroidissement par évaporation permettant d'atteindre des puissances de refroidissement supérieures (figure 3.12).

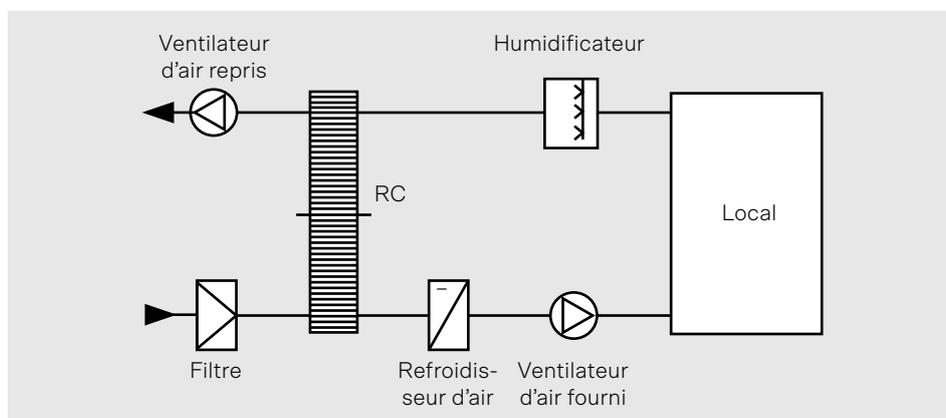


Figure 3.11: Humidification adiabatique de l'air rejeté.

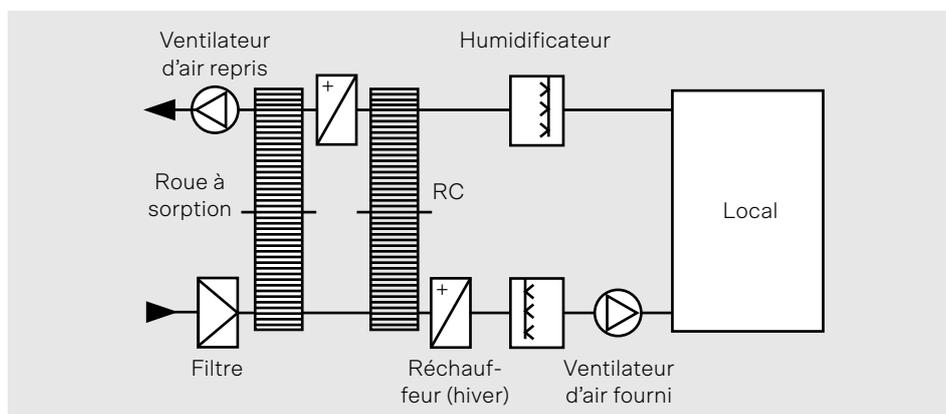


Figure 3.12: Refroidissement par sorption, respectivement d'un système DEC (Desiccative and Evaporative Cooling, refroidissement par séchage et évaporation).

La technique DEC réunit dans un seul procédé toutes les tâches du traitement de l'air qui ont lieu dans une installation de climatisation, à savoir la déshumidification, le refroidissement, le post-chauffage. L'évaporation de l'eau est alors utilisée pour refroidir l'air.

La première phase du procédé DEC consiste à déshumidifier l'air qu'il s'agit de refroidir. Pour ce faire, un matériau à sorption, un gel de silice par exemple, retire l'humidité de l'air, ce qui a pour effet de le réchauffer. Dans une seconde phase, l'air peut être refroidi en plusieurs étapes par récupération de l'énergie, ceci au moyen d'un refroidisseur d'air ou d'une humidification adiabatique. Le li-

quide absorbé par le gel de silice doit ensuite être extrait à l'aide de chaleur (désorption).

Froid industriel: le froid industriel représente un cas spécial. Son objectif est de refroidir à la température souhaitée les chambres froides et les meubles frigorifiques situés dans les cuisines mêmes. Une grande partie de la chaleur perdue peut alors être utilisée directement pour le préchauffage de l'eau chaude – avec des durées d'amortissement relativement courtes de moins de 5 ans. La chaleur résiduelle doit nécessairement être évacuée via une installation frigorifique ou un aérorefroidisseur.

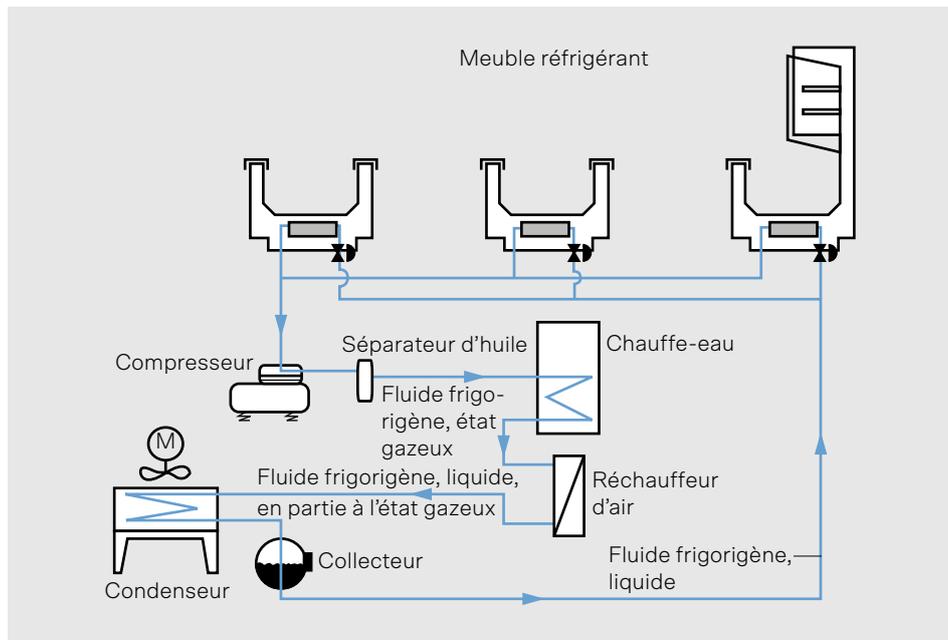


Figure 3.13: Production de froid industriel à l'aide d'un meuble réfrigérant.

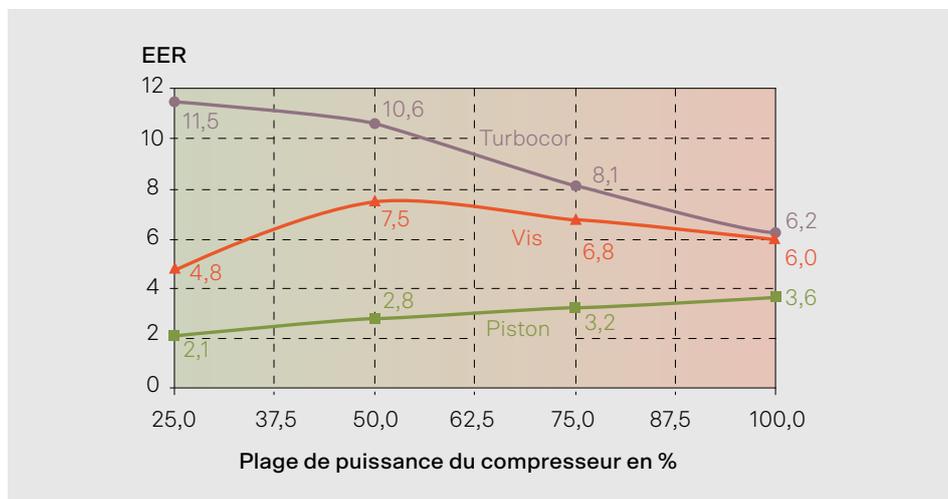


Figure 3.14: Comparaison des coefficients EER de différents types de compresseurs ayant une puissance d'évaporateur d'env. 400 kW. Hypothèse: températures de l'eau de refroidissement à l'évaporateur = 10/16°C; températures de refroidissement = 34/28°C.

Comportement en charge partielle d'une machine frigorifique

Selon la définition ESEER, une installation frigorifique fonctionne pendant environ 74 % du temps de fonctionnement total dans une plage de puissance comprise entre 50 et 75 %. Pour les installations de climatisation douce, ce n'est que pendant les mois d'été les plus chauds, donc en juillet et en août, que la puissance totale du compresseur est requise. C'est pourquoi il est primordial de prendre en compte le comportement en charge partielle dans le calcul de rentabilité. Par comparaison avec les compresseurs à pistons et les compresseurs à vis, les machines frigorifiques à turbo, respectivement les compresseurs Turbocor présentent un EER nettement plus élevé en charge partielle (figure 3.14). Cela est entre autres dû au fait que les turbocompresseurs «exempts d'huile» sont dotés de rotors logés de façon magnétique et qu'ils fonctionnent à des régimes pouvant aller jusqu'à 40 000 tr/min. Il en résulte une très large plage de puissance utilisable. Le recours à un «évaporateur noyé» permet d'augmenter encore d'un cran l'efficacité énergétique des turbomachines. A cet effet, un excédent de liquide frigorigène est acheminé dans l'évaporateur et le niveau est maintenu constant à

l'aide d'un régulateur de niveau. La valeur k est ainsi améliorée, car les tuyaux sont humectés par le fluide frigorigène liquide. En outre, tout problème de réacheminement de l'huile est évité, car l'ensemble du circuit frigorifique en est dépourvu.

Lorsque l'on utilise des turbocompresseurs, il est important qu'ils fonctionnent toujours dans une plage de puissance peu élevée, comprise entre 25 et 75 % au maximum. Ceci permet d'atteindre un coefficient EER élevé et par là même une faible consommation électrique. Dans ce cas de figure, il est à noter qu'il faut utiliser côté condenseur un aérorefroidisseur hybride avec une basse température de service (34/28 °C).

Refroidissement

Pour évacuer la chaleur de condensation d'un générateur de froid, on utilise des aérorefroidisseurs. Ceux-ci reposent sur les principes techniques exposés ci-après:

Les aérorefroidisseurs ouverts ou humides: l'eau de refroidissement réchauffée dans le condenseur de la machine frigorifique est mise en contact direct avec l'air extérieur; elle se refroidit par évaporation.

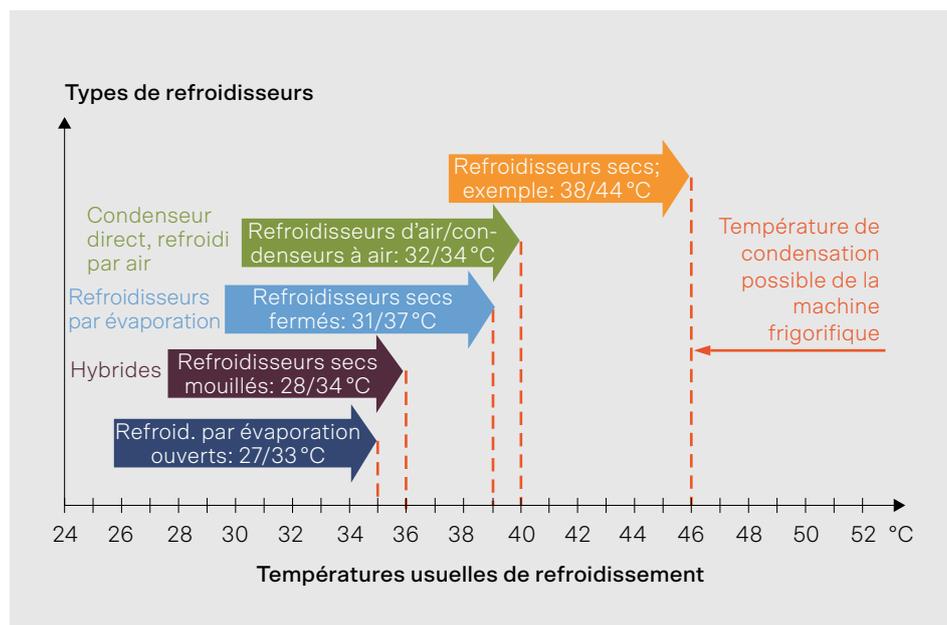


Figure 3.15: Plages de température des refroidisseurs.

Avantages: faible encombrement, coefficient de performance plus élevé de la machine frigorifique grâce aux basses températures de refroidissement (33/27°C).

Inconvénients: coûts d'exploitation et d'entretien élevés, traitement de l'eau et pertes occasionnées par évaporation et purges, risque de gel, formation de bouffées de brouillard, souillure de l'eau de refroidissement par d'éventuels produits de corrosion, formation d'algues et de légionelles.

Aérorefroidisseurs fermés ou secs:

l'eau de refroidissement reste séparée de l'air extérieur. Elle est refroidie dans un échangeur de chaleur et sécurisée à l'aide d'un vase d'expansion.

Avantages: aucune consommation d'eau, investissement minime, coûts d'entretien et de maintenance plus faibles.

Inconvénients: encombrement important et consommation d'électricité plus élevée pour ce qui est des compresseurs frigorifiques.

Aérorefroidisseurs hybrides: ces systèmes combinent les principes des aérorefroidisseurs ouverts et de ceux qui sont fermés. En présence de températures extérieures relativement basses, ils fonctionnent la plupart du temps comme des refroidisseurs secs conventionnels. Lors de températures extérieures plus élevées, une quantité bien dosée d'eau déminéralisée est pulvérisée sur la surface de refroidissement, qui s'évapore à un pourcentage allant de 70 à 100 % – ce qui multiplie significativement la puissance de refroidissement. Les aérorefroidisseurs hybrides avec des températures de refroidissement de 34/28°C représentent une solution optimale, notamment sur le plan des besoins en énergie et sur celui de l'encombrement. Si les coûts d'investissement sont prioritaires, il est recommandé de recourir à des refroidisseurs secs, fiables et irréprochables sur le plan hygiénique.

Avantages: faible encombrement, meilleur coefficient de performance de la machine frigorifique, coûts d'énergie et d'eau minimaux, aucune bouffée de brouillard, pas d'eau en circulation et donc aucune formation d'algues ni de légionelles.

Inconvénients principaux: investissement plus élevé et traitement d'eau requis, souvent par osmose inverse.

Free Cooling: pendant les mois d'hiver ou durant les nuits d'été, le système du «refroidissement libre» utilise les basses températures extérieures pour produire, au moyen de l'aérorefroidisseur et sans soutien du compresseur, de l'eau de refroidissement. A cet effet, un échangeur de chaleur supplémentaire doit être installé pour séparer le système du circuit de refroidissement vis-à-vis du circuit de froid climatique. Le Free Cooling est une solution particulièrement recommandée pour les systèmes de dégagement de chaleur avec des températures d'eau $\geq 18^\circ\text{C}$ tels que les planchers refroidissants, les plafonds refroidissants ou encore les ECTA. En Suisse, on y recourt la plupart du temps lorsque les températures sont inférieures à 8°C . Cela permet de réduire jusqu'à 35 % les coûts d'exploitation annuels d'une installation frigorifique. En outre les compresseurs sont ménagés, car les heures de fonctionnement annuelles sont moindres. Des informations supplémentaires à ce sujet sont disponibles dans le document [Free Cooling].

Récupération de chaleur

Pour la récupération de la chaleur du condenseur, il existe les possibilités que voici:

– Pose d'un condenseur-désurchauffeur. Cette solution permet d'utiliser jusqu'à 15% de la chaleur totale du condenseur à pleine charge à un niveau de température plus élevé, ceci par désurchauffage, par exemple pour la production d'eau chaude $> 60^\circ\text{C}$ («désurchauffeur» à la figure 3.6).

L'avantage de cette solution est que la machine frigorifique ne doit pas atteindre une pression de condensation très élevée, ce qui prolonge sa durée de vie technique.

– Pour récupérer entièrement la chaleur du condenseur, la température de service des consommateurs doit être choisie aussi basse que possible, à savoir en dessous de 40 °C. Ces températures permettent le recours aux chauffages au sol, ECTA, corps de chauffe basse température ou encore au préchauffage de l'ECS. Si des températures de service supérieures à 55 °C sont requises, pour la production d'eau chaude p. ex., la température de condensation et donc la pression doivent être augmentées. Cette solution présente l'avantage de permettre l'utilisation d'une grande part de la chaleur perdue même à un niveau de température plus élevé. L'inconvénient réside dans la pression de service plus élevée, dans le coefficient de performance moins favorable et la durée de vie technique plus courte de la machine frigorifique.

Sources d'énergie

Des puits énergétiques naturels permettent de refroidir des locaux et des installations directement. Il est toutefois également possible d'utiliser des sources énergétiques de façon indirecte, par exemple pour le refroidissement en circuit fermé. Les sources d'énergie représentées dans la figure 3.16 peuvent être divisées en deux groupes:

– Les systèmes ouverts avec des eaux souterraines et de surface issues de la géothermie peu profonde; les températures des sources sont comprises entre 8 à 25 °C. En cas d'utilisation des eaux usées, les températures sont même parfois plus élevées.

– Les systèmes fermés dotés d'un circuit d'un mélange eau-antigel; en font partie, par exemple, les sondes géothermiques ou encore les échangeurs de chaleur géothermique. Ils ont l'avantage de pouvoir être combinés avec une installation solaire thermique. Dans ce cas de figure, l'installation solaire sert à régénérer les sondes géothermiques ou encore les échangeurs de chaleur géothermique, donc à stocker l'énergie solaire à long terme. Les températures de service de ces systèmes-là sont comprises entre 0 et 18 °C.

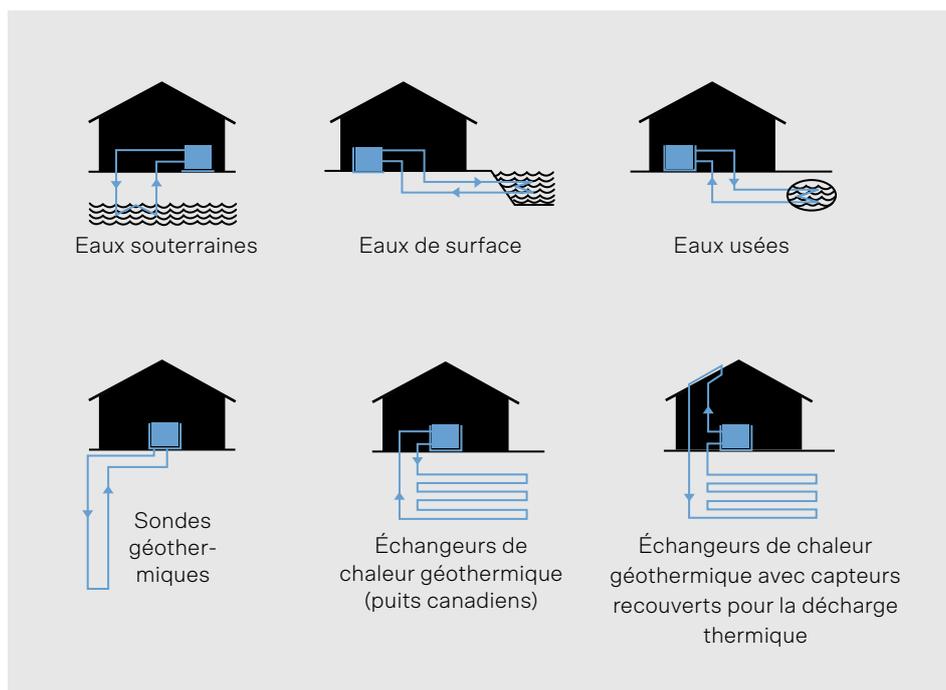


Figure 3.16: Sources d'énergie utilisées directement ou indirectement pour le refroidissement.

Seule la géothermie peu profonde peut être utilisée à des fins de refroidissement (figure 3.17); en font partie les sondes géothermiques, les pieux énergétiques et les puits d'eaux souterraines.

Optimisation énergétique de l'exploitation

Les objectifs principaux des optimisations énergétiques de l'exploitation (OéE) sont les suivants:

- Régler une installation de manière optimale
- Réaliser des rendements aussi élevés que possible pour la production et la distribution énergétiques
- Adapter les installations à l'utilisation effective, respectivement aux besoins réels
- Déterminer et maintenir le fonctionnement optimal sur le plan énergétique
- Respecter les exigences de sécurité et d'hygiène, respectivement les prescriptions légales

Selon le cahier technique [SIA-2048] «Optimisation énergétique de l'exploitation», s'y ajoutent les objectifs exposés ci-après:

- Augmenter significativement l'efficacité énergétique dans les bâtiments existants
- Exploiter correctement les installations et appareils techniques du bâtiment, en suivant une méthodologie claire (figure 3.18)

Pour la réalisation d'une OéE, le cahier technique [SIA 2048] présente une procédure par étapes, avec une planification structurée et la réalisation de mesures économiquement favorables (durée d'amortissement < 2 a). Il est important de pouvoir augmenter l'efficacité énergétique sans réduction sensible du confort. Le cahier technique schématise par ailleurs un échelonnement temporel des mesures OéE (figure 3.19). Pour cela, il définit les types d'OéE suivants:

- L'OéE* est une optimisation effectuée directement à la suite de la remise d'un objet, au plus tard pendant le délai de dénonciation des défauts de deux ans fixé par la norme [SIA 118]. Dans ce cas, on n'utilise pas des données d'explo-

Figure 3.17: Utilisation de la géothermie (aperçu), source: norme SIA 384/6.

Géothermie peu profonde (env. 8 °C–25 °C)			Géothermie profonde (env. 20 °C–200 °C)	
Sondes géothermiques	Capteurs, corbeilles, pieux énergétiques	Puits d'eaux souterraines avec réinfiltration	Hydrogéothermie	Enhanced Geothermal Systems (EGS)
Certaines de 10 à 400 m de profondeur	Quelques-uns de 10 m de profondeur	La plupart < 50 m de profondeur	Certains de 100 à > 5000 m de profondeur Singlet/doublet hydrogéothermique Extraction d'eaux thermales	Jusqu'à 5000 m de profondeur
← Système fermé →		← Système ouvert →	← Système ouvert →	
Utilisation via des pompes à chaleur			Utilisation avec échangeur de chaleur et utilisation directe de l'eau chaude	
Production de chaleur, refroidissement			Utilisation directe de l'eau chaude	
			Production d'électricité à l'aide d'installations ORC ou Kalina. Utilisation de la chaleur et utilisation des eaux thermales	
			Production d'électricité et utilisation de la chaleur rejetée	

tation mesurées, mais uniquement des valeurs de planification. Une OéE* implique l'attribution d'un contrat séparé, où l'accent est mis sur l'optimisation des circuits de régulation et de l'hydraulique.

- L'OéE** est une tâche permanente incombant à l'exploitant avec pour objectif de toujours exploiter toutes les installations techniques du bâtiment de manière aussi efficace que possible au niveau énergétique. Cela implique une gestion de l'énergie comprenant une surveillance continue des consommations énergétiques (état constaté/état souhaité) et la comparaison de ces résultats avec des valeurs de référence adaptées. L'accent est alors mis sur l'analyse des données énergétiques et la prise de mesures.

Figure 3.18: Méthodologie de l'optimisation énergétique de l'exploitation selon le cahier technique [SIA 2048].

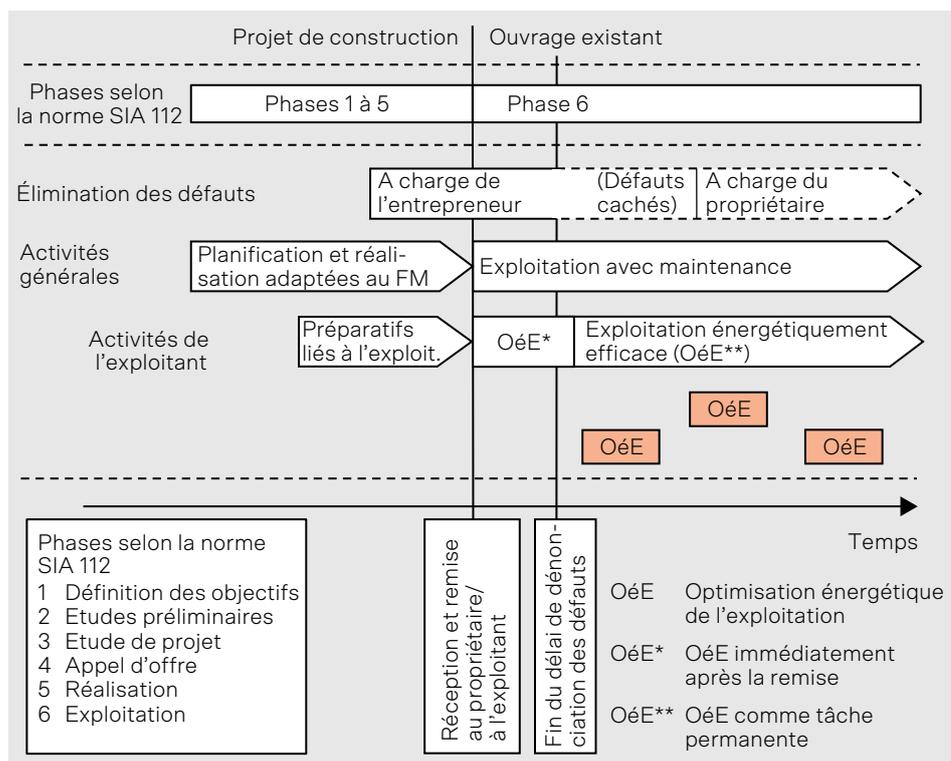
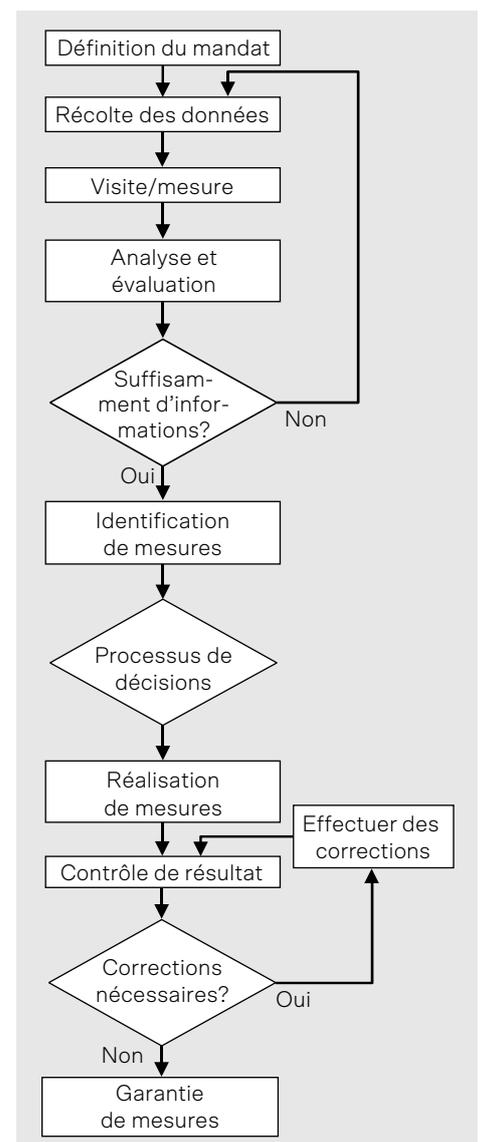


Figure 3.19: Déroulement d'une OéE détaillée selon le cahier technique [SIA 2048].



3.5 Emission de froid dans les locaux

Il existe des systèmes très variés d'émission de froid (tableau 3.13). En cas de faibles apports de chaleur, les bâtiments peuvent être refroidis au moyen de l'installation centrale de ventilation et de climatisation. Pour les locaux individuels avec des apports de chaleur internes plus élevés, deux méthodes sont envisageables:

- Les ECTA et les plafonds refroidissants, respectivement les surfaces refroidissantes statiques sous le plafond permettent d'absorber de la chaleur dans le local presque sans bruit, sans courants d'air et de façon efficace sur le plan énergétique. De ce fait, ces solutions sont regroupées sous le terme de «refroidissement statique».
- Les refroidisseurs à circulation d'air sont utilisés dans les locaux avec des apports de chaleur internes très élevés, par exemple les centres de calcul, les salles de serveurs, les salles d'opération, les locaux de stérilisation, de radiologie, les bureaux paysagers, etc. Dans ces cas, les refroidisseurs à circulation d'air servent uniquement à évacuer la chaleur interne. Le renouvellement hygiénique de l'air doit être garanti par l'installation de ventilation.

Dans la mesure du possible, aucun refroidisseur à circulation d'air ne devrait être installé dans des locaux fréquemment occupés par des personnes. En effet, ces refroidisseurs sont bruyants, nécessitent un séparateur de conden-

sat ainsi que du courant d'entraînement pour le ventilateur, ce qui signifie de la maintenance supplémentaire. Sur le plan hygiénique, ils ne sont pas non plus sans poser problème.

Les refroidissements à l'eau de ville sont en principe interdits. Dans des cas exceptionnels, par exemple pour le refroidissement de groupes électrogènes de secours alimentés au diesel ou encore de tomographes à résonance magnétique, il est possible d'obtenir une autorisation spéciale pour ce type de refroidissement de secours.

Les éléments de construction refroidissants, par exemple via des ECTA, tout comme les plafonds refroidissants peuvent être utilisés lorsqu'il faut évacuer de la chaleur sensible et perceptible. Ces deux systèmes utilisent la masse d'accumulation du local et se caractérisent ainsi par une grande efficacité énergétique. Le document [Kühlsysteme] comporte une comparaison des différents systèmes de refroidissement.

Refroidissement par éléments de construction

Les systèmes d'éléments de construction thermoactifs (ECTA) utilisent la masse d'accumulation du bâtiment pour refroidir les locaux. De cette manière, les apports de chaleur provenant des personnes, des appareils et de l'ensoleillement n'ont pas besoin d'être immédiatement évacués, car ils sont stockés de façon temporaire dans la masse des éléments de construction. Au cours des heures nocturnes plus fraîches, cette chaleur est restituée à l'air ambiant et

Tableau 3.13: Systèmes d'émission de froid ainsi que leurs températures de fonctionnement et limites de puissance. SPN: surface de plancher nette (Source: [SIA 382/2])

Système	Puissance de refroidissement max.		Température aller ou température de l'air fourni min. °C	Fluide	Remarques
	W/m ² SPN	W/P			
Régulation de température par le sol	20		19	Eau	
Systèmes d'éléments de construction thermoactifs (ECTA)	40		19	Eau	
Plafond refroidissant	80		17	Eau	
Ventilation par mélange		120	16	Air	A 36 m ³ /h P
Ventilation à déplacement d'air		70	20	Air	A 36 m ³ /h P
Refroidisseur à circulation d'air	≥100		16	Air	

évacuée du bâtiment. Voici quelques solutions avantageuses pour générer du froid:

- Refroidissement direct à l'aide de sondes géothermiques.
- Free-Cooling à l'aide d'aérorefroidisseurs hybrides.
- Refroidissement à l'aide d'une machine frigorifique, y c. l'utilisation de la chaleur perdue pour l'eau chaude sanitaire, avec l'électricité bas tarif plus avantageuse et des puissances de refroidissement en cycle fermé plus faibles.
- ECTA – ils sont plus efficaces lorsque la part de rayonnement des sources de chaleur dans le local est élevée. Le tableau 3.14 montre les parts de rayonnement et de convection de différentes sources de chaleur.

Le concept global du refroidissement par éléments de construction se base sur les cinq principes suivants:

1. Enveloppe du bâtiment à haute isolation thermique, qui maintient les apports de chaleur externes à un niveau bas et garantit également une bonne protection solaire (valeur $g < 0,15$; exemple: stores à lamelles extérieurs clairs).
2. Apports de chaleur internes maximaux de $150 \text{ Wh/m}^2\text{d}$
3. Ventilation hygiénique contrôlée avec récupération de chaleur
4. Dalle en béton sans habillage ni isolation phonique contre le bruit de choc (attention à l'acoustique!) avec tuyaux de refroidissement et de chauffage intégrés
5. Possibilité de refroidissement au moyen d'aérorefroidisseurs, de sondes géothermiques, de machines frigorifiques, etc.

Le tableau 3.14 fait ressortir que le refroidissement par éléments de construction permet d'évacuer efficacement la chaleur provenant avant tout de sources de chaleur avec une grande part de rayonnement. Il s'agit là par exemple de l'éclairage, de personnes et des apports de chaleur externes. Pour

les locaux avec une grande proportion d'appareils de bureau, il convient de trouver une autre solution, par exemple pour des centres de calcul, des postes de travail de trader ou encore des banques.

Plafonds refroidissants

Les plafonds refroidissants, respectivement les surfaces refroidissantes statiques sous le plafond permettent d'absorber de la chaleur dans le local presque sans bruit, sans courants d'air et de façon efficace sur le plan énergétique. Les plafonds refroidissants correspondent, en termes de fonction, aux parois chauffantes, par contre ils doivent être disposés près du plafond pour des raisons relevant des lois de la physique. L'air chaud dans le local monte pour être refroidi en dessous du plafond refroidissant. L'air plus frais et donc plus lourd retombe ensuite dans la zone de séjour quasiment sans courants d'air. Les plafonds refroidissants présentent cependant deux inconvénients: des coûts d'investissement élevés et une sensibilité à des taux d'humidité ambiante élevés (formation de condensation). La figure 3.20 représente un plafond refroidissant avec un raccordement à 4 conducteurs et la possibilité de chauffer et de refroidir simultanément la même zone. Le schéma montre que les plafonds refroidissants actuels peuvent également être combinés avec la ventilation, l'éclairage et l'absorption phonique, entre autres. Cela permet de réduire le nombre d'interfaces. Les plafonds refroidissants permettent également le chauffage des locaux.

Tableau 3.14: Parts de rayonnement et de convection de différentes sources de chaleur.

Sources	Part de rayonnement	Part de convection
Appareils de bureau et serveurs, avec ventilateur	10 %	90 %
Appareils de bureau et serveurs, sans ventilateur	20 %	80 %
Eclairage	50 %	50 %
Personnes	70 %	30 %
Rayonnement solaire	90 %	10 %

L'avantage de la solution exposée à la figure 3.20 réside dans le fait que seule la zone près de la façade est chauffée, à savoir une zone de 1 m de large le long des parois extérieures. En d'autres termes, est chauffée uniquement la partie du local dans laquelle surviennent les déperditions thermiques les plus importantes. Cela accroît le confort ambiant et l'efficacité énergétique, car il n'est pas nécessaire de chauffer toute la masse du plafond. Dans tous les cas, il est important que l'enveloppe du bâtiment soit étanche et très bien isolée, afin d'éviter tout phénomène de courant d'air. Des connaissances spécifiques sont nécessaires pour le dimensionnement d'un

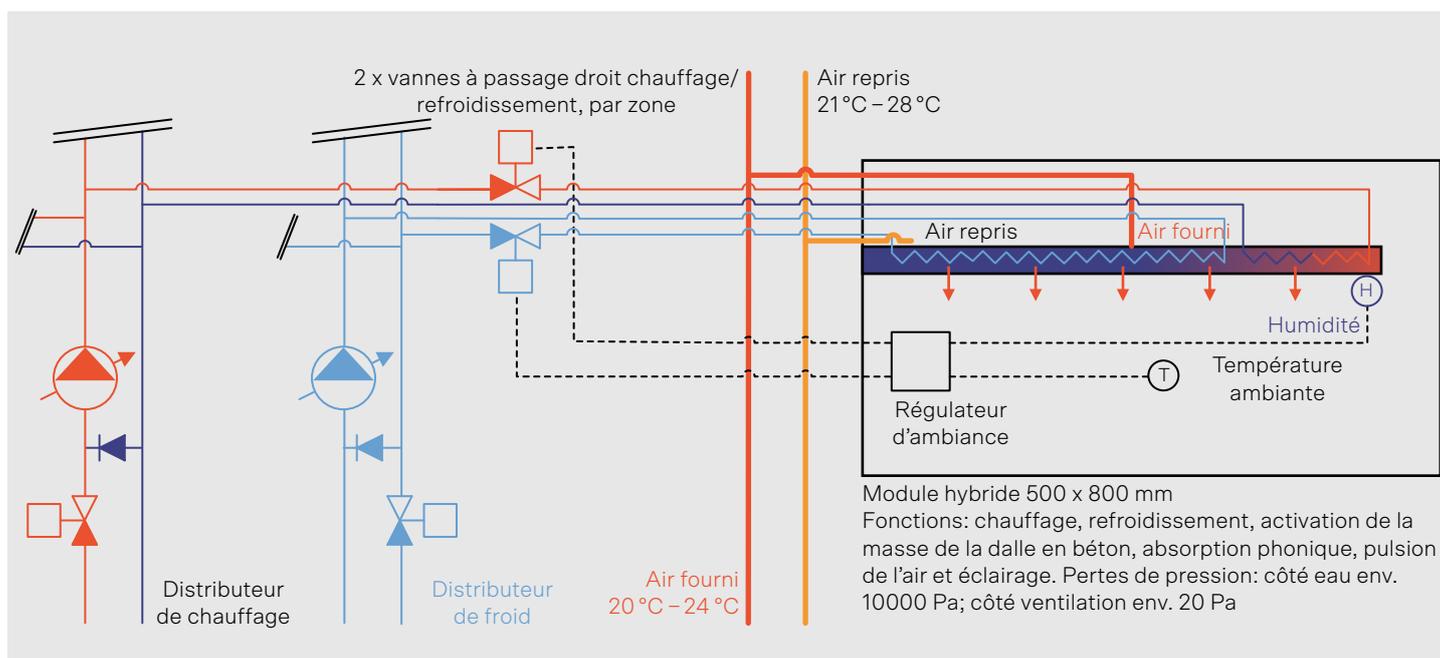
plafond refroidissant. Les points suivants doivent alors être pris en compte:

- La température de surface du plafond refroidissant ne doit jamais descendre en dessous du point de rosée dans le local, ce qui doit être assuré par une sonde de condensat d'humidité.
- Les plafonds refroidissants doivent être à 100 % étanches à la diffusion d'oxygène, dans le cas contraire une séparation du réseau est requise.
- La régulation du plafond refroidissant doit être coordonnée avec la ventilation. Lorsque la valeur de consigne est atteinte dans le local, le débit à travers les éléments concernés du plafond refroidissant doit être arrêté.

Tableau 3.15: Typologie des plafonds refroidissants ainsi que les valeurs de puissance y relatives.

Brève description	Refroidissement	Chauffage
Puissance spécifique - Plafonds rayonnants avec surveillance du point de rosée - Plafonds à convection avec vitesses de l'air inférieures à 0,15 m/s	- 70 à 100 W/m ² - 100 à 150 W/m ²	- Jusqu'à 200 W/m ² - Jusqu'à 300 W/m ²
Fourniture de puissance pour maintenir la température ambiante	Possible avec une grande précision	Problématique en raison de la stratification de température
Critères de confort - Stratification de température - Asymétrie de rayonnement - Vitesses de l'air ambiant	- Quasiment aucune - Sensation agréable - En dessous de 0,15 m/s	- En fonction de la charge, env. 2 K/m - Confortable jusqu'à 54 W/m ² - évent. retombée d'air froid
Exigences relatives à la façade vitrée	Aucune influence	Valeur U inférieure à 1,3 W/m ² K

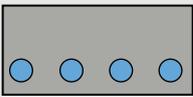
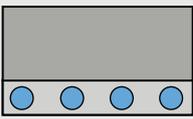
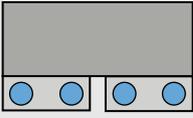
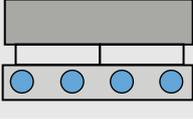
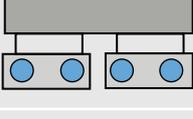
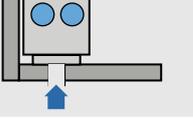
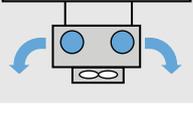
Figure 3.20: Principe d'un refroidissement au moyen d'un plafond refroidissant pouvant également remplir des fonctions de chauffage.



- Les divers éléments du plafond refroidissant doivent pouvoir être arrêtés et vidangés séparément.
- Il est recommandé de vérifier chaque élément du plafond refroidissant par thermographie lors de la mise en service, notamment dans les locaux critiques.
- Pour l'activation de la dalle en béton, la section transversale libre du plafond double doit être d'au moins 50%. Pour

cette raison, il est recommandé de planifier les plafonds refroidissants sous forme de «voiles» dans le local.

Tableau 3.16: Les principaux systèmes d'émission de froid utilisés dans le domaine du froid climatique. On présume ici que l'humidité ne doit pas être maintenue dans le local.

N°	Emission de froid (eau froide)	Fonction	Schéma	Avantages	Inconvénients
1	Systèmes d'éléments de construction thermoactifs (ECTA)	Refroidissement par éléments de constr. avec activation de la masse		Bon marché, refroidissement statique vers le haut et vers le bas jusqu'à 40 W/m ²	Refroidissement parfois incontrôlé; intégration dans l'élément de construction en béton.
2	Plafond refroidissant, relié à la dalle	Fermé, activation minimale de la masse		Bon marché, refroidissement statique; peu encombrant, à peine visible dans le local	Pas d'activation directe de la masse possible
3	Module de refroidissement	Intégration de la masse de la dalle		Refroidissement bon marché et statique; activation de la masse d'accumulation	Montage difficile en présence de faux-plafonds
4	Plafond refroidissant en dessous de la dalle	Ouvert, avec activation des éléments de construction; plafond à convection		Refroidissement statique; parfois activation de la masse d'accumulation selon la section transversale libre	Nettoyage difficile; hauteur du local réduite
5	Voile refroidissant sous la dalle	Flux libre dans le local avec activation des éléments de construction		Refroidissement statique, solution thermiquement active à haute performance	Nettoyage difficile; hauteur du local partiellement réduite
6	Plancher refroidissant	Interchangeabilité avec le plancher chauffant		Bon marché, refroidissement statique, avec activation de la masse	Puissance frigorifique maximale de 15 W/m ² à 18°/21 °C
7	Poutres et baffles de refroidissement	Panneaux de refroidissement avec air primaire		Puissance plus élevée dans un espace minimal; occupation partielle du plafond uniquement	Hauteur du local partiellement réduite; apparition de courants d'air possible; coûts de maintenance
8	Appareil d'allège	Appareil à induction avec air primaire		Puissance plus élevée dans un espace minimal; un seul élément pour le chauffage, le refroidissement et la ventilation	Parfois apparition de courants d'air, émissions sonores, plus gourmand en énergie, l'allège doit être planifiée, coûts de maintenance
9	Refroidisseur à circulation d'air	Ventilateur-convecteur avec ou sans séparateur de condensat		Avec évacuation du condensat, puissance élevée; solution bon marché	Emissions sonores dans la pièce; refroidissement sec avec puissance limitée; coûts de maintenance

Étiquette-énergie pour climatiseurs

L'étiquette-énergie est obligatoire pour les climatiseurs depuis 2004. Elle permet d'évaluer l'efficacité énergétique en un coup d'œil grâce à sa graduation comportant sept niveaux (A+++ à D). Les flèches de couleur verte, orange ou rouge montrent s'il s'agit d'un appareil avec une consommation d'énergie faible, moyenne ou élevée.

Elle indique également la consommation d'électricité pour 60 minutes à plein régime. À noter cependant que la consommation d'énergie effective dépend de l'utilisation de l'appareil et des

conditions climatiques. Ainsi, l'étiquette-énergie permet de faire une estimation approximative non seulement du prix d'acquisition, mais également des coûts énergétiques.



Figure 3.21: Étiquettes-énergie pour climatiseurs.

Tableau 3.17: Étiquette-énergie pour climatiseurs: valeurs limites des coefficients EER et COP. Les appareils mono-gaine utilisent directement l'air du local pour refroidir le condenseur, puis l'évacue vers l'extérieur. Il en résulte une dépression dans le local. Dans le cas des climatiseurs bi-gaine, l'air pour refroidir le condenseur ne provient pas du local même. Pour cette raison, la pression ne change pas dans le local à refroidir.

EER/COP	Bi-gaine		Mono-gaine	
	EER	COP	EER	COP
A+++	$\geq 4,1$	$\geq 4,6$	$\geq 4,1$	$\geq 3,6$
A++	$3,6 \leq \text{EER} < 4,1$	$4,1 \leq \text{COP} < 4,6$	$3,6 \leq \text{EER} < 4,1$	$3,1 \leq \text{COP} < 3,6$
A+	$3,1 \leq \text{EER} < 3,6$	$3,6 \leq \text{COP} < 4,1$	$3,1 \leq \text{EER} < 3,6$	$2,6 \leq \text{COP} < 3,1$
A	$2,6 \leq \text{EER} < 3,1$	$3,1 \leq \text{COP} < 3,6$	$2,6 \leq \text{EER} < 3,1$	$2,3 \leq \text{COP} < 2,6$
B	$2,4 \leq \text{EER} < 2,6$	$2,6 \leq \text{COP} < 3,1$	$2,4 \leq \text{EER} < 2,6$	$2,0 \leq \text{COP} < 2,3$
C	$2,1 \leq \text{EER} < 2,4$	$2,4 \leq \text{COP} < 2,6$	$2,1 \leq \text{EER} < 2,4$	$1,8 \leq \text{COP} < 2,0$
D	$1,8 \leq \text{EER} < 2,1$	$2,0 \leq \text{COP} < 2,4$	$1,8 \leq \text{EER} < 2,1$	$1,6 \leq \text{COP} < 1,8$

3.6 Tendances dans la technique frigorifique

Dans quelle direction la technique frigorifique va-t-elle se développer? Pour répondre à cette question, il faut prendre en compte les évolutions dans le bâtiment qui sont d'ores et déjà prévisibles:

- D'un côté, la densité des constructions augmente de plus en plus. Les exigences de confort s'accroissent parallèlement, tout comme le degré de technicité des bâtiments. En outre, les températures moyennes de l'air extérieur monteront dans le futur. Cette évolution implique des puissances de refroidissement plus élevées et par là une consommation électrique accrue pour les compresseurs, ventilateurs et circulateurs.

- D'un autre côté, on utilise davantage les sources d'énergie renouvelables et la chaleur perdue; l'environnement est ainsi durablement ménagé. Grâce aux optimisations énergétiques de l'exploitation, les besoins en énergie de fonctionnement baisseront encore davantage. De plus, l'amélioration significative des rendements dans la transformation de l'énergie et de nouvelles possibilités de stockage de la chaleur à long terme fournissent la base pour une utilisation optimale de la chaleur perdue.

Dans l'ensemble, il pourrait en résulter à long terme même une économie d'énergie, en dépit des exigences de confort plus élevées et du changement climatique.

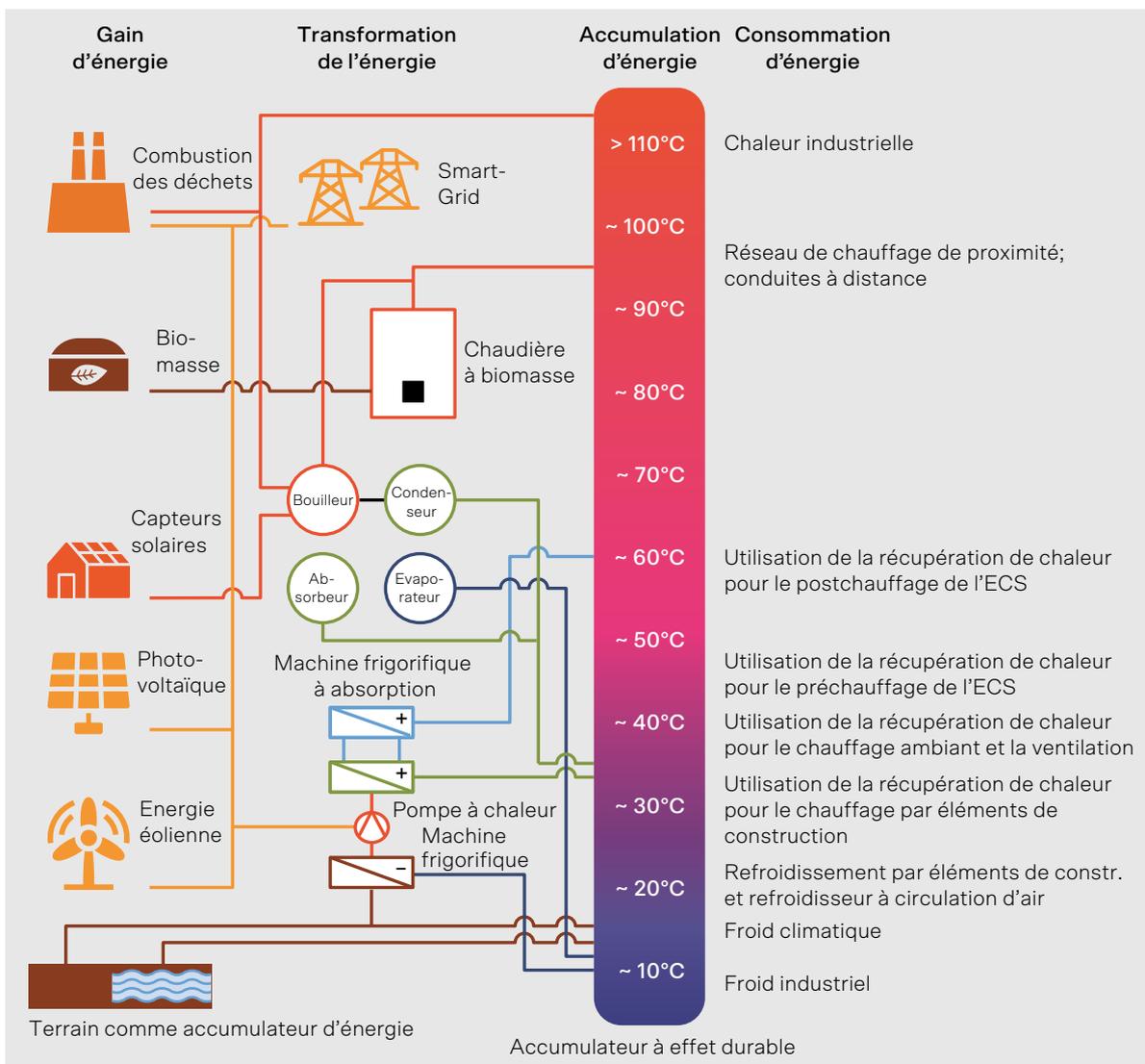


Figure 3.22: Tendances dans le domaine de la technique frigorifique.

3.7 Sources

- [ORRChim] Ordonnance fédérale sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques ORRChim). RS 814.81.
- [EN 13363-1/2] Norme européenne EN 13363-1/2. Dispositifs de protection solaire combinés à des vitrages – Calcul du facteur de transmission solaire et lumineuse. Union européenne, 2009/2007.
- [EnDK] Modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC). Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK), édition 2014 (mise à jour en 2018 – en raison de la modification des normes), Berne. www.endk.ch
- [Free Cooling] IEF Energy Paper 7/2018. Free Cooling in der Klimakälte. ZHAW, SuisseEnergie
- [Kühlsysteme] Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen. Bundesamt für Energie, Bern 2010.
- [SIA 118] Norme SIA 118. Conditions générales pour l'exécution des travaux de construction. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2013.
- [SIA 2024] Cahier technique SIA 2024. Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment. SIA. Zurich, 2015.
- [SIA 2044] Cahier technique SIA 2044. Bâtiments climatisés – Méthode de calcul standard pour la puissance requise et les besoins d'énergie. SIA. Zurich, 2011.
- [SIA 2046] Cahier technique SIA 2046. Tests intégraux des systèmes des installations du bâtiment. SIA. Zurich, 2015.
- [SIA 2048] Cahier technique SIA 2048. Optimisation énergétique de l'exploitation. SIA. Zurich, 2015.
- [SIA 380/1] Norme SIA 380/1. Besoin de chaleur pour le chauffage. SIA. Zurich, 2016.
- [SIA 382/1 → ESEER] Norme SIA 382/1. Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises. SIA. En révision; désormais norme SIA 380/2. Zurich, 2014.
- [SIA 382/1] Norme SIA 382/1. Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises. (SIA). Zurich, 2014.
- [SIA 382/2] Norme SIA 382/2. Bâtiments climatisés – Puissance requise et besoins d'énergie. SIA. En révision; désormais norme SIA 380/2. Zurich, 2011.
- [SIA 411] Norme SIA 411. Représentation modulaire des installations. SIA. Zurich, 2016.
- [SN EN 378-1] Norme suisse SN EN 378-1 à -3. Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement – Partie 1 (2021): Exigences de base, définitions, classifications et critères de choix. Partie 2 (2017): Conception, construction, essais, marquage et documentation. Partie 3 (2021): Installation in situ et protection des personnes. Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour.

Renouvellement d'air

Heinrich Huber

4.1 Délimitation

Ce chapitre donne un aperçu des installations aérauliques (installations RLT) dans les bâtiments non résidentiels principalement destinés au séjour de personnes, tels que les bureaux, les écoles et les salles de réunion, etc. Pour les bases, des informations plus détaillées et des applications spéciales, on se référera à la littérature spécialisée, notamment au manuel [Handbuch Klimatechnik]. Pour la ventilation des bâtiments résidentiels, on consultera dans la série d'ouvrages spécialisés de SuisseEnergie le titre [Ventilation des habitations].

4.2 Prescriptions et normes

La présente vue d'ensemble correspond aux prescriptions et normes en vigueur en mars 2022. En effet, à cette période plusieurs documents étaient en cours de révision alors que pour d'autres documents, une révision était d'ores et déjà prévue.

Lois cantonales sur l'énergie

Les exigences cantonales se basent sur le Modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC). Elles sont réunies dans l'aide à l'application [EN-105] et réglementent les points suivants:

- Récupération de chaleur obligatoire (RC)
- Utilisation de la chaleur perdue (UCP) pour les installations simples d'air repris de grande taille avec des durées élevées de fonctionnement
- Isolation thermique des conduites d'air et des appareils
- Vitesses de l'air maximales dans les conduites d'air et les appareils
- Fonctionnement selon les besoins pour les locaux et les groupes de locaux dédiés à différentes utilisations

L'ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique (OEEE)

L'ordonnance suisse sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique [OEEE] a repris les exigences européennes pour les installations RLT, définies par l'ordonnance [UE 1253/2014]:

- Efficacité minimale de la RC
- Puissance spécifique maximale des ventilateurs concernant les pertes de charge de la RC et des filtres
- Rendement minimal des ventilateurs en cas d'installations simples d'air repris

Norme SIA 382/1

En Suisse, la norme [SIA 382/1] est la norme maîtresse en ce qui concerne les installations RLT. Elle définit la terminologie et fixe les exigences par rapport au confort et à la qualité de l'air intérieur. En sus, elle contient des exigences en matière de fonctionnalité et d'efficacité énergétique. Les autres normes et directives suisses portant sur la ventilation sont subordonnées à la SIA 382/1. Au terme du délai rédactionnel du présent livre, la révision de la norme SIA 382/1 était en cours.

Directive SICC relative à l'hygiène

En matière d'hygiène, les normes suisses renvoient à la directive [SICC VA 104-01]. Au-delà des exigences pour les composants, elle définit les exigences requises pour la maintenance.

Protection incendie

En principe, ce sont les cantons qui fixent les bases légales relatives à la protection incendie. En l'occurrence, la plupart s'en tiennent aux normes et directives de l'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI). La majorité des documents AEAi importants sont disponibles gratuitement sur le site www.praever.ch. La directive de protection incendie AEAi «Installations aérauliques» [AEAi 25-15]

définit les exigences et mesures générales pour ces installations.

La protection incendie influence le concept de ventilation et la concrétisation des installations RLT de manière déterminante s'il s'agit de bâtiments dotés de plusieurs compartiments coupe-feu, respectivement d'installations RLT qui alimentent ou traversent différents compartiments coupe-feu. Pour cette raison, la protection incendie doit faire partie intégrante de la planification dès les phases initiales du projet.

Affectations spéciales

La norme [SIA 382/1] couvre les catégories d'affectation courantes telles que les bureaux, les écoles et les salles de réunion. Les affectations spéciales telles que restauration, piscines couvertes et hôpitaux sont traitées dans les directives y relatives établies par l'association Les Planificateurs – SCCI.

4.3 Qualité de l'air intérieur et débits d'air

Concentration en CO₂

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un bon indicateur de la qualité ressentie de l'air intérieur lorsque les odeurs proviennent principalement du métabolisme humain. Le CO₂ est inodore et, dans les bâtiments ventilés, sa concentration n'atteint pas un taux critique pour la santé. Les deux premières colonnes du tableau 4.1 indiquent la catégorie de la qualité de l'air intérieur QAI (Indoor Environment Quality, IEQ) selon la norme [SN EN 16798-1], annexe B.

A ce titre, c'est l'écart avec la concentration en CO₂ de l'air extérieur qui est déterminant. La concentration en CO₂ de l'air extérieur s'élève actuellement à environ 420 ppm à condition d'avoir affaire à un emplacement non encaissé. Des valeurs supérieures allant jusqu'à 500 ppm sont possibles en fonction de l'emplacement, des conditions météorologiques et de la saison.

En 2022, la norme SN EN 16798-1 sera probablement complétée par une annexe nationale (annexe A) qui tiendra compte des valeurs de CO₂ et de la qualité de l'air en Suisse. Ces valeurs seront également reprises lors de la révision de la norme SIA 382/1. Il est conseillé de

Tableau 4.1: Catégories d'air intérieur pour la concentration de CO₂ supérieure à la concentration dans l'air extérieur; proposition de valeurs de dimensionnement avec une émission standard de CO₂ de 20 l/h par personne, pour les personnes «non adaptées».

Catégorie	Concentration de CO ₂ supérieure à la concentration dans l'air extérieur, en ppm		Débit d'air par personne pour la valeur de dimensionnement de CO ₂ proposée, en m ³ /h
	Plage de la catégorie selon la norme SN EN 16798-1	Valeur de dimensionnement proposée	
IEQ I	0 ... 550	350	57
IEQ II	> 550 ... 800	700	29
IEQ III	> 800 ... 1350	1100	18
IEQ IV	> 1350 ... 2200	1600	13

Lecture du tableau 4.1

Pour un bureau, c'est la catégorie d'air intérieur IEQ II qui est sélectionnée. L'installation est dimensionnée selon la proposition exposée au tableau 4.1. L'air extérieur à cet endroit contient 450 ppm de CO₂. Par conséquent, il en résulte une concentration de 1150 ppm de CO₂ aux conditions de dimensionnement.

les appliquer dès que la norme révisée sera disponible (probablement en 2023).

Les valeurs de dimensionnement proposées par l'auteur se trouvent à la troisième colonne du tableau 4.1; la concentration en CO₂ de l'air intérieur se situe dans ce cas à peu près au milieu de la catégorie QAI correspondante. La dernière colonne montre le débit d'air par personne résultant de la concentration en CO₂ proposée.

Le tableau est valable pour des personnes dites «non adaptées», à savoir des personnes qui viennent de pénétrer dans un local. Par comparaison avec les personnes «adaptées», qui s'y tiennent déjà depuis un moment, elles évaluent la qualité de l'air intérieur de manière plus critique, en d'autres termes la qualité de l'air leur paraît plus mauvaise. L'émission standard de CO₂ de 20 l/h par personne s'applique à une activité de bureau typique. Les locaux destinés à des activités métaboliques plus intenses (des installations sportives, par exemple) requièrent des débits d'air plus importants.

Une installation RLT est en principe dimensionnée en fonction de la catégorie de l'air intérieur QAI II. Ce dimensionnement-là correspond aussi aux valeurs standard de la norme [SIA 2024], lequel est correct à condition que les utilisateurs et utilisatrices puissent ouvrir les fenêtres selon les besoins, en complément à la ventilation mécanique. Mais les maîtres d'ouvrage et les planificatrices sont bien entendu libres de convenir d'autres valeurs de dimensionnement.

Autres polluants de l'air

A part les effets causés par la présence de personnes, il arrive que des matériaux de construction, des objets d'ameublement et des installations polluent l'air intérieur. Ce sont surtout les poussières fines et les composés organiques volatils (VOC = Volatile Organic Compounds) qui jouent à ce titre un rôle important. Le chiffre 3.3 de la norme

[SIA 180] stipule de choisir des matériaux de construction ne diffusant si possible pas ou très peu de polluants dans l'air intérieur. Construire selon Minergie-Eco crée de bonnes conditions pour que la substance bâtie pollue le moins possible l'air intérieur.

Humidité relative de l'air intérieur

Selon les normes SIA 180 et [SIA 382/1], l'humidité relative de l'air intérieur (HR) minimale admise est de 30 %. Elle se réfère à une température ambiante de 21 °C pour une utilisation standard des locaux. Si les températures ambiantes prévues s'en écartent, l'humidité est convertie à 21 °C. Pour des altitudes au-dessus de 800 m, la limite d'humidité minimale admise est réduite de 1 % HR par tranche de 100 m. Sans humidification active, le taux d'humidité de l'air intérieur peut être inférieur au taux minimal admis jusqu'à concurrence de 10 % du temps d'utilisation.

L'humidité absolue maximale admise de l'air intérieur est de 13,7 g/kg en été.

Sans déshumidification active, le taux d'humidité de l'air intérieur peut être supérieur au taux d'humidité maximal admis jusqu'à concurrence de 10 % du temps d'utilisation.

La norme SIA 180 définit en outre les exigences relatives à la protection contre l'humidité afin de prévenir le risque de moisissures. En fonction du mode de construction, il est toléré que l'humidité maximale de l'air intérieur soit d'environ 40 % HR lors de basses températures extérieures.

L'élaboration de l'annexe nationale pour la norme SN EN 16798-1 comportera fort probablement la définition de catégories pour dimensionner l'humidification et la déshumidification. Il est probable que la future norme SIA 382/1 reprendra ces catégories.

4.4 Termes, composants et fonctions

Types d'air

Les types d'air les plus importants des installations RLT sont listés à la figure 4.1. La norme [SIA 382/1] définit

des types d'air supplémentaires, tels que les fuites et l'air brassé qui ne sont pas traités ici par souci de simplification. Le tableau 4.2 réunit les abréviations, les définitions et les codes couleur selon la norme.

Abréviation (en français et en anglais)	Désignation (en français et en anglais)	Définition	Code couleur
ANF ODA	Air neuf Outdoor air	Air extérieur non traité pénétrant de l'extérieur dans l'installation RLT ou dans une bouche d'air.	Vert
FOU SUP	Air fourni Supply air	Flux d'air entrant dans le local conditionné ou dans l'installation RLT après traitement.	En fonction du type d'installation
INT IDA	Air intérieur Indoor air	Air présent dans le local ou dans la zone conditionnée.	Gris
TRA TRA	Air transféré Transferred air	Flux d'air intérieur transféré d'un local conditionné à un autre local conditionné.	Gris
REP ETA	Air repris Extract air	Flux d'air sortant du local conditionné et entrant dans l'installation RLT.	Jaune
RJT EHA	Air rejeté Exhaust air	Flux d'air sortant de l'installation RLT et rejeté à l'extérieur du bâtiment.	Brun
REC RCA	Air recyclé Recirculation air	Flux d'air repris recyclé par le conditionnement d'air pour servir à nouveau d'air fourni.	Orange
MEL MIA	Air mélangé Mixed air	Flux d'air composé de deux flux aérauliques ou plus.	Débits d'air de couleurs distinctes
FUJ LEA	Fuites Leakage	Flux d'air involontaire passant à travers les points non étanches de l'installation RLT.	Gris

Tableau 4.2: Abréviations, définitions et codes couleur des types d'air selon la norme SIA 382/1 (extrait).

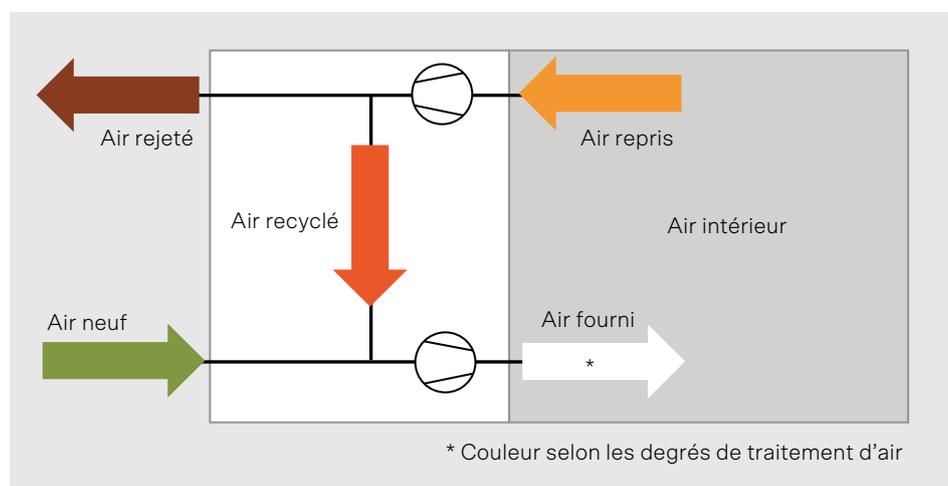


Figure 4.1: Types d'air selon la norme SIA 382/1 (extrait).

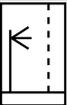
Composants et fonctions

Le tableau 4.3 résume les composants et les fonctions les plus importantes du traitement d'air. Ils font souvent partie intégrante de l'appareil de traitement d'air de l'installation RLT, appelé monobloc.

Le tableau 4.4 liste les composants courants et fonctions usuelles de la distribution de l'air. La terminologie et les symboles se basent sur la norme [SN EN 12792].

Composant Symbole	Fonction Description
Ventilateur 	Transport de l'air Transporte de l'air en créant la pression d'alimentation nécessaire pour surmonter la perte de charge engendrée par le trajet de l'air. Selon la commande et la régulation, un ventilateur peut maintenir constant un débit d'air ou encore une différence de pression.
Filtre à air 	Filtration Les filtres à particules retiennent les polluants particuliers de l'air afin de prévenir l'encrassement de l'installation RLT et/ou d'atteindre la qualité exigée de l'air fourni. Des filtres spéciaux arrivent à retenir des impuretés gazeuses comme par exemple des odeurs. Les filtres à particules sont classés selon la norme ISO 16890 [1]. La norme SIA 382/1 exige au minimum la classe ISO ePM1 50% pour les filtres air fourni. La classe ISO ePM10 50% est prescrite au minimum pour les filtres air repris des appareils de traitement de l'air avec échangeurs de chaleur rotatifs (rotors). La classe ISO Coarse 80% suffit pour tous les autres appareils de ventilation. Les filtres sont susceptibles d'influencer les coûts d'exploitation d'une installation RLT de manière déterminante pour ce qui est des coûts du matériel et des coûts de l'énergie (perte de charge). C'est pour cette raison que les filtres doivent atteindre la classe d'efficacité énergétique A+ ou A du classement Eurovent.
Echangeur de chaleur 	Récupération de chaleur (RC) Transfère la chaleur de l'air repris à l'air fourni. Selon le type, les échangeurs de chaleur peuvent transférer, en plus de la chaleur sensible, de l'humidité. Les différents types de RC ainsi que leurs symboles spécifiques seront traités au point 4.6.
Réchauffeur d'air 	Réchauffement de l'air Apporte à l'air fourni de la chaleur de chauffage ou év. de la chaleur perdue. L'objectif est d'atteindre une température minimale de l'air fourni. Les réchauffeurs d'air sont parfois aussi utilisés pour préchauffer l'air en amont de la RC ou d'un humidificateur d'air pour assurer leur fonctionnement. Le type d'appareil le plus souvent utilisé est l'échangeur de chaleur air-eau. Pour garantir la protection anti-givrage, il est possible de remplacer l'eau par un mélange eau-glycol. Pour de petites installations, des réchauffeurs d'air électriques sont parfois utilisés. Ils sont soumis à autorisation à partir d'une puissance donnée et peuvent engendrer un besoin élevé d'énergie et de puissance. Une autre solution pour chauffer l'air consiste à recourir au condenseur d'une pompe à chaleur. Les réchauffeurs d'air sont appelés préchauffeurs s'ils sont utilisés pour la protection anti-givrage ou encore pour le préchauffage en amont d'humidificateurs d'air. S'ils sont posés en aval d'une humidification ou d'une déshumidification de l'air, on parle de post-chauffage.

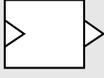
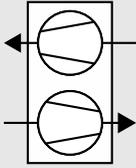
Tableau 4.3: Composants du traitement de l'air, symboles graphiques sur la base de la norme [SN EN 12792].

Composant Symbole	Fonction Description
Refroidisseur d'air 	<p>Refroidissement et/ou déshumidification de l'air</p> <p>Refroidit l'air fourni afin de lui conférer une température donnée. Si la température descend en dessous du point de rosée, le débit d'air est en plus déshumidifié de manière contrôlée (intentionnellement) ou non contrôlée (effet secondaire). Le type d'appareil le plus souvent employé à cet effet est l'échangeur de chaleur air-eau.</p> <p>Il est possible d'utiliser l'eau glacée d'une machine frigorifique, mais aussi le refroidissement naturel, par exemple provenant de sondes géothermiques. Selon l'installation, l'eau est alors remplacée par un mélange eau-glycol.</p> <p>Une autre solution consiste à refroidir et/ou déshumidifier l'air au moyen d'un évaporateur d'un groupe frigorifique.</p>
Pompe à chaleur sur air repris 	<p>Utilisation de la chaleur perdue (UCP) ou récupération de chaleur (RC)</p> <p>L'air repris est refroidi au moyen de l'évaporateur d'une pompe à chaleur. Le refroidissement peut être poursuivi en dessous du point de rosée, voire jusqu'à la formation de glace au droit de l'évaporateur.</p> <p>Si la chaleur perdue est utilisée pour chauffer l'air fourni, il s'agit d'une RC, appelée parfois aussi RC active. On parle d'UCP si la chaleur est utilisée pour produire de l'eau chaude ou pour apporter un appoint au chauffage.</p>
Humidifica- teur 	<p>Humidification ou refroidissement adiabatique</p> <p>L'humidification adiabatique de l'air consiste à pulvériser, atomiser ou vaporiser de l'eau dans l'air. L'énergie d'évaporation est prélevée dans le flux d'air et refroidit celui-ci.</p> <p>Les humidificateurs adiabatiques permettent non seulement d'humidifier l'air fourni, mais également de refroidir l'air repris en été. L'air fourni est alors refroidi par une RC en aval de l'humidificateur.</p> <p>Les humidificateurs à vapeur injectent de la vapeur dans l'air fourni. La température de l'air fourni ne change cependant qu'à peine, elle augmente d'environ 1 K seulement. Pour cette raison, ce type d'humidification est aussi appelée isotherme. La vapeur est produite électriquement, mis à part dans les installations spéciales de très grande taille.</p> <p>Pour les humidificateurs adiabatiques en revanche, l'énergie d'évaporation peut être mise à disposition sous forme de chaleur de chauffage provenant d'une pompe à chaleur, par exemple. L'humidification adiabatique est par conséquent plus favorable énergétiquement. Elle est par contre plus exigeante sur le plan hygiénique.</p> <p>Tous les humidificateurs nécessitent de l'eau complètement ou partiellement déminéralisée.</p>
Séparateur de gouttes 	<p>Séparation de gouttes</p> <p>Dans les humidificateurs et les refroidisseurs d'air, des gouttelettes d'eau risquent d'être emportées par le flux d'air. C'est pourquoi un séparateur de gouttes est généralement installé en aval de ces composants.</p>
Amortisseur de bruit 	<p>Amortissement acoustique</p> <p>Les amortisseurs réduisent en première ligne le niveau sonore des ventilateurs. Ils sont parfois aussi montés dans la distribution de l'air afin de réduire la transmission du son entre les locaux. Il s'agit alors d'amortisseurs de bruit issu de l'effet téléphone.</p>
Volet de dosage 	<p>Fermer, mélanger</p> <p>Lorsque l'installation RLT est déclenchée, il faut fermer les ouvertures vers l'extérieur. A cet effet, les clapets motorisés sont généralement posés au droit de l'appareil RLT, à l'entrée air neuf et à la sortie air rejeté. La pose au droit de la bouche d'air neuf et d'air rejeté serait plus judicieuse pour réduire les déperditions thermiques.</p> <p>Les clapets motorisés sont également utilisés pour fermer temporairement certaines zones et pour réguler les mélanges d'air recyclé.</p>

Suite du tableau 4.3.

Composant Symbole	Fonction Description
Élément d'étranglement 	Réduction Les clapets d'étranglement et les diaphragmes iris servent au réglage fixe de la distribution de l'air et permettent ainsi l'équilibrage entre différents locaux ou branches. Les diaphragmes iris sont conseillés dans ce cas-là, car leur caractéristique de réglage est bonne et leur réglage reste stable sur une longue période. Au droit du diaphragme, il est en plus possible de mesurer approximativement le débit d'air.
Régulateur à débit constant 	Régulation à débit constant Une pression d'alimentation minimale, respectivement une perte de charge minimale en amont du régulateur sont nécessaires afin de pouvoir régler le débit d'air. Il ne faudrait pas utiliser des régulateurs à débit constant pour l'équilibrage des installations à vitesse fixe, car cela implique une perte de charge plus élevée et nécessite par conséquent plus d'énergie pour la ventilation en comparaison de l'équilibrage au moyen d'éléments d'étranglement. Les régulateurs à débit constant sont indiqués dans les installations à débit variable qui comportent des locaux ou zones exigeant un débit d'air constant (les locaux techniques, par exemple).
Régulateur à débit variable 	Régulation à débit variable (régulation VAV) Une pression d'alimentation minimale, respectivement une perte de charge minimale en amont du régulateur sont nécessaires afin de pouvoir régler le débit d'air. Les régulateurs à débit variable sont utilisés pour réguler la qualité de l'air intérieur (souvent la teneur en CO ₂) ou encore la température ambiante de certains locaux ou zones. Un régulateur à débit variable dans l'air fourni va toujours de pair avec son équivalent dans l'air repris pour que le bilan des débits d'air d'un local ou d'une zone soit équilibré.
Clapet coupe-feu 	Barrière en cas d'incendie La directive de protection incendie [AEAI 25-15] définit les exigences en matière de clapets coupe-feu. Le site de la IG BSK (www.ig-bsk.ch) constitue une autre source d'informations. Les clapets coupe-feu ont pour fonction d'empêcher la propagation du feu et de la fumée à travers les installations RLT. Ils doivent se fermer automatiquement lors de l'arrêt de l'installation RLT, en cas de réaction du dispositif de déclenchement thermique ainsi que lors d'une défaillance du système de commande. Les clapets coupe-feu ne doivent pas être utilisés comme clapets de régulation. Ils doivent être inspectés régulièrement. Les conduits de ventilation devront obligatoirement être équipés de clapets coupe-feu aux franchissements des éléments de construction délimitant un compartiment coupe-feu. Les conduits de ventilation, dépourvus d'ouverture, qui traversent d'autres compartiments coupe-feu ventilés ensemble et qui ne présentent pas la résistance au feu exigée doivent également être munis de clapets coupe-feu. Toutefois, des exceptions existent, par exemple pour les bâtiments administratifs et scolaires, lorsque la surface des compartiments coupe-feu ventilés ensemble n'excède pas 1200 m ² , ou encore lorsque les conduits de ventilation restent séparés jusqu'à la centrale de ventilation. Etant donné que l'installation et l'exploitation de clapets coupe-feu sont onéreuses, il est judicieux de réduire au minimum leur nombre. Cet objectif peut être atteint au moyen d'un concept pertinent des appareils de traitement de l'air et de la distribution de l'air.
Grille pare-pluie 	Prise d'air neuf, bouche d'air rejeté La prise d'air neuf (aussi bouche d'air neuf) et la bouche d'air rejeté doivent être réalisées de sorte que l'installation RLT soit protégée de la pluie, de la neige ainsi que des encrassements majeurs. En outre, l'air rejeté ne doit pas incommoder ni le voisinage ni le bâtiment en question. Pour cette raison, la norme SIA 382/1 exige des distances minimales entre les prises d'air neuf et les bouches d'air rejeté. L'air rejeté est à évacuer en principe par le toit. Selon le type d'air rejeté (par exemple d'un restaurant) et l'emplacement, cette exigence est même irréfutable.

Tableau 4.4: Composants de la distribution de l'air. Symboles graphiques en référence à la norme [SN EN 12792].

Composant Symbole	Fonction Description
Bouche d'air fourni 	Apport d'air fourni Plus le local est grand et plus le débit d'air spécifique (m^3/h par m^2 au sol) ainsi que les apports thermiques sont élevés, plus le type et la disposition des bouches d'air fourni influencent la circulation de l'air et la qualité de l'air intérieur. Pour les petits locaux et les débits d'air peu élevés, la ventilation par mélange a fait ses preuves – en fait, celle-ci se met en place d'office, indépendamment d'un apport d'air. Pour les débits d'air et les apports thermiques spécifiques importants, la ventilation dite «à déplacement d'air» peut s'avérer avantageuse. L'air fourni est alors apporté de telle sorte qu'un lac d'air frais se forme au sol. Le flux d'air ascendant généré par les personnes présentes et d'autres sources de chaleur le fait ensuite monter. Ainsi, comparé à une ventilation par mélange, une meilleure qualité de l'air intérieur peut être obtenue dans la zone de séjour, respectivement une qualité équivalente peut être obtenue avec un débit d'air plus faible.
Bouche d'air repris 	Evacuation de l'air ambiant L'air repris est en général évacué dans la partie supérieure du local. En cas de débits d'air spécifiques élevés, il faut tenir compte du risque de court-circuit entre l'air fourni et l'air repris.
Bouche d'air transféré 	Transfert passif de l'air Pour de nombreuses utilisations, l'air des locaux avec apport d'air fourni (locaux d'air fourni) n'est pas ou seulement partiellement évacué du local directement par des bouches d'air repris. L'air ambiant peut passer d'un local à un autre à travers les bouches d'air transféré. Le local dans lequel l'air afflue peut être soit un local d'air repris soit une zone de transit, par exemple une zone de circulation. Pour que le transfert passif fonctionne, une certaine différence de pression doit se mettre en place entre les locaux, respectivement la bouche d'air transféré doit être dimensionnée de façon à générer une perte de charge donnée. Pour des utilisations telles que les bureaux ou les écoles, une perte de charge maximale de 3 Pa est recommandée, ceci sur la base de la norme SIA 382/5 «Ventilation mécanique dans les habitations».
Élément actif de transfert d'air 	Ventilation par mélange L'air fourni est amené dans une zone ouverte et attenante aux locaux à ventiler. Ces locaux d'air mélangé sont équipés d'éléments actifs de transfert d'air. Si les portes sont ouvertes, c'est le déplacement naturel de l'air qui assure une circulation de l'air suffisante. Si les portes sont fermées, des éléments actifs de transfert d'air assurent l'échange de l'air entre la zone d'air fourni et les locaux d'air mélangé. La ventilation par mélange se caractérise par des conduites courtes d'air fourni. De plus, un seul capteur de qualité de l'air et une seule paire de régulateurs à débit variable suffisent pour réguler la qualité de l'air intérieur de toute la zone d'air mélangé. La protection incendie définit les limites de la ventilation par mélange. Il faut notamment respecter la longueur maximale admise des chemins de fuite.

Suite du tableau 4.4.

Circuits hydrauliques pour échangeurs de chaleur air-eau

Pour raccorder hydrauliquement les réchauffeurs et les refroidisseurs d'air, les trois circuits les plus pertinents sont décrits au chapitre 2, «Installations de chauffage». Le tableau 4.5 liste les évaluations des circuits en fonction de leur application. Le circuit d'injection avec organe de réglage à passage droit et le circuit mélangeur sont équivalents du point de vue aéraulique. Le choix dépend de la présence ou de l'absence de pression dans la distribution du chaud, respectivement du froid.

Renouvellement d'air

Surveillance du ventilateur: le fonctionnement du ventilateur est généralement contrôlé en surveillant le régime au niveau de l'axe du rotor ou la vitesse de l'air au niveau de la tubulure d'admission du ventilateur.

Surveillance des filtres: pour les installations de petite et moyenne taille, les filtres sont en général surveillés manuellement en relevant la pression affichée sur l'appareil RLT. Une surveillance

automatique est possible, mais elle entre plutôt en ligne de compte pour les installations d'une certaine taille.

Pour les installations à débit d'air variable, il ne faut pas négliger le fait que la perte de pression au filtre dépend du débit d'air. Cet aspect est valable pour le contrôle automatique autant que manuel.

Clapets: les clapets d'air neuf et d'air rejeté doivent se fermer en cas d'arrêt de l'installation et de panne de courant, ceci pour empêcher que l'air extérieur froid pénètre à l'intérieur et fasse geler l'eau des échangeurs de chaleur avec circuit d'eau. Les clapets servent en outre à réduire l'infiltration de saletés. Les clapets d'air neuf et d'air rejeté devraient se refermer automatiquement, sans courant électrique; cette fonction est du reste appelée «fonction d'arrêt d'urgence». Les clapets se ferment avec un certain retard par rapport à la désactivation des ventilateurs et s'ouvrent avant leur démarrage.

Protection contre le gel: en cas de surveillance côté air, le thermostat se trouve après le premier réchauffeur

Utilisation avec	Circuit d'étranglement	Circuit d'injection avec organe de réglage à passage droit et circuit mélangeur
Réchauffeur d'air sans risque de gel p. ex. post-chauffage	Approprié A charge partielle basse, év. stratification de la température de l'air fourni; température de retour et énergie de pompage aussi basses que possible.	Approprié Bon comportement de réglage et pas de stratification de la température, même à charge partielle basse.
Réchauffeur d'air en présence de risque de gel p. ex. préchauffage	Non recommandé A charge partielle, la température de retour peut chuter au point de constituer un risque de gel.	Recommandé Surveillance aisée de la température retour.
Refroidisseur d'air pour une déshumidification régulée	Recommandé Seul ce circuit permet une déshumidification optimale.	Non approprié Aucune régulation possible de la déshumidification.
Refroidisseur d'air sans déshumidification volontaire	Non approprié A charge partielle, une déshumidification non souhaitée, en d'autres termes une consommation d'énergie sans bénéfice, peut se mettre en place.	Recommandé Une déshumidification non souhaitée est empêchée par une pré-régulation correcte de l'eau froide à l'aller.

Tableau 4.5: Aptitude de deux circuits hydrauliques pour différents échangeurs de chaleur air-eau.

d'air. En cas de surveillance côté eau, le thermostat est disposé côté retour du premier échangeur de chaleur. Si la protection contre le gel est activée, la vanne du circuit hydraulique s'ouvre et la pompe s'enclenche. Les ventilateurs s'arrêtent et les clapets d'air neuf et d'air rejeté se ferment.

Il est possible de combiner les surveillances côté air et côté eau. Une protection préventive et/ou une commande d'enclenchement de la protection contre le gel sont aussi concevables. Pour cette dernière, lors de basses températures extérieures, le réchauffeur d'air est enclenché à plein régime avant l'ouverture des clapets d'air neuf et d'air rejeté. Ce n'est qu'après l'enclenchement des ventilateurs que le régime est baissé.

Cas d'incendie: en principe les installations techniques de ventilation et de climatisation sont désactivées en cas d'incendie. Aucun circuit de désenfumage n'est prévu et les clapets sont ramenés en position fermée (voir également sous clapets coupe-feu au tableau 4.4).

Autorisation d'utiliser du courant de secours: en général, les installations RLT ne sont pas autorisées à recourir au courant de secours.

4.5 Energie pour la ventilation et pertes de charge

Un faible besoin d'énergie pour la ventilation est le résultat de pertes de charge basses, du dimensionnement correct et d'un fonctionnement régulé à la demande. Le rendement des ventilateurs ainsi que des entraînements efficaces suivent en deuxième position. La [fiche technique 24] de topmotors donne des indications pour obtenir une ventilation énergétiquement efficace.

La puissance spécifique des ventilateurs P_{SFP} (abréviation SFP pour Specific Fan Power) est une grandeur primordiale pour évaluer l'efficacité énergétique de la ventilation. Elle est calculée à l'aide de la formule (1), conformément à la norme [SN EN 16798-3].

$$P_{SFP} = \frac{P}{q_v} = \frac{\Delta p_{tot}}{\eta_{tot}} = \frac{\Delta p_{stat}}{\eta_{stat}} \quad (1)$$

avec

P_{SFP}	Puissance spécifique du ventilateur en $W/(m^3/h)$
P	Puissance électrique nominale absorbée en W
q_v	Débit d'air nominal en m^3/s
Δp_{tot}	Pression totale aux bornes du ventilateur en Pa
η_{tot}	Rendement total du ventilateur basé sur la pression totale
Δp_{stat}	Pression statique aux bornes du ventilateur en Pa
η_{stat}	Rendement global du ventilateur basé sur la pression statique

La puissance électrique absorbée exprime la puissance active qui est prélevée du réseau. En d'autres termes, elle englobe aussi les pertes de l'entraînement dans sa globalité comprenant le rotor du ventilateur, le moteur d'entraînement, la transmission, le convertisseur de fréquence le cas échéant et la commande/régulation.

En Suisse, la SFP est souvent indiquée en $W/(m^3/h)$. Les valeurs sont alors 3600 fois moindres que celles calculées au moyen de la formule (1). La classifica-

tion de la SFP, aux conditions de dimensionnement, se trouve au tableau 4.6.

La norme [SN EN 16798-3] définit comment déterminer la SFP par:

- ventilateur,
- installation RLT,
- bâtiment entier.

Par la suite nous aborderons la SFP de quelques installations RLT. A l'avenir, la SFP d'un bâtiment dans sa globalité pourrait gagner en importance. En effet, une mauvaise SFP d'un petit ventilateur d'extraction pourrait par exemple être compensée par une bonne SFP d'une grande installation.

La SFP d'une installation RLT se compose de trois éléments qui prennent en compte à chaque fois le côté air fourni et le côté air repris:

- La **SFP interne** $P_{SFP,int}$ est la puissance spécifique du ventilateur nécessaire pour compenser les pertes de charge dues aux composants de base d'un traitement d'air, c'est-à-dire aux filtres, à la RC et au caisson. Le règlement [UE 1253/2014] définit les exigences en matière de SFP interne. Cette disposition légale détermine en substance la surface de la section d'un appareil RLT.
- La **SFP additionnelle** $P_{SFP,add}$ est la puissance spécifique du ventilateur nécessaire pour compenser les pertes de charge dues aux composants additionnels dans l'appareil RLT. Il s'agit là, par exemple, du réchauffeur d'air, du refroidisseur et de l'humidificateur. Les planificateurs déterminent la SFP additionnelle notamment parce qu'elle conditionne l'étendue des composants additionnels et qu'elle définit les conditions cadres telles que la température de l'eau côté chauffage ou encore le type de construction de l'humidificateur. Mais la fabricante de l'appareil RLT participe elle aussi de manière déterminante au dimensionnement des composants.
- La **SFP externe** $P_{SFP,ext}$ représente la puissance spécifique du ventilateur nécessaire pour compenser les pertes de charge à l'extérieur de l'appareil. Il s'agit

là des pertes de charge de la distribution d'air, qui dépendent de la taille de l'installation, respectivement de la longueur du réseau de conduites et de ses équipements, tels que les régulateurs de débit et les clapets coupe-feu. La SFP externe dépend par conséquent de manière déterminante de la planificatrice de la ventilation. Elle est pourtant aussi tributaire des contraintes spatiales, donc de l'architecte et du maître d'ouvrage.

La formule suivante exprime en conséquence la SFP d'une installation RLT:

$$P_{SFP} = P_{SFP,int} + P_{SFP,add} + P_{SFP,ext} \quad (2)$$

avec

$P_{SFP,int}$ Puissance spécifique interne des ventilateurs en W/(m³/h)

$P_{SFP,add}$ Puissance spécifique addit. des ventilateurs en W/(m³/h)

$P_{SFP,ext}$ Puissance spécifique externe des ventilateurs en W/(m³/h)

Exprimant la SFP comme rapport entre la perte de charge et le rendement, comme dans l'équation (1), il en résulte:

$$P_{SFP} = \frac{\Delta p_{int,tot} + \Delta p_{add,tot} + \Delta p_{ext,tot}}{\eta_{tot}} \quad (3)$$

$$= \frac{\Delta p_{int,stat} + \Delta p_{add,stat} + \Delta p_{ext,stat}}{\eta_{stat}}$$

Tableau 4.6: Classification de la puissance spécifique du ventilateur selon la norme [SN EN 16798-3].

Catégorie	Puissance spécifique du ventilateur (SFP)	
	P_{SFP}	
	en W/(m ³ /s)	en W/(m ³ /h)
SFP 0	≤ 300	≤ 0,083
SFP 1	> 300 à 500	> 0,083 à 0,14
SFP 2	> 500 à 750	> 0,14 à 0,21
SFP 3	> 750 à 1250	> 0,21 à 0,35
SFP 4	> 1250 à 2000	> 0,35 à 0,56
SFP 5	> 2000 à 3000	> 0,56 à 0,83
SFP 6	> 3000 à 4500	> 0,83 à 1,25
SFP 7	> 4500	> 1,25

avec

$\Delta p_{int,tot}$ Perte de charge interne totale en Pa

$\Delta p_{add,tot}$ Perte de charge additionnelle totale en Pa

$\Delta p_{ext,tot}$ Perte de charge externe totale en Pa

$\Delta p_{int,stat}$ Perte de charge interne statique en Pa

$\Delta p_{add,stat}$ Perte de charge additionnelle statique en Pa

$\Delta p_{ext,stat}$ Perte de charge externe statique en Pa

η_{tot} Rendement global du ventilateur

η_{stat} Rendement statique du ventilateur

La figure 4.2 attribue les pertes de charge dues aux différents composants aux types de SFP, ceci à l'exemple d'une installation RLT avec réchauffage et refroidissement de l'air fourni.

Le tableau 4.7 liste des composants supplémentaires ainsi que des valeurs indicatives pour les pertes de charge issues de la norme [CEN/TR 16798-4]. Les valeurs de la RC se trouvent au tableau 4.10. Pour des installations énergétiquement efficaces, il faudrait viser de basses pertes de charge. Néanmoins, pour les installations d'une certaine taille, les pertes de charge dans les conduites d'air s'avèrent plutôt moyennes dans la pratique. Les exi-

Figure 4.2: Types de pertes de charge en relation avec la SFP (exemple).

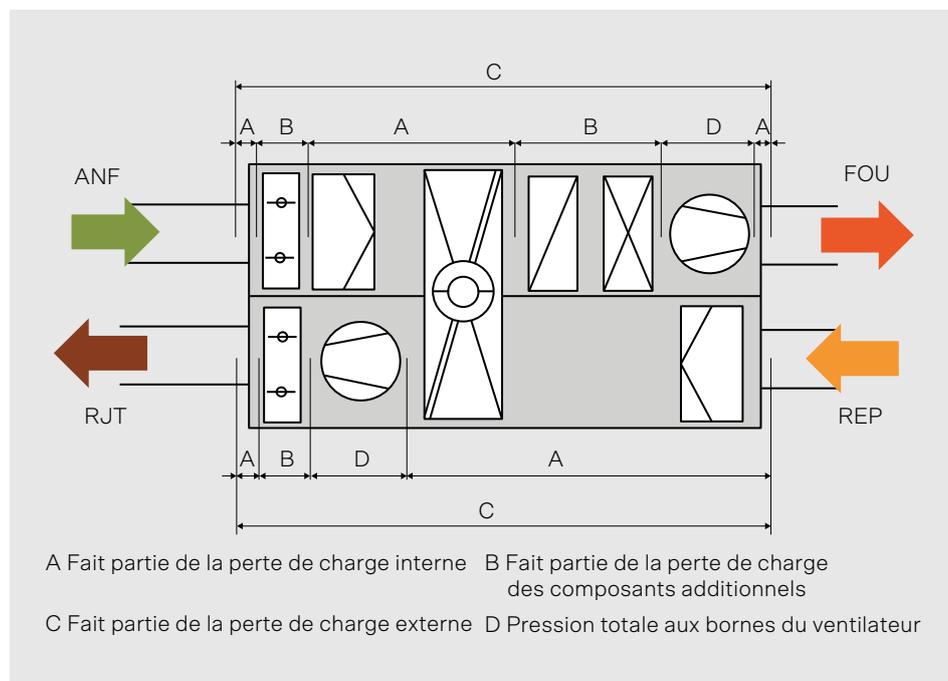


Tableau 4.7: Exemple de pertes de charge de différents composants et éléments d'installation.

a: pression différentielle finale avant remplacement

b: quasiment plus possible avec les appareils RLT qui doivent respecter la norme [UE 1253/2014]

c: en fonction de la disposition, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'appareil RLT

Élément de l'installation, composants	Type de SFP	Perte de charge en Pa		
		basse	modérée	élevée
Filtre ISO ePM10 50% à ePM1 50% ^a	interne	100	150	(250) ^b
Réchauffeur d'air	additionnelle	40	80	100
Refroidisseur d'air	additionnelle	100	140	200
Humidificateur à pulvérisation ou à atomisation	additionnelle	100	200	300
Amortisseur de bruit	additionnelle, externe ^c	30	50	80
Conduites d'air air neuf/d'air fourni	externe	200	300	600
Conduites d'air air repris/d'air rejeté	externe	100	200	300
Régulateur de débit	externe	30	50	100
Bouche d'air fourni ou d'air repris	externe	20	50	70

gences du règlement [UE 1253/2014] ont pour effet que les vitesses de l'air dans les appareils RLT actuels sont comprises entre 1,5 et 1,8 m/s.

4.6 Récupération de chaleur et taux de fuites

Types d'échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur à plaques

transfèrent la chaleur de l'air repris à l'air fourni au moyen de plaques parallèles en métal ou en matière synthétique séparant ces deux flux. Ils conviennent aux débits très faibles (appareils de ventilation individuels par local) à moyens (10 000 m³/h environ). Le côté air fourni est séparé du côté air repris. La présence d'air repris dans l'air fourni reste cependant possible s'il y a des fuites.

Dans le cas des échangeurs de chaleur rotatifs,

l'air repris traverse les alvéoles d'un disque en rotation. La masse thermique du rotor est alors réchauffée.

Grâce au mouvement de rotation constant, la masse thermique chaude atteint le côté air neuf, où elle réchauffe l'air fourni. Le point faible des échangeurs rotatifs est le transfert d'air repris à l'air fourni (voir aussi ci-dessous).

Certes, une zone dite «de purge» et des conditions de pression adéquates permettent de le réduire à moins de 1%.

Malgré cela, les échangeurs rotatifs ne sont pas pris en compte pour des usages délicats du point de vue hygiénique. Ils sont utilisés en présence de débits d'air faibles (appareils de ventilation pour habitations) à élevés.

Dans les systèmes reliés par circuit intermédiaire,

un circuit intermédiaire, contenant en principe un mélange eau-glycol, transfère la chaleur d'un échangeur de chaleur dans l'air repris à un deuxième circuit situé dans l'air fourni. L'avantage de ce système consiste à pouvoir disposer ces deux échangeurs de chaleur à distance l'un de l'autre. En d'autres termes, l'échangeur côté air fourni peut être installé au sous-sol et celui côté air repris sur le toit, par exemple, ce qui empêche le transfert de l'air repris à l'air fourni. À signaler que les systèmes reliés par circuit intermédiaire peuvent également être mis en réseau. Un inconvénient de ce type d'échangeur est le besoin d'énergie au-

xiliaire pour la pompe de circulation du circuit intermédiaire. Ils sont utilisés pour des débits d'air importants à partir de 10 000 m³/h environ.

Les échangeurs à enthalpie transfèrent, en plus de la chaleur sensible, de l'humidité. Le transfert se fait alors par sorption ou diffusion, sans aucune condensation. A cet effet, les surfaces des rotors sont pourvues d'un revêtement spécial. Les échangeurs à plaques sont équipés de membranes perméables aux molécules d'eau uniquement, mais pas aux molécules de grande taille telles que les composés organiques volatils (COV). Aucun transfert d'humidité n'est possible avec les systèmes reliés par circuit intermédiaire.

Caractéristiques de performance

La norme [EN 308] fixe les essais de performance pour les composants de la RC et définit les caractéristiques de performance suivantes:

Le rendement brut de la température

décrit le rapport entre l'augmentation de la température côté air fourni et la différence de la température air repris – air neuf, exprimé par la formule suivante:

$$\eta_{t, gro} = \frac{\theta_{22} - \theta_{21}}{\theta_{11} - \theta_{21}} \quad (4)$$

avec

θ_{11} Température de l'air repris à l'entrée de la RC en °C

θ_{21} Température de l'air fourni à l'entrée de la RC en °C

θ_{22} Température de l'air fourni à la sortie de la RC en °C

La température d'entrée de l'air fourni est typiquement égale à celle de l'air neuf. La déclaration du rendement brut de la température doit être accompagnée d'une note précisant les conditions selon lesquelles cette valeur est atteinte, respectivement comment elle a été mesurée. Les facteurs déterminants sont les débits massiques de l'air et une éventuelle condensation. En règle générale, le rendement brut de la température est indiqué à un rapport de débit massique de 1, c'est-à-dire à un débit massique d'air fourni égal à celui d'air repris. En effet, pour caractériser une RC, ce sont les débits massiques qui sont déterminants, et non pas les débits volumiques. Pour convertir un débit massique en débit volumique, il faut connaître la densité de l'air. Le rendement brut de la température est appelé parfois indice de retour de chaleur

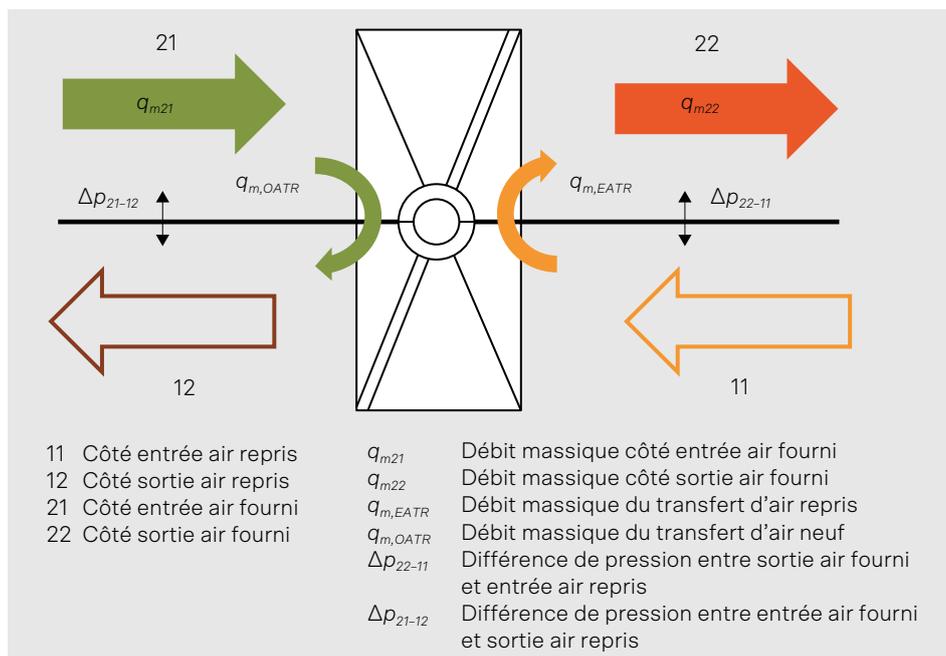


Figure 4.3: Débits d'air et taux de fuites à l'exemple d'un échangeur de chaleur rotatif.

ou encore, selon l'ancienne norme EN 308 de 1997, indice de récupération de chaleur de la ventilation.

Le transfert d'humidité est défini de manière analogue au transfert de chaleur sensible. Le rendement brut d'humidité est calculé à l'aide de la formule suivante:

$$\eta_{x,gro} = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}} \quad (5)$$

avec

- x_{11} Humidité absolue côté entrée air repris dans la RC en g/kg
- x_{21} Humidité absolue côté entrée air fourni dans la RC en g/kg
- x_{22} Humidité absolue côté sortie air fourni de la RC en g/kg

Les RC et plus particulièrement les rotors se distinguent par le fait que des transferts d'air peuvent survenir d'un côté à l'autre. Les passages et les transferts d'air principaux sont schématisés à la figure 4.3.

Le transfert d'air repris n'est pas souhaité du point de vue hygiénique. Il peut être provoqué par des conditions de pression incorrectes, qui dépendent principalement de la disposition des ventilateurs. La figure 4.2 schématise la disposition qui s'est avérée favorable dans la plupart des cas. Dans les échangeurs rotatifs, une partie du transfert d'air repris peut être due au débit d'air du rotor: ce que l'on nomme les fuites par entraînement. Une zone de purge permet de compenser ces fuites par entraînement; cette mesure engendre cependant un transfert d'air neuf.

Le transfert d'air repris tout comme le transfert d'air neuf représentent un inconvénient énergétique. La raison en est qu'il faut transporter un plus grand volume d'air pour atteindre une qualité de l'air intérieur égale à celle d'une RC sans transfert d'air.

Le transfert d'air repris respectivement le transfert d'air neuf sont exprimés par des indices sans unité, avec les abréviations EATR et OACF. EATR est l'abréviation de Exhaust Air Transfer Ratio (rapport de transfert d'air repris) et OACF celle de Outdoor Air Correction Factor (facteur de correction d'air neuf). Lors d'essais de composants RC, l'EATR est testé par la méthode du gaz traceur et calculé de la manière suivante:

$$EATR = \frac{C_{22} - C_{21}}{C_{11} - C_{21}} \quad (6)$$

avec

- C_{11} Concentration du gaz traceur côté entrée air repris dans la RC
- C_{21} Concentration du gaz traceur côté entrée air fourni dans la RC
- C_{22} Concentration du gaz traceur côté sortie air fourni dans la RC

L'indice EATR correspond donc aussi au rapport entre le débit massique du transfert d'air repris $q_{m,EATR}$ et le débit massique d'air fourni $q_{m,21}$ (voir figure 4.3). L'indice OACF est défini de la manière suivante:

$$OACF = \frac{q_{m,21}}{q_{m,22}} \quad (7)$$

avec

- $q_{m,21}$ Débit massique côté entrée air fourni
- $q_{m,22}$ Débit massique côté sortie air fourni

Différence de pression		Valeur typique OACF	Valeur typique EATR		Recommandé
Δp_{22-11}	Δp_{21-12}		Sans purge	Avec purge	
> 0	> 0	> 1	< 3 %	< 1 %	Oui
< 0	> 0	1... 1,15	< 7 %	< 3-5 %	Non
< 0	< 0	0,8... 0,95	5... 20 %	5... 20 %	Non

Tableau 4.8: Valeurs OACF et EATR typiques de rotors avec une disposition des ventilateurs conforme à la norme [Eurovent 6/15] et schématisée à la figure 4.2.

Les indices EATR et OACF sont interdépendants. Pour cette raison, il faut toujours indiquer les deux, aux mêmes conditions, notamment à la même différence de pression Δp_{22-11} et au même débit massique. Dans le cas des échangeurs rotatifs, le régime et la zone de purge jouent également un rôle décisif. Selon la recommandation [Eurovent 6/15], les indices EATR et OACF des échangeurs rotatifs se trouvent dans la plage des valeurs indiquée au tab. 4.8, ceci avec la disposition usuelle des ventilateurs schématisée à la figure 4.2. En conséquence, avec un système rotatif, les conditions de pression dans l'appareil RLT sont à planifier de sorte que les différences de pression Δp_{22-11} ainsi que Δp_{21-12} soient positives dans toute la plage de fonctionnement de l'installation. Généralement, il suffit que la différence Δp_{22-11} soit comprise entre 10 et 20 Pa. Des zones de purge dimensionnées de manière optimale permettent d'atteindre une valeur EATR inférieure à 0,3%. Si l'indice EATR est supérieur à 0,01 respectivement à 1%, la norme [Eurovent 6/15] exige une augmentation des débits d'air fourni et d'air repris par multiplication à l'indice EATR:

$$q_{v,SUP,corr} = q_{v,SUP} \cdot (1 + EATR) \quad (8)$$

$$q_{v,ETA,corr} = q_{v,ETA} \cdot (1 + EATR) \quad (9)$$

avec

$q_{v,SUP,corr}$	Débit corrigé d'air fourni
$q_{v,SUP}$	Débit planifié d'air repris avec EATR = 0
$q_{v,ETA,corr}$	Débit corrigé d'air repris
$q_{v,ETA}$	Débit planifié d'air repris avec EATR = 0

Des fuites internes de tout genre sont susceptibles de générer un indice EATR supérieur à 1% dans les appareils RLT avec échangeur de chaleur à plaques, voire dans les systèmes reliés par circuit intermédiaire.

Le débit d'air neuf et le débit d'air rejeté sont alors corrigés de la manière suivante:

$$q_{v,ODA,corr} = q_{v,SUP,corr} \cdot OACF \quad (10)$$

$$q_{v,EHA,corr} = q_{v,ETA,corr} + q_{v,SUP,corr} \cdot (OACF - 1) \quad (11)$$

avec

$q_{v,ODA,corr}$	Débit d'air neuf corrigé
$q_{v,ODA}$	Débit d'air neuf planifié avec OACF = 1
$q_{v,ETA,corr}$	Débit d'air rejeté corrigé
$q_{v,EHA}$	Débit d'air rejeté planifié avec OACF = 1

Ce qui signifie que chaque partie de l'installation (par exemple le réseau de conduites) et chaque composant (par exemple les ventilateurs) sont à dimensionner en fonction des débits d'air calculés selon les formules 8 à 10. Pour un dimensionnement précis, il faut recourir à un processus d'itération, car toute altération des débits d'air provoque des conditions de pressions modifiées et par conséquent aussi des indices EATR et OACF modifiés. La norme [Eurovent 6/15] livre des exemples de calcul à ce sujet.

Par transfert de l'air repris vers l'air fourni, l'indice EATR influence la température et l'humidité de l'air fourni, ce qui a pour conséquence de générer un rendement trompeur (supérieur à la réalité) de la RC.

La norme [EN 308] définit pour cette raison le rendement net, qui corrige cette influence-là. Le rendement net de la température est calculé de la manière suivante:

$$\eta_{t,net} = \frac{\eta_{t,gro} - EATR}{1 - EATR} \quad (12)$$

avec

$\eta_{t,gro}$	Rendement brut de la température selon la formule (4)
EATR	EATR selon la formule (6)

L'efficacité nette de l'humidité est calculée de manière analogue.

Les flux de chaleur à travers le caisson peuvent tout autant fausser le bilan énergétique de la RC. La norme [EN 308] définit pour cette raison un

malus à appliquer au rendement de la température et de l'humidité si dans le cadre d'un essai le déséquilibre énergétique entre l'air fourni et l'air repris est supérieur à une tolérance donnée. Le rendement de la température indiquée dans le rapport d'essai est alors de:

$$\eta_{t,efy} = \eta_{t,net} - k_{hb} \quad (13)$$

avec

$\eta_{t,net}$ Rendement brut de la température selon la formule (12)

k_{hb} Malus en cas de mauvais bilan énergétique de l'appareil RLT

Le malus k_{hb} est de 0,01 par point de pourcentage dépassant la tolérance admise du déséquilibre énergétique. Pour l'essai d'une RC sans récupération d'humidité selon la classe de précision P1, la tolérance s'élève p. ex. à 4 %. Toutefois, le malus ne s'applique que rarement aux appareils de qualité pourvus de caissons étanches et thermiquement isolés.

Remarque: pour évaluer la RC et dimensionner les débits d'air de manière correcte, il est indispensable de connaître les indices EATR et OACF ainsi que le rendement corrigé de la température $\eta_{t,efy}$. À cet égard, ce sont les valeurs résultant de la disposition réelle des composants à l'intérieur de l'appareil RLT qui sont déterminantes.

La norme [EU 1253/2014] exige que les appareils RLT dotés de ventilateurs d'air

fourni et d'air repris soient équipés d'une RC. S'il s'agit d'un échangeur rotatif ou d'un échangeur à plaques, le rendement brut minimal de la température doit s'élever à 0,73, et si on a affaire à un système à circuit intermédiaire, à 0,68. La norme [EU 1253/2014] ne définit malheureusement aucune exigence ni pour les indices EATR et OACF, ni pour l'étanchéité et l'isolation thermique des caissons. Il est recommandé de recourir uniquement à des appareils ayant un indice EATR maximal de 0,03 respectivement de 3 % aux conditions de dimensionnement. La norme [SIA 382/1] requiert une isolation thermique minimale de 50 mm si l'appareil se trouve à l'intérieur, et de 80 mm s'il se trouve à l'extérieur.

Les exigences – tout comme en général les indications fournies par les fabricants à propos du rendement de la température et de l'humidité – présument que le débit massique d'air fourni est égal au débit massique d'air repris. La conversion de débits massiques égaux en débits massiques inégaux ou l'inverse peut se faire au moyen de logiciels mis à disposition par le fabricant. Une autre possibilité consiste à recourir aux formules d'approximation présentées dans l'ouvrage [Ventilation des habitations] au point 9.3.

Le tableau 4.9 liste quelques valeurs indicatives pour des composants RC avec les hypothèses suivantes:

– les exigences de la norme [EU 1253/2014] sont respectées,

Tableau 4.9: Valeurs indicatives des caractéristiques de performance de composants RC.

a: perte de charge par débit d'air
b: pour les rotors, il s'agit de son entraînement, pour les systèmes à circuit intermédiaire, de la pompe.
c: pour les rotors, ces valeurs sont variables si la disposition des ventilateurs est correcte et telle que schématisée à la figure 4.2.

Caractéristique de performance	Symbole	Unité	Echangeur de chaleur à plaques	Rotor	Système relié par circuit intermédiaire
Rendement net de la température	$\eta_{t,net}$	–	0,73 ... 0,85	0,72 ... 0,85	0,68 ... 0,75
Rendement net de l'humidité	$\eta_{x,net}$	–	0,55 ... 0,65	0,70 ... 0,85	–
Perte de charge ^a	Δp	Pa	70 ... 150	70 ... 150	100 ... 200
Rapport puissance électr. entraînement aux. – débit d'air ^b	P_{aux}/q_v	W/(m ³ /h)	0	0,01 ... 0,02	0,05 ... 0,15
Facteur de correction d'air neuf ^c	OACF	–	1	1,0 ... 1,1	1
Rapport de transfert d'air repris ^c	EATR	%	0 ... 1	Zone de purge Sans 2 ... 5 Avec 0,3 ... 1	0

- le rapport de débit massique entre l'air fourni et l'air repris est égal à 1 et
- il ne se produit aucune condensation.

En cas de systèmes reliés par circuit intermédiaire, le flux du liquide doit être accordé au débit d'air. Un flux trop faible tout comme un flux trop élevé réduisent le bénéfice d'une RC. En négligeant l'énergie nécessaire pour le pompage, la solution optimale est:

$$q_{v,a} \cdot \rho_a \cdot c_{p,a} = q_{v,f} \cdot \rho_f \cdot c_{p,f} \quad (14)$$

avec

$q_{v,a}$	Débit d'air en m ³ /h
$q_{v,f}$	Débit du liquide dans le circuit intermédiaire en m ³ /h
ρ_a	Densité de l'air en kg/m ³
ρ_f	Densité du liquide en kg/m ³
$c_{p,a}$	Capacité thermique spécifique de l'air en kJ/(kg·K)
$c_{p,f}$	Capacité thermique spécifique du liquide en kJ/(kg·K)

Pour donner un exemple, un mélange eau-glycol contenant 30 % d'éthylène glycol se caractérise par un débit 3350 fois moindre qu'un débit d'air (à une altitude de 400 m et à 20 °C).

Si la puissance de la pompe est prise en compte et si l'énergie électrique pour les pompes est pondérée par le facteur 2 par rapport à l'énergie thermique récupérée, alors le débit optimal de liquide est de 2 à 5 % plus bas. La valeur exacte dépend des températures de l'air et du rapport entre la puissance électrique absorbée de la pompe et du débit d'air. Le débit du liquide doit toujours être adapté au débit d'air. Par conséquent, une commande à vitesse variable du régime de la pompe est indispensable.

En cas de basses températures extérieures, il existe le risque de formation de glace et de gel côté air rejeté. Des mesures adéquates doivent donc être prises pour prévenir d'éventuels dysfonctionnements. L'ouvrage [Ventilation des habitations] résume et évalue au point 9.5 les solutions possibles pour **assurer la protection anti-givrage** des appareils RLT de petite taille.

Description	Symbole	Unité	Appareil A	Appareil B
Disposition des ventilateurs			Des deux côtés après la RC	Côté air repris avant la RC Côté air fourni avant la RC
Différence de pression côté chaud	Δ_{p22-11}	Pa	60	-340
Différence de pression côté extérieur	Δ_{p21-12}	Pa	240	-140
Facteur de correction d'air extérieur	OACF	-	1,04	0,85
Rapport de transfert d'air extrait	EATR	-	0,020	0,200
Rendement brut de la température	$\eta_{t,gro}$	-	0,750	0,800
Rendement net de la température	$\eta_{t,net}$	-	0,745	0,750
Déséquilibre énergétique mesuré	$\Delta\varphi$	%	3,0	8,0
Déséquilibre énergétique, tolérance	$\Delta\varphi_{lim}$	%	4,0	4,0
Malus pour un mauvais bilan énergétique	k_{hb}	-	0,000	0,040
Rendement de la température	$\eta_{t,efy}$	-	0,745	0,710
Débits d'air fourni et d'air repris planifiés	$q_{v,SUP}$ $q_{v,ETA}$	m ³ /h	2000	2000
Débits d'air fourni et d'air repris corrigés	$q_{v,SUP,corr}$ $q_{v,ETA,corr}$	m ³ /h	2040	2400
Débits d'air neuf et d'air rejeté corrigés	$q_{v,ODA,corr}$ $q_{v,EHA,corr}$	m ³ /h	2122	2040

Tableau 4.10: Rendement de la température et débits d'air à l'exemple de deux appareils RLT.

Pour les installations moyennes et grandes avec échangeur de chaleur à plaques, la solution usuelle est la pose d'un by-pass sur la RC. Il s'agit par ailleurs de la solution la plus répandue pour désactiver la RC en été. Pour les échangeurs rotatifs, il est en général possible de réaliser la protection anti-givrage en adaptant le régime du rotor. Pour un système relié par circuit intermédiaire, la protection anti-givrage est assurée par un by-pass régulé sur l'échangeur de chaleur côté air repris.

Exemple: impact de la disposition des ventilateurs dans les appareils RLT

Les valeurs déterminantes sont résumées au tableau 4.10. La colonne «appareil A» correspond à un appareil RLT avec une disposition optimale des ventilateurs avec un caisson étanche et thermiquement bien isolé. La colonne «appareil B» s'applique à un appareil avec une disposition défavorable des ventilateurs, avec un caisson insuffisamment isolé et qui présente des fuites.

Les calculs sont effectués sur la base des formules (8) à (13). Par simplification, le processus d'itération est supprimé.

L'exemple démontre qu'un indice EATR et un taux de fuites élevés de même qu'un caisson insuffisamment isolé peuvent aboutir à un résultat trompeur, faisant croire à un bon rendement brut de la température. Donc, le rendement brut de la température reflète le bénéfice de la RC de manière insuffisante. Seul le rendement corrigé de la température $\eta_{t,efy}$ est pertinent.

Les résultats de l'appareil B nous montrent en outre l'impact fatal de la disposition défavorable des ventilateurs: la distribution de l'air fourni et de l'air repris ainsi que les ventilateurs doivent être dimensionnés de 20 % plus grand par comparaison avec l'hypothèse EATR = 0. Dans le cas de l'appareil A, les conduites d'air neuf et d'air rejeté ainsi que le ventilateur d'air rejeté doivent être dimensionnés plus grand de 6 % seulement, les conduites d'air fourni et d'air repris ainsi que le ventila-

teur d'air fourni augmentés de 2 %. Si l'on recourait à un appareil étanche et bien isolé pourvu d'un échangeur de chaleur à plaques à la place d'un appareil avec échangeur rotatif, la majoration des débits d'air serait caduque. Quant à savoir si le bilan énergétique d'un tel appareil (RC et énergie pour la ventilation) serait meilleur, cela dépendrait de la perte de charge et du rendement de la température de la RC.

La figure 4.4 schématise, à titre d'exemple, une installation de ventilation bidirectionnelle avec une RC par échangeur de chaleur à plaques. La température de l'air fourni est réglée dans la mesure du possible au moyen du clapet du by-pass. Après cette régulation, le réchauffeur d'air entre en fonction. La température FOU est réglée dans ce cas via la vanne de régulation dans le circuit de chauffage. En été, la RC est activée lorsque la température ANF est supérieure à la température REP. La séquence de réglage est illustrée à la figure 4.5.

Il est aussi possible de mettre en place une régulation en fonction de la température ambiante à la place d'une régulation en fonction de la température de l'air fourni. La valeur de consigne de la température de l'air fourni est alors réglée en fonction de la température de

l'air ambiant. Le clapet by-pass est par ailleurs également utilisé dans le cadre de la protection anti-givrage de la RC.

Précisions

- En hiver, le recours à un échangeur à enthalpie permet une légère augmentation de l'humidité de l'air ambiant. Cependant, le taux d'humidité de l'air intérieur ne peut être garanti de cette manière. En comparaison d'une RC sans récupération d'humidité, les échangeurs à enthalpie ont en outre un avantage: la protection anti-givrage ne doit être activée que lors de températures extérieures plus basses.
- Une RC sans récupération d'humidité nécessite un écoulement des condensats.
- Pour les systèmes rotatifs, il faut tenir compte des conditions de pression de la RC.

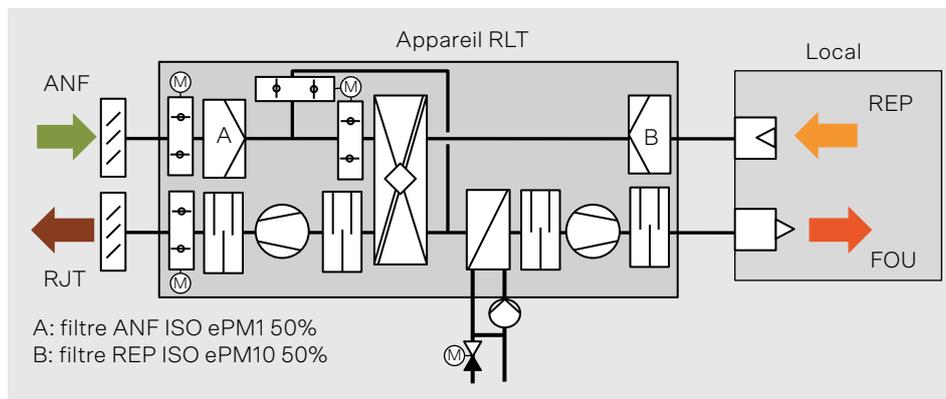


Figure 4.4: Exemple d'une installation de ventilation bidirectionnelle (schéma sans capteurs ni boucles de régulation).

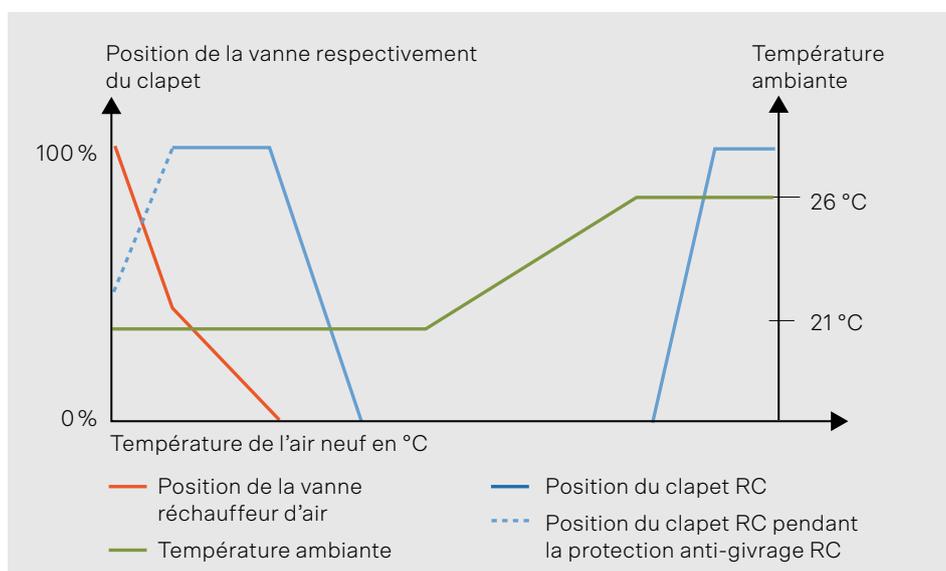


Figure 4.5: Exemple d'un diagramme de régulation pour une installation de ventilation bidirectionnelle.

– Un appareil RLT doit comporter des espaces vides suffisants pour permettre l'accès lors des travaux de maintenance.

Installation de conditionnement d'air

Les installations de conditionnement d'air sont mises en œuvre uniquement dans des cas exceptionnels, car des affectations telles que les bureaux et salles de réunion ne demandent guère toutes les fonctions de traitement d'air disponibles. Le fonctionnement des ventilateurs est généralement régulé en fonction du régime, selon le besoin réel. Il est possible de commander et réguler l'installation en fonction des paramètres suivants: température ambiante, humidité de l'air ambiant, durée de fonctionnement, critères de présence (détecteur de mouvements, etc.) et qualité de l'air intérieur (CO_2 , VOC). L'air neuf est filtré et préconditionné par la RC. Etant donné qu'une installation de conditionnement d'air dispose toujours

d'une humidification et d'une déshumidification, il faudrait recourir dans la mesure du possible à une RC avec récupération d'humidité. L'installation schématisée à la figure 4.6 prévoit un rotor à cet effet.

Le post-chauffage de l'air est activé ou désactivé en séquence par rapport à la récupération de chaleur. La régulation s'effectue via la vanne de régulation du réchauffeur d'air dans le circuit de chauffage. Selon la norme SIA [SIA 382/1], l'humidification de l'air est dimensionnée en hiver au maximum à 5 grammes d'eau par kilogramme d'air, la déshumidification en été à 13,5 grammes. Pour obtenir une déshumidification ciblée, la température de l'eau de refroidissement doit être de 6°C environ (SIA 382/1). L'air doit être réchauffé après la déshumidification ciblée, ce qui est souvent réalisable au moyen de la chaleur perdue de la machine frigorifique. Pour des raisons énergétiques, l'air est humidifié de manière

Figure 4.6: Exemple d'un appareil RLT pour une installation de conditionnement d'air avec rotor.

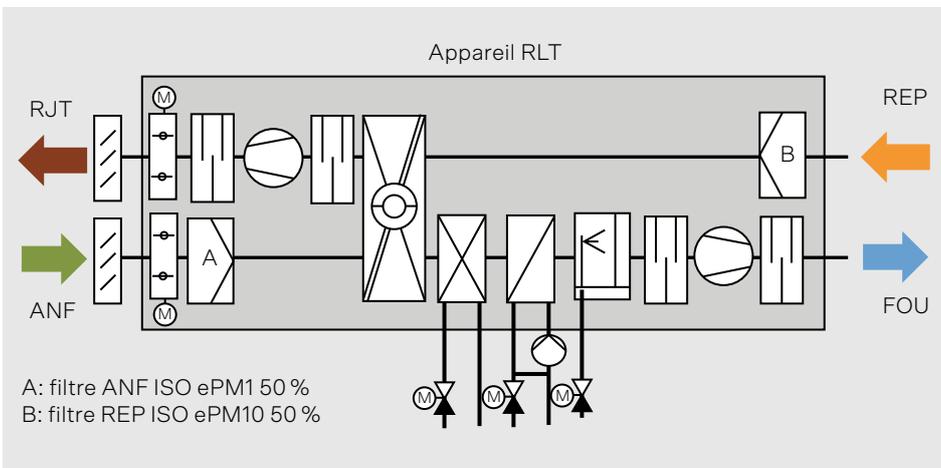
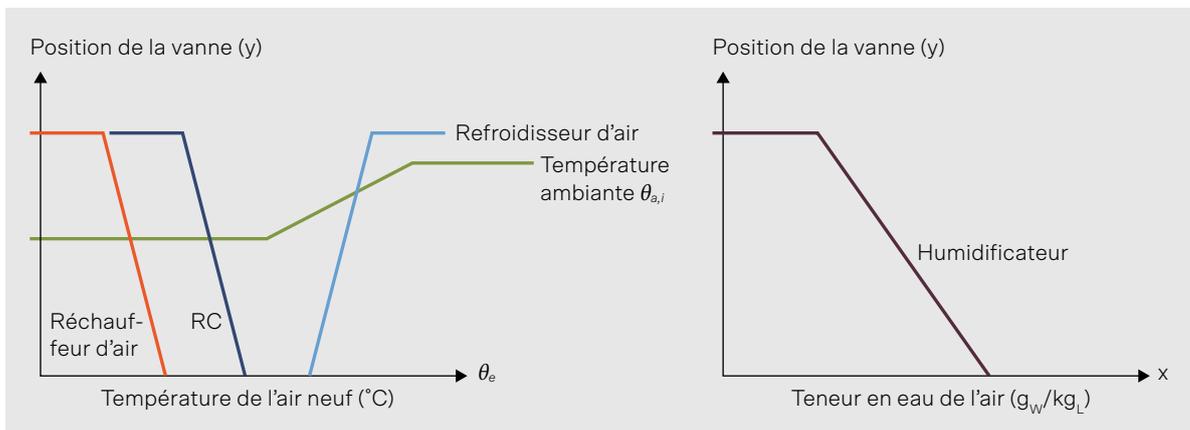


Figure 4.7: Exemple d'un diagramme de régulation pour une installation de conditionnement d'air (fonctionnalité de la RC en été voir texte).



adiabatique. En été, la RC est enclenchée lorsque l'enthalpie de l'air repris est inférieure à celle de l'air neuf.

La figure 4.5 montre les séquences de réglage pour la RC, le réchauffement d'air, l'humidification et la déshumidification. Il est présumé que la température de dimensionnement est assez élevée pour que le rotor (avec transfert d'humidité) ne fonctionne pas en mode protection anti-givrage.

Précisions

- La séquence refroidisseur d'air, réchauffeur d'air et humidificateur dans l'appareil doit correspondre aux fonctions exigées.
- L'humidification nécessite de l'eau purifiée.
- Prise en compte nécessaire des conditions de pression sur le rotor.
- Choix des circuits hydrauliques selon le tableau 4.5.
- Planification de suffisamment d'interstices pour faciliter la maintenance et le nettoyage.
- La protection antigèle est à vérifier sur la base des données climatologiques; même avec une RC efficace, un préchauffage peut s'avérer nécessaire entre le refroidisseur et le réchauffeur dans des régions avec des températures extérieures très basses (régions alpines).

4.8 Systèmes de ventilation

Ventilation par local

Les ventilations par local sont réalisées au moyen d'appareils de ventilation bidirectionnels sans raccordement au réseau de conduites. En d'autres termes, les appareils RLT sont disposés dans les locaux à ventiler. Pour les désigner, la norme [SIA 382/5] utilise l'expression «appareils de ventilation de local individuel».

Cette solution a l'avantage de ne demander aucune pose de conduites d'air. Les inconvénients sont l'investissement nécessaire pour le maintien (notamment pour le remplacement des filtres) et le niveau sonore généré par les appareils dans le local. Il peut aussi arriver que les bouches d'air neuf disposées en façade aspirent de l'air chaud en été. Ces appareils sont souvent combinés avec des ventilateurs d'extraction positionnés dans les salles d'eau.

Ce système mixte est traité au chapitre 8 du livre [Ventilation des habitations], lequel expose également les exigences auxquelles doivent répondre ces appareils.

Installation à zone unique

Une installation à zone unique correspond à un appareil RLT alimentant une seule zone. Une zone se compose d'un ou de plusieurs locaux ayant les mêmes profils d'utilisation et les mêmes conditionnements d'air. Le débit d'air est commandé, respectivement régulé uniquement au moyen du régime des ventilateurs. L'installation de ventilation bidirectionnelle illustrée à la figure 4.5 représente une installation à zone unique.

Installation multizone

Dans une installation multizone, un appareil RLT alimente plusieurs zones avec différents profils d'utilisation et/ou différents conditionnements d'air. Selon le type, l'installation permet la régulation ou la commande par zone du débit d'air et/ou du conditionnement de l'air fourni. Pour les installations de condi-

tionnement d'air, le post-chauffage et/ou le refroidissement par zone entrent aussi en ligne de compte. Etant donné que le chauffage et le refroidissement des locaux sont de nos jours assurés principalement par des chauffages au sol et des plafonds rafraîchissant, nous nous occupons ici uniquement de la commande, respectivement de la régulation des débits d'air.

La figure 4.8 schématise, à titre d'exemple, la configuration d'une installation multizone à débit d'air variable. Ce genre d'installation est souvent désigné comme installation VAV, l'abréviation VAV provenant du terme anglais «Variable Air Volume».

Les débits d'air fourni et d'air repris d'un local sont d'ordinaire réglés selon la qualité de l'air intérieur. Les installations de conditionnement d'air permettent en sus une régulation selon la température ambiante ou encore une régulation combinée. Il s'agit alors d'adapter le régime des ventilateurs d'air fourni et d'air repris aux besoins requis. Voici trois solutions pour réguler des ventilateurs, schématisées à la figure 4.8:

A) Pression d'alimentation constante du ventilateur

B) Pression constante à la première bifurcation et à la dernière jonction

C) Régulation de la pression minimale au moyen de la position du régulateur VAV

Avec la solution A, des capteurs mesurent la différence de pression entre le manchon d'entrée et le manchon de sortie des ventilateurs. Il s'agit là de la solution la plus énergivore pour transporter l'air.

Avec la solution B, les capteurs de pression sont placés à la première bifurcation du réseau d'air fourni par rapport à l'appareil RLT et à la dernière jonction du réseau d'air repris en amont de l'appareil RLT. À ces endroits, les capteurs mesurent la surpression, respectivement la dépression par rapport à la pression environnante. Cette solution tient compte du fait que les pertes de charge diminuent parallèlement au débit d'air, ceci depuis l'entrée air neuf jusqu'à la première bifurcation et depuis la dernière jonction jusqu'à la sortie air rejeté.

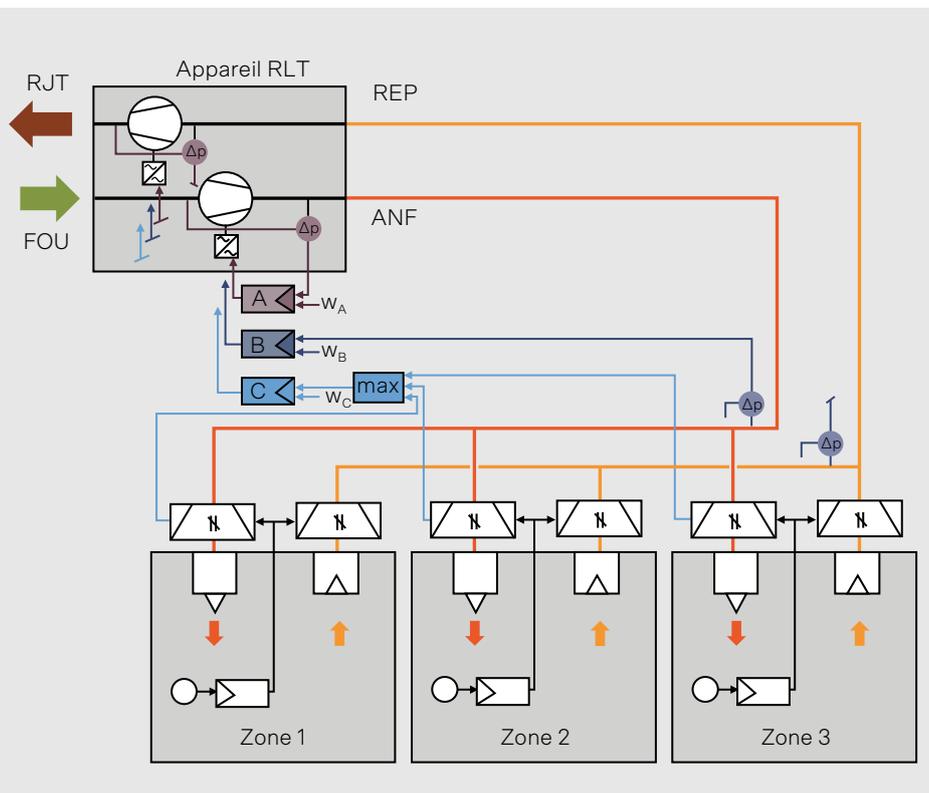


Figure 4.8: Installations multizone: solutions A, B et C pour la régulation des ventilateurs.

Avec la solution C, les régulateurs VAV des différentes zones transmettent leur degré d'ouverture (de 0 à 100 %) à une régulation supérieure. Celle-ci modifie alors le régime des ventilateurs et par là la pression d'alimentation de sorte que le régulateur VAV le plus défavorable soit ouvert à environ 90 %, ce qui ménage encore une certaine réserve de réglage.

Pour les bâtiments composés de nombreux locaux similaires, il est possible de recourir à une valeur moyenne issue des 3 à 5 régulateurs VAV avec la plus grande ouverture. Cette solution comporte un risque, à savoir que dans certains locaux la qualité de l'air visée ne soit par moments pas atteinte. Pour les bureaux et des affectations comparables, cet inconvénient est toutefois acceptable, car il est contrebalancé par une meilleure efficacité énergétique. La solution C nécessite le moins d'énergie pour la ventilation.

Exemple: pression d'alimentation et puissance des ventilateurs dans les installations de ventilation bidirectionnelles.

Le ventilateur d'air fourni d'une installation de ventilation bidirectionnelle transporte un débit d'air nominal de 2000 m³/h avec une pression d'alimentation de 500 Pa. La perte de charge depuis la prise d'air neuf jusqu'à la première bifurcation s'élève à 320 Pa. Dans le cadre des trois solutions présentées applicables aux installations multizone, comment les pressions d'alimentation et la puissance du ventilateur requise se modifient-elles par rapport aux débits d'air?

La figure 4.9 comporte trois courbes correspondant aux solutions A, B et C susmentionnées. Elles représentent les pressions d'alimentation requises en fonction du débit d'air. Les courbes de la figure 4.10 représentent la puissance électrique absorbée du ventilateur en fonction du débit d'air. Les courbes de la solution C dépendent de l'écart qui existe entre les débits d'air des différentes zones.

Si le débit d'air se modifiait de manière synchrone dans tous les régulateurs

VAV, la pression d'alimentation nécessaire suivrait la courbe caractéristique de l'installation de ventilation. Si le régulateur VAV le plus défavorable était ouvert en continu, la courbe caractéristique y relative serait identique à celle de la solution B. Dans cet exemple, on présume que la courbe effective se trouve entre les deux mais que le régime minimal du ventilateur limite son tracé vers le bas.

Supposé que le débit d'air moyen s'élève à 70 % du débit nominal, la solution B économise 33 % d'énergie pour la ventilation par rapport à la solution A et la solution C même 42 % par rapport à la solution A.

Dans cet exemple avec une installation assez petite, le bénéfice de la solution C par rapport à la solution B n'est pas très grand. Mais plus l'installation est grande et plus les pertes de charge de la distribution de l'air sont élevées en comparaison de celles dans l'appareil RLT, plus la solution C s'avère intéressante.

Pression en Pa

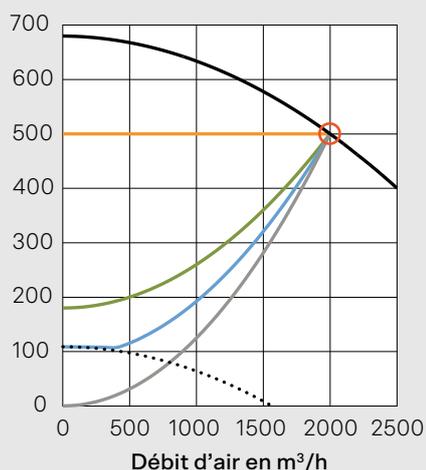


Figure 4.9: Pression d'alimentation nécessaire pour les solutions A, B et C.

Puissance électrique absorbée du ventilateur en kW

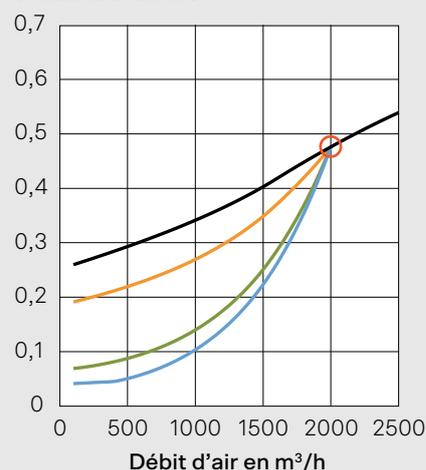


Figure 4.10: Puissance électrique absorbée du ventilateur d'air fourni pour les solutions A, B et C.

Légende

- Solution A
- Solution B
- Solution C
- Courbe du ventilateur, dimensionnement
- Courbe du ventilateur au régime minimal
- Courbe caractéristique de l'installation

4.9 Sources

- [EN 308] Norme européenne EN 308. Echangeurs thermiques – Procédures d'essai pour la détermination de la performance des récupérateurs de chaleur air/air. Bruxelles, 2021.
- [EN-105] Conférence des services cantonaux de l'énergie (EnFK). Aide à l'application EN-105 Installations de ventilation, édition décembre 2018. Télécharger via www.endk.ch → Professionnels → Aides à l'application.
- [EnEV] Ordonnance fédérale sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique d'installations, de véhicules et d'appareils fabriqués en série (Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique, OEEE) Berne, 2017.
- [EU 1253/2014] Commission européenne. Règlement UE n°1253/ 2014.4 portant sur la mise en œuvre de la directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les exigences d'écoconception pour les unités de ventilation. Bruxelles, 2014.
- [Eurovent 6/15] Recommandation Eurovent 6/15. Les fuites d'air dans les unités de traitement d'air: Directives pour améliorer la qualité de l'air intérieur et corriger les performances. Bruxelles, 2021.
- [Handbuch Klimatechnik] Hörner, Berndt; Schmidt, Manfred; Casties, Manfred (Hrsg.): Handbuch der Klimatechnik, Set bestehend aus Band 1: Grundlagen, Band 2: Anwendungen, Band 3: Aufgaben und Übungen. VDE Verlag Berlin/Offenbach, 2018.
- [ISO 16890-1] Norme ISO 16890-1. Filtres à air de ventilation générale – Partie 1: Spécifications techniques, exigences et système de classification fondé sur l'efficacité des particules en suspension. Organisation internationale de normalisation. Genève, 2016.
- [Fiche technique n° 24] Topmotors. [Fiche technique n° 24] Transport de l'air. Télécharger. Berne, 2021. Via www.topmotors.ch → Connaissances → Fiches techniques. Consulté en mai 2022.
- [SIA 180] Norme SIA 180. Isolation thermique, protection contre l'humidité et climat intérieur dans les bâtiments. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2014.
- [SIA 2024] Cahier technique SIA 2024. Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2021.
- [SIA 382/1] Norme SIA 382/1. Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2014.
- [SIA 382/5] Norme SIA 382/5. Ventilation mécanique dans les habitations. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2021.

- [SN CEN/TR 16798-4] Norme suisse SN CEN/TR 16798-4. Performance énergétique des bâtiments – Partie 4: Ventilation dans les bâtiments non résidentiels – Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air – Rapport technique – Interprétation des exigences de l'EN 16798-3. Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour, 2017.
- [SN EN 12792] Norme suisse SN EN 12792. Ventilation pour bâtiments – Symboles, terminologie et symboles graphiques. Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour, 2003.
- [SN EN 16798-1] Norme suisse SN EN 16798-1. Performance énergétique des bâtiments – Partie 1: Données d'entrées d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, l'ambiance thermique, l'éclairage et l'acoustique – Module M1-6. Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour, 2019.
- [SN EN 16798-3] Norme suisse SN EN 16798-3. Performance énergétique des bâtiments – Ventilation des bâtiments – Partie 3: Ventilation dans les bâtiments non résidentiels – Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air (Modules M5-1, M5-4). Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour, 2017.
- [SICC VA 104-01] Directive SICC 104-01. Technique aéraulique – Qualité de l'air – Partie 1 : Exigences hygiéniques pour les installations et appareils aérauliques. Société suisse des ingénieurs en technique du bâtiment (Les Planificateurs, SICC). Urtenen-Schönbühl, 2019.
- [AEAI 25-15] Directive de protection incendie AEAI 25-15. Installations aérauliques. Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI). Berne, 2015.
- [Ventilation des habitations] Huber, Heinrich: Ventilation des habitations – Planification, réalisation, exploitation. Faktor Verlag. Zurich, 2021.

Alimentation d'eau chaude sanitaire

Reto von Euw 5.1 Structure et composants

Différents types d'alimentation d'eau chaude sanitaire

Une alimentation d'eau chaude sanitaire se compose de l'installation de production et du système de distribution d'eau chaude. Le système de distribution peut comprendre des conduites maintenues en température (p. ex. une boucle de circulation), des conduites non maintenues en température ainsi que les points de soutirage.

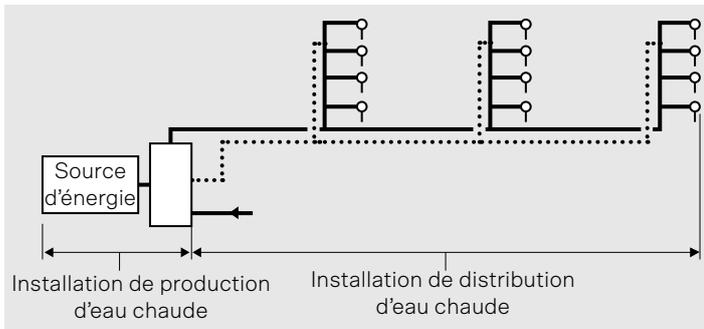


Figure 5.1: Représentation schématique d'une alimentation d'eau chaude sanitaire.

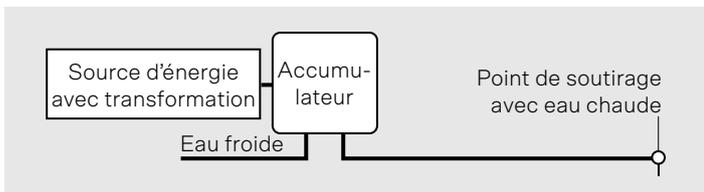


Figure 5.2: Représentation schématique d'une alimentation individuelle d'eau chaude sanitaire.

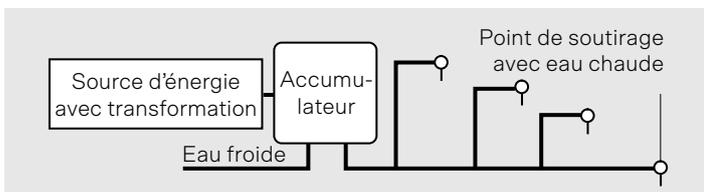


Figure 5.3: Représentation schématique d'une alimentation groupée d'eau chaude sanitaire.

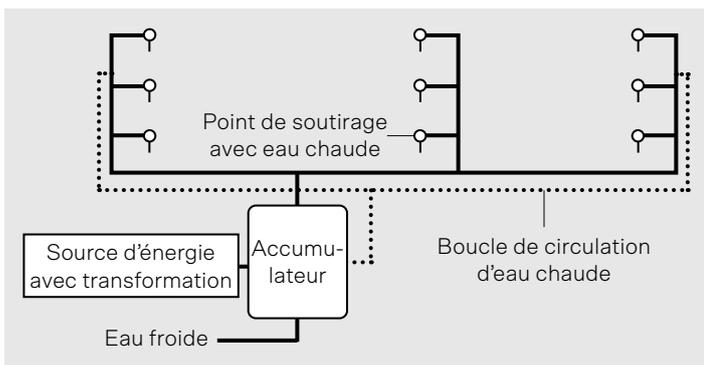


Figure 5.4: Représentation schématique d'une alimentation centralisée d'eau chaude sanitaire.

Alimentation individuelle

Une alimentation individuelle alimente un seul point de soutirage d'eau chaude à partir d'une installation de production d'eau chaude. Il s'agit là de points de soutirage d'eau chaude associés à un faible besoin en eau chaude, tels que des lavabos et des éviers, dans des bâtiments industriels et commerciaux. Ceux-ci peuvent être alimentés à l'aide de petits chauffe-eau à accumulation (jusqu'à une contenance d'env. 30 l) ou par des chauffe-eau instantanés. Etant donné que dans ce type de grands bâtiments, les points de soutirage de l'eau chaude peuvent être répartis un peu partout, les alimentations individuelles permettent d'éviter les déperditions thermiques dues à de longues conduites.

Alimentation groupée

L'alimentation groupée, aussi appelée production d'eau chaude décentralisée par étage, alimente un groupe de soutirage d'eau chaude constitué de deux ou plusieurs points de soutirage, à partir d'une installation de production d'eau chaude. Comme la production d'eau chaude sanitaire (PEC) et les points de soutirage sont proches les uns des autres, il est possible de renoncer à une boucle de circulation d'eau chaude ou à un ruban de maintien en température, pour autant que les durées de soutirage soient respectées conformément à la norme [SIA 385/1].

Dorénavant, dans les bâtiments d'habitation, c'est seulement dans des cas exceptionnels que le [MoPEC] autorise une alimentation groupée avec un chauffe-eau électrique direct. Un chauffe-eau électrique direct n'est plus autorisé, sauf si l'eau chaude sanitaire est chauffée ou préchauffée par le générateur de chaleur pour le chauffage des locaux pendant la période de chauffage. Si l'eau chaude est produite principalement à l'aide d'énergie

renouvelable ou de rejets thermiques, un chauffage électrique direct est également autorisé.

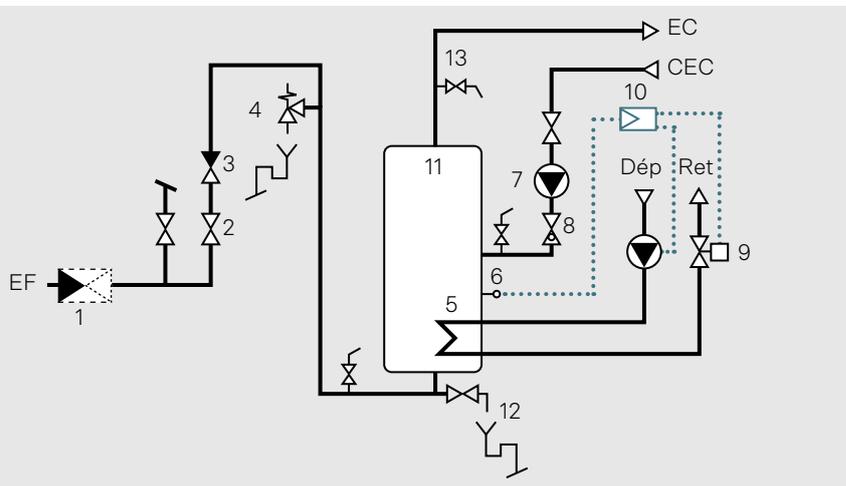
Alimentation centralisée

Depuis une installation centrale, l'alimentation centralisée alimente tous les points de soutirage d'eau chaude d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments via un système de conduites commun. Dans les bâtiments d'habitation, le [MoPEC] n'autorise plus le chauffage direct exclusivement électrique de l'eau

froide. Les alimentations centrales d'eau chaude devraient être intégrées à la génération de chaleur pour le chauffage des locaux, afin que celui-ci produise également l'eau chaude, du moins pendant la période de chauffage. Une alternative serait l'utilisation de l'énergie solaire thermique ou une production de chaleur couvrant les besoins en chaleur pour l'eau chaude sanitaire avec au moins 50% de sources d'énergies renouvelables.

Composants d'une alimentation d'eau chaude sanitaire

Figure 5.5: Les principaux composants d'une installation de production d'eau chaude.
 EF: eau froide
 EC: eau chaude
 CEC: boucle de circulation d'eau chaude
 Dép: départ (aller)
 Ret: retour



- 1 **Détendeur (Dét)**
(souvent aussi: réducteur de pression) Si la pression hydraulique est trop élevée dans le réseau d'alimentation, elle doit être réduite. Le détendeur réduit la pression d'eau du réseau d'alimentation (pression d'alimentation) à une pression de maintien plus basse.
- 2 **Vanne d'arrêt** Cette vanne sépare les différentes parties du réseau les unes des autres.
- 3 **Dispositif anti-retour (DAR)** Lorsque de l'eau froide est chauffée, l'augmentation du volume entraîne une augmentation de la pression dans le système de conduites. Le dispositif anti-retour empêche la propagation de la pression dans tout le réseau d'eau froide.
- 4 **Vanne de sécurité (VS)** Si dans le réseau de conduites la pression dépasse la valeur réglée en raison de la production d'eau chaude, la VS s'ouvre et évacue de l'eau. Les vannes de sécurité peuvent être réglées à une pression supérieure de 100 kPa au maximum par rapport à la pression au repos. La plupart du temps, les vannes de sécurité sont réglées en usine à une pression de 600 kPa.

- | | | |
|----|---|---|
| 5 | Echangeur de chaleur (EchC) | Les échangeurs de chaleur transfèrent la chaleur d'un fluide à un autre. On différencie les échangeurs de chaleur intégrés et non intégrés. |
| 6 | Sonde ou thermostat | Les accumulateurs sont équipés soit de sondes (de température) ou de thermostats. La sonde de l'accumulateur ne fait que relever et transmettre la température au régulateur. La valeur de consigne est réglée à l'appareil de régulation. En revanche, pour les accumulateurs dotés d'un thermostat, la valeur de consigne «marche» et la valeur de consigne «arrêt» (respectivement l'hystérésis) sont réglées directement au thermostat. |
| 7 | Circulateur d'eau chaude (ou pompe de circulation) | Le circulateur achemine l'eau chaude à travers la boucle de circulation d'eau chaude sanitaire. On différencie les circulateurs non régulés et les circulateurs à régime régulé. |
| 8 | Etrangleur d'équilibrage | En présence de circulateurs non régulés, l'étrangleur d'équilibrage permet d'atteindre le point de fonctionnement effectif sur la courbe caractéristique de la pompe. |
| 9 | Organe de réglage | Les organes de réglage tels que les vannes ou les clapets se composent du servomoteur et de l'actionneur. L'organe de réglage règle, sur la base du signal d'entrée, une grandeur dans l'actionneur. |
| 10 | Régulateur | Les régulateurs garantissent le respect des valeurs de consigne prédéterminées. |
| 11 | Chauffe-eau à accumulation (CEA) | Un chauffe-eau à accumulation (CEA) est un système de production d'eau chaude sous forme d'un réservoir contenant des surfaces de chauffe intégrées dans lesquelles l'eau potable est chauffée et stockée. Le réchauffement s'effectue par paliers au moyen d'un échangeur de chaleur intégré; on parle d'une charge par étapes. Les champs d'application des CEA font l'objet des chapitres suivants. |
| | Accumulateur d'eau chaude sanitaire (AEC) | Un accumulateur d'eau chaude sanitaire (AEC) est un réservoir de stockage d'eau chaude sanitaire sans surfaces de chauffe intégrées. Le réchauffement s'effectue la plupart du temps au moyen d'un échangeur de chaleur à plaques non intégré. La charge s'effectue par strates du haut vers le bas; on parle donc d'une charge par stratification. Les champs d'application des AEC font l'objet des chapitres suivants. |
| 12 | Vidange | Vidange de l'accumulateur. La vidange est composée d'une vanne de vidange et d'un point d'évacuation équipé d'un siphon, p. ex. d'un écoulement au sol. |
| 13 | Vanne de prélèvement | Les vannes de prélèvement (stérilisables à la flamme) sont indispensables, en amont et en aval de l'accumulateur, afin de pouvoir effectuer des analyses microbiologiques pendant l'exploitation. Si une circulation est prévue, chaque boucle de circulation doit être équipée de vannes de prélèvement. Les vannes de vidange ne sont souvent pas appropriées pour procéder à un échantillonnage microbiologique. |

5.2 Indications générales pour la production d'eau chaude

Le [MoPEC] définit les valeurs limites pour les besoins en énergie finale pondérée pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation et la climatisation. Seules les énergies de haute qualité doivent être prises en compte dans le justificatif. Pour les bâtiments d'habitation, le MoPEC n'autorise l'installation ou le remplacement d'un chauffage électrique direct de l'eau froide seulement si les conditions suivantes sont remplies:

a) Pendant la période de chauffage, l'eau froide est chauffée ou préchauffée par le générateur de chaleur pour le chauffage des locaux; ou

b) l'eau froide est chauffée ou préchauffée à au moins 50 % par de l'énergie renouvelable ou de la chaleur perdue qui ne peut pas être utilisée autrement.

Les points suivants sont à prendre en compte si l'eau est chauffée via le système de chauffage pendant la période de chauffage:

– **Plage de disponibilité du générateur d'eau chaude:** les opérateurs/fournisseurs d'énergie peuvent bloquer les sources de chaleur telles que l'électricité ou les réseaux thermiques, ou encore celles-ci ne fournissent pas les températures nécessaires à certaines heures de la journée.

Figure 5.6: Représentation schématique selon la norme [SIA 411] d'une alimentation d'eau chaude sanitaire intégrée dans l'installation de chauffage.

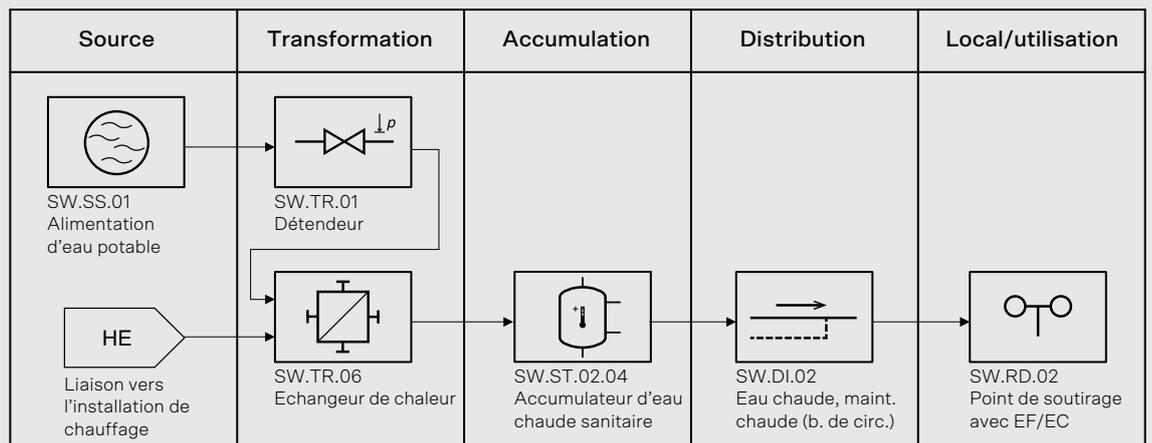
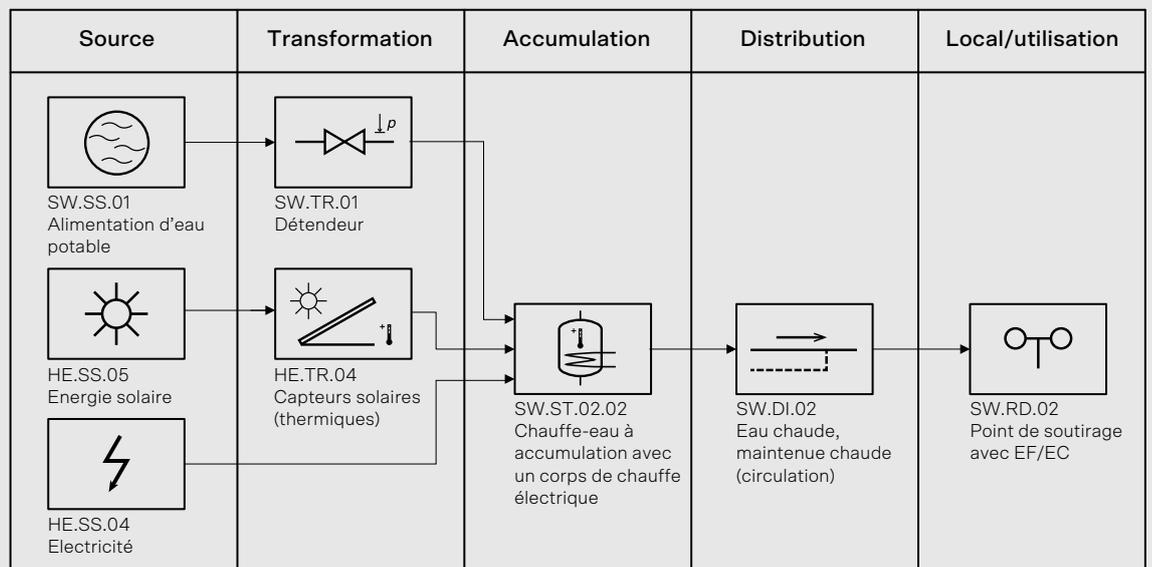


Figure 5.7: Représentation schématique selon la norme [SIA 411] d'une alimentation d'eau chaude sanitaire avec utilisation de l'énergie solaire thermique.



- **Températures nécessaires:** une température aller de < 60 °C côté chauffage est indispensable afin de pouvoir générer de l'eau chaude ≥ 55 °C. En l'absence de chauffage d'appoint, le générateur de chaleur doit pouvoir fournir cette température pendant la production de l'eau chaude sanitaire.
- **Durée de démarrage du générateur de chaleur:** un temps de démarrage doit être pris en compte si le générateur de chaleur (par exemple un système de chauffage au bois) ne fournit pas immédiatement la température aller requise après la commande de mise en service. Une sonde marche disposée dans l'accumulateur de telle sorte que le volume de couverture des pointes est augmenté, permet de pallier le temps de démarrage.
- **Durée de fonctionnement minimale du générateur de chaleur:** afin d'éviter un fonctionnement intermittent du générateur de chaleur, il faudrait respecter une durée de fonctionnement minimale après chaque mise en marche.
- **Inertie thermique du bâtiment:** sur la base de la masse thermique du bâtiment, il faut estimer si le chauffage des locaux est interrompu pendant la production d'eau chaude ou si le chauffage des locaux et la production de l'eau chaude fonctionnent simultanément.
- **Températures retour maximales:** en cas de pompes à chaleur (PAC) ou de réseaux thermiques, la température retour maximale admise doit être respectée. Pour les pompes à chaleur, il faut en outre respecter un débit massique minimal.

5.3 Intégration hydraulique d'installations de production d'eau chaude

Production d'eau chaude directe

La transformation de l'énergie s'effectue directement dans l'accumulateur ou dans le chauffe-eau instantané. La chaleur y est directement transmise à l'eau froide, sans échangeur de chaleur supplémentaire.

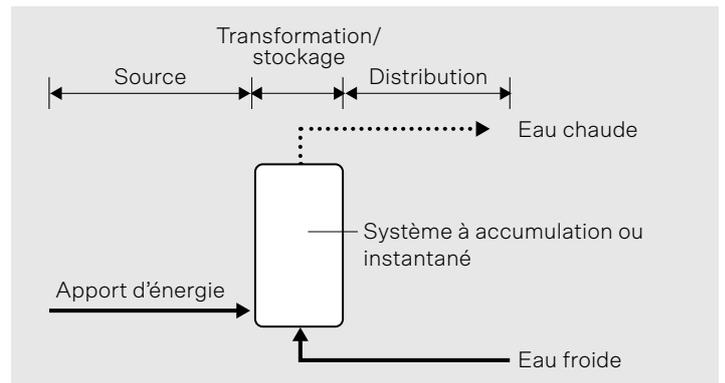


Figure 5.8: Schéma de principe d'une production d'eau chaude directe.

Domaine d'utilisation:

- Pour les alimentations individuelles et groupées
- Avec un corps de chauffe électrique (chauffage électrique direct) pour le réchauffage (chauffage d'appoint)
- Chauffe-eau PAC pur (condensation directe dans le chauffe-eau)
- Possible comme préchauffage en cas d'utilisation de rejets thermiques (p. ex. provenant de machines frigorifiques)

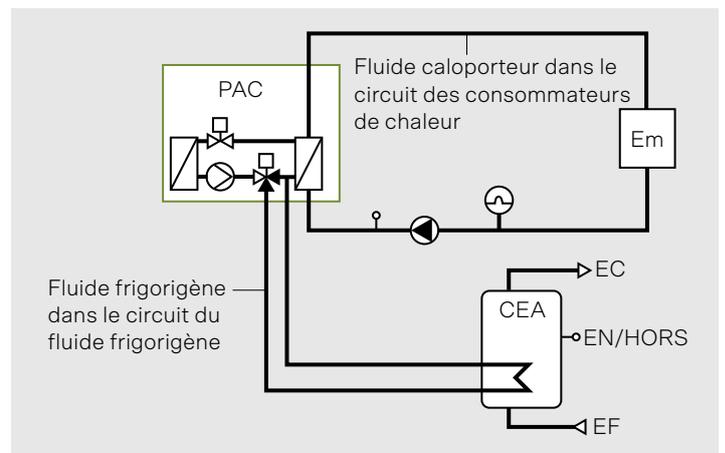


Figure 5.9: Exemple de pompe à chaleur avec condensation directe dans le CEA. Em: émission de chaleur

Production d'eau chaude indirecte

La transformation de l'énergie se fait dans un générateur de chaleur séparé qui chauffe un fluide caloporteur. Le fluide caloporteur transfère de la chaleur à l'eau froide. La production indirecte d'eau chaude peut aussi être prise en charge par un chauffe-eau à accumulation ou un chauffe-eau instantané.

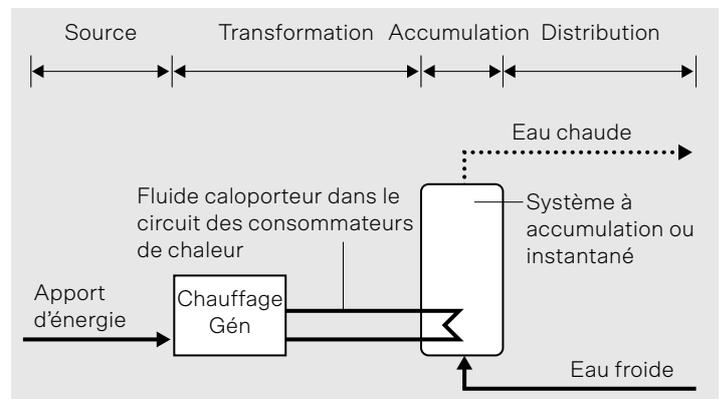


Figure 5.10: Schéma de principe d'une production d'eau chaude indirecte.

Domaine d'utilisation:

- Pour les alimentations groupées et les alimentations centrales
- En combinaison avec des installations de chauffage et de production d'eau chaude

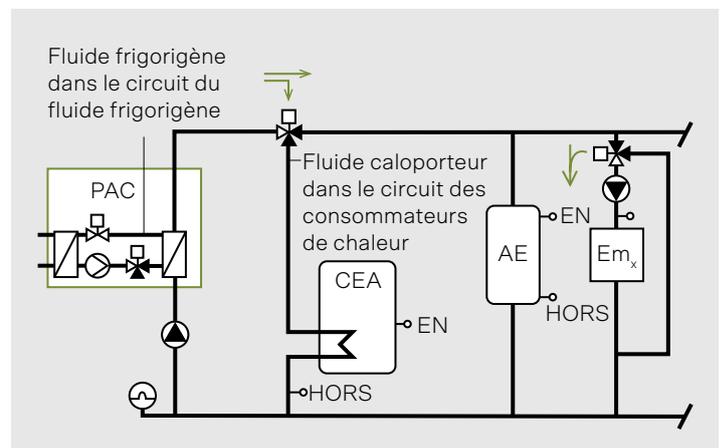


Figure 5.11: Exemple de pompe à chaleur avec chauffage indirect du CEA.

5.4 Echangeurs de chaleur et production indirecte

Echangeurs de chaleur intégrés

Les échangeurs de chaleur intégrés représentent la solution la plus fréquemment utilisée avec des chauffe-eau à accumulation standard. La charge s'effectue au moyen d'une convection induite par l'échangeur de chaleur. Les courants de convection font progressivement augmenter la température de l'eau par paliers jusqu'à ce qu'elle atteigne la température de consigne. Pendant la charge, le débit massique passant par l'échangeur de chaleur reste constant. La température retour augmente en même temps que la température de l'eau chaude. Etant donné que la production d'eau chaude s'effectue en différentes «étapes», on appelle ce mode de charge «charge par étapes».

Avantages:

- Basses températures retour au début du processus de charge.
- Meilleur coefficient de performance comparé à la charge par stratification. Le COP diminue cependant vers la fin du processus de charge.
- Type de construction avantageux.
- Peu de complexité au niveau des techniques de régulation.
- Risque d'encrassement ou d'entartrage plus faible comparé à un échangeur de chaleur à plaques non intégré.

Inconvénients:

- Coefficient de transmission thermique plus mauvais comparé à un échangeur de chaleur non intégré.
- Diminution de la puissance du transfert thermique vers la fin du processus de charge.

- Augmentation continue de la température retour pendant tout le processus de charge.
- Impossibilité d'utiliser la totalité du volume de l'accumulateur (zone d'eau mitigée et d'eau froide).
- Les courants de convection détruisent les strates de température pendant le processus de charge. Il en résulte des températures de mélange dans l'accumulateur. Les strates de température souhaitées se forment après le processus de charge.
- La température de l'accumulateur nécessaire à la désinfection thermique ne peut pas être maintenue vers la fin du processus de charge. La désinfection thermique est décrite au chapitre 5.7.



Figure 5.12: Coupe d'un chauffe-eau à accumulation avec échangeur de chaleur intégré. (Source: Bosch Thermotechnik GmbH)

Tableau 5.1: Prédimensionnement selon les fiches [Stasch] d'un échangeur de chaleur à tubes lisses intégré.

Echangeur de chaleur Type de construction	Coefficient de transmission thermique W/m ² K	Surface de l'échangeur de chaleur m ² /kW	Différence de température entre le départ et le retour K
Echangeur de chaleur à tubes lisses	400 à 600	0,30	6

Echangeurs de chaleur non intégrés

Dans le circuit secondaire (circuit de production d'eau chaude), une pompe de circulation achemine l'eau froide à travers l'échangeur de chaleur non intégré. L'eau chauffée est réintroduite sans à-coups dans la zone supérieure de l'accumulateur. Les strates de température sont conservées et se déplacent du haut vers le bas au cours de la charge. On parle d'une «charge par stratification».

Avantages:

- Coefficient de transmission thermique plus élevé comparé aux échangeurs de chaleur intégrés
- Possibilité d'utiliser la totalité de l'accumulateur (aucune zone d'eau mitigée et d'eau froide)



Figure 5.13: Chauffe-eau à accumulation avec échangeur de chaleur non intégré. (Source: Domotec AG)

Tableau 5.2: Prédimensionnement selon les fiches [Stasch] d'un échangeur de chaleur à plaques.

Echangeur de chaleur, Type de construction	Coefficient de transmission thermique W/m ² K	Surface d'échangeur de chaleur m ² /kW	Différence de température entre le départ et le retour K
Echangeur de chaleur à plaques	800 à 1200	0,15	Côté primaire: 6 Côté secondaire: 6

- Basses températures retour possibles pendant tout le processus de charge (optimal en cas de chaudière à condensation)
- Température de charge constante possible pendant tout le processus de charge

Inconvénients:

- Difficulté de combiner les échangeurs de chaleur non intégrés et l'exploitation de l'énergie solaire thermique (il arrive que les strates de température soient détruites pendant l'exploitation de l'énergie solaire thermique).
- Augmentation de la température retour vers la fin du processus de charge si la sonde arrêt est placée dans le circuit secondaire (ou encore trop bas dans l'accumulateur). Cela péjore le rendement des chaudières à condensation.
- Risque d'entartrage ou de dépôt de calcaire sur les échangeurs de chaleur à plaques.
- Coûts d'investissement plus élevés comparés à un échangeur de chaleur intégré.
- Hydraulique et technique de régulation plus complexes comparées à un échangeur de chaleur intégré.
- Déperditions thermiques supplémentaires de l'échangeur de chaleur non intégré, pour cette raison celui-ci doit être bien isolé.
- Coefficient de performance plus mauvais comparé à la charge par étapes. Le COP est plus mauvais pendant tout le processus de charge parce que la PAC doit fournir des températures d'eau chaude élevées dès le départ.

5.5 Concepts de charge

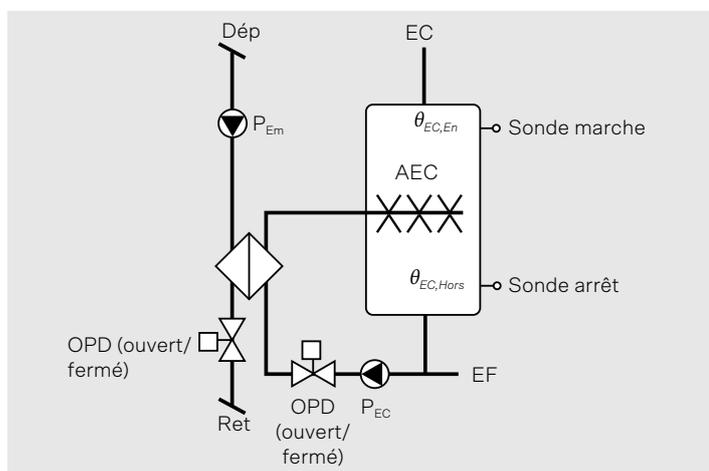
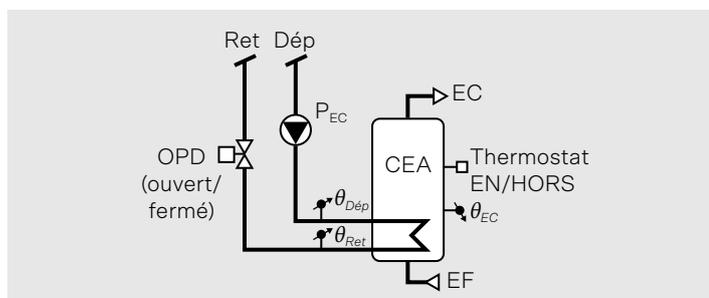
Charge par étapes sans régulation de la température aller

Les températures d'accumulateur peuvent être relevées par un thermostat ou par une sonde arrêt et une sonde marche. Si la température de l'eau dans le chauffe-eau à accumulation descend en dessous de la température de consigne, la pompe de charge (P_{EC}) est activée et charge l'accumulateur jusqu'à ce que la température de consigne soit à nouveau atteinte.

Si la charge par étapes s'effectue par un échangeur de chaleur non intégré, l'eau doit être introduite au milieu de l'accumulateur au moyen d'un déflecteur, par exemple d'une lance de stratification. La vitesse d'entrée ne doit pas dépasser 0,1 m/s. Grâce au débit à faible impulsion, la répartition est homogène à l'intérieur de l'accumulateur. Souvent, un organe de régulation à passage droit (OPD) est intégré dans le circuit de charge de l'eau chaude afin de neutraliser les circulations à contre-courant. Dans ce cas, l'organe de régulation à

Figure 5.14: Charge par étapes avec EchC intégré sans régulation de la température aller.

Figure 5.15: Charge par étapes avec EchC non intégré sans régulation de la température aller.



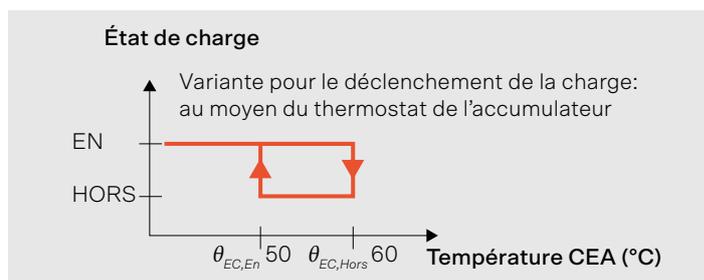
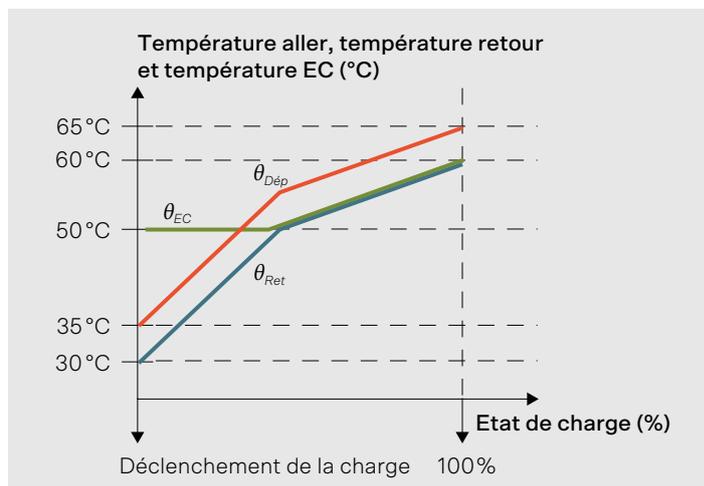
passage droit n'a aucune fonction de régulation, il s'ouvre simplement lorsque le circuit de charge est en fonction.

Propriétés:

- Hydraulique simple; faibles coûts d'investissement.
- Aucune protection contre le calcaire, étant donné qu'une température aller élevée est possible selon la génération de chaleur mise en place.
- Charge par étapes du CEA et de l'AEC (courants de convection induits dans l'accumulateur).
- Débits massiques constants via l'échangeur de chaleur intégré ou non intégré.
- Le recours à un échangeur de chaleur intégré induit un volume non chauffé dans l'accumulateur (zone d'eau froide et d'eau mitigée).
- Augmentation de la température retour vers la fin de la charge. La PAC peut alors connaître une défaillance de haute pression et la chaudière à condensation n'arrive plus à utiliser la chaleur de condensation de manière optimale.

Figure 5.16: Exemple de fonction de régulation - charge par étapes sans régulation de la température aller.

Figure 5.17: Exemple de fonction de régulation - déclenchement de la charge du CEA au moyen du thermostat de l'accumulateur.



- Le générateur de chaleur devrait atteindre une température aller supérieure d'au moins 2 à 5K par rapport à la valeur de consigne de la température de l'accumulateur.
- Diminution de la puissance du transfert thermique vers la fin de la charge.
- Possibilité d'intégrer la sonde arrêt dans le circuit de charge (coté aller ou retour) pour prévenir une défaillance de haute pression lors de la génération de chaleur par la pompe à chaleur.

Domaine d'utilisation:

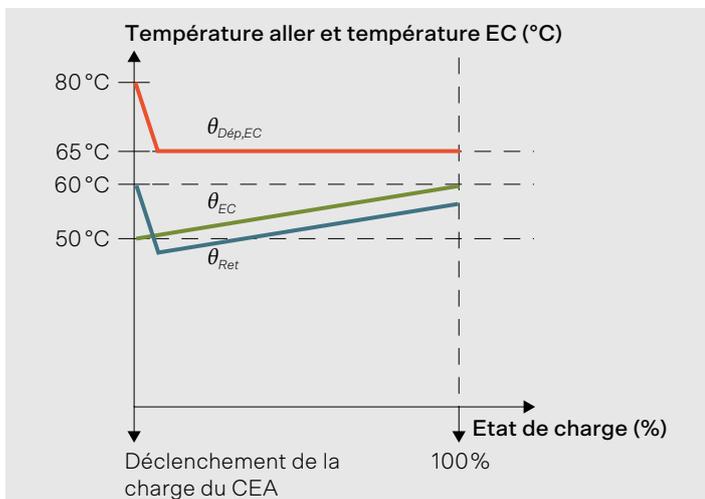
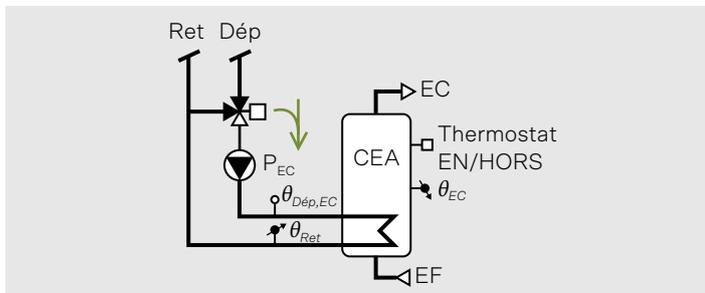
- Production d'eau chaude par des installations de pompes à chaleur.
- Installations dans lesquelles des durées de charge de l'eau chaude sanitaire relativement longues sont tolérées.
- Immeubles d'habitation de taille relativement petite (production d'eau chaude pendant les heures nocturnes).

Figure 5.18: Charge par étapes avec EchC intégré, avec régulation de la température aller.

Figure 5.19: Exemple de fonction de régulation – charge par étapes avec régulation de la température aller.

Charge par étapes avec régulation de la température aller

Mode de fonctionnement: lorsque la température de l'accumulateur (θ_{EC}) des-



– cend en dessous de la valeur de consigne, la charge du chauffe-eau à accumulation débute. L'organe de réglage à 3 voies ajoute de l'eau retour pour que la température de consigne ($\theta_{Dép,EC}$) soit atteinte. Une température de charge trop élevée est ainsi évitée, ce qui réduit le dépôt de calcaire au niveau de l'échangeur de chaleur intégré. Lorsque la température de consigne de l'accumulateur est atteinte, le circulateur (P_{EC}) fonctionnant à régime constant se désactive à nouveau.

Propriétés:

- En cas de températures aller élevées de la chaudière ($> 65^\circ\text{C}$), on atteint des températures constantes dans le circuit de production d'eau chaude ($\theta_{Dép,EC}$). Ainsi, moins de calcaire se dépose dans le CEA.
- La charge du chauffe-eau à accumulation s'effectue par étapes (courants de convection induits dans le chauffe-eau à accumulation).
- Débit massique variable via le générateur de chaleur.
- Débit massique constant via l'échangeur de chaleur intégré.
- Le recours à un échangeur de chaleur intégré induit un volume non chauffé dans l'accumulateur (zone d'eau froide et d'eau mitigée).
- Augmentation de la température retour vers la fin de la charge. La chaudière à condensation n'arrive alors plus à utiliser de manière optimale la chaleur de condensation.
- La température aller dans le circuit de production de chaleur ($\theta_{Dép,EC}$) devrait être supérieure d'au moins 2 à 5 K par rapport à la valeur de consigne de la température de l'accumulateur.
- Diminution de la puissance du transfert thermique vers la fin de la charge.

Domaine d'utilisation:

- Générateurs de chaleur qui fournissent des températures aller supérieures à 65°C .

- Installations avec des températures aller fortement variables lors de la génération de chaleur.
- Installations dans lesquelles des durées de charge de l'eau chaude sanitaire relativement longues sont tolérées.
- Immeubles d'habitation de taille relativement petite (production d'eau chaude pendant les heures nocturnes).

Figure 5.20:
Charge par stratification avec EchC non intégré; sans régulation de la température aller.
($m'_{Prim} = \text{constant}$,
 $m'_{Sec} = \text{variable}$).

Figure 5.21:
Charge par stratification avec EchC non intégré; avec régulation de la température aller.
($m'_{Prim} = \text{variable}$,
 $m'_{Sec} = \text{variable}$).

Charge par stratification sans régulation de la température aller, sans circuit mélangeur côté secondaire

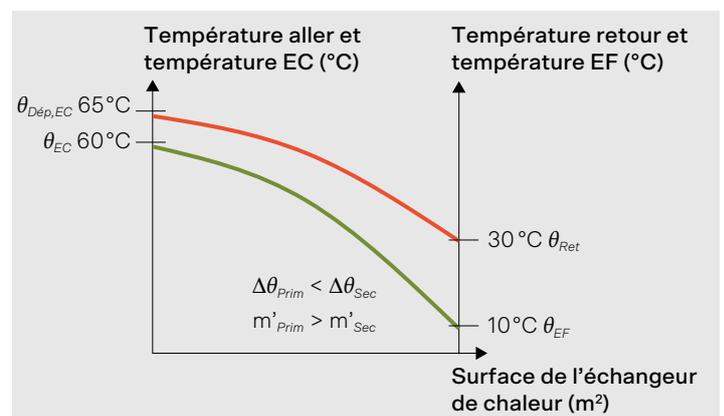
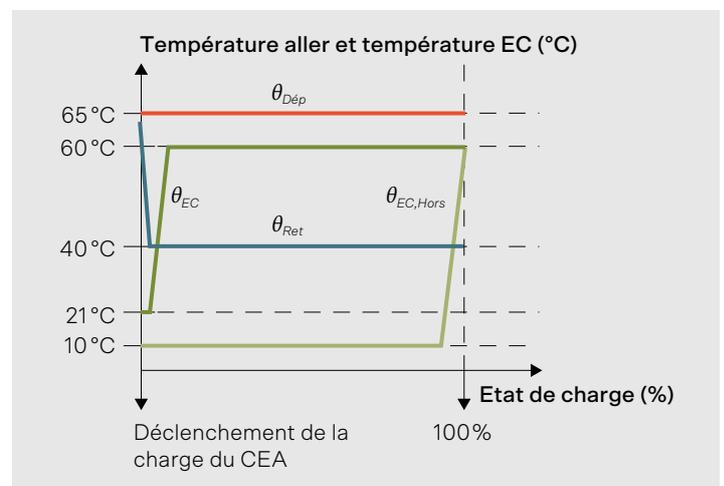
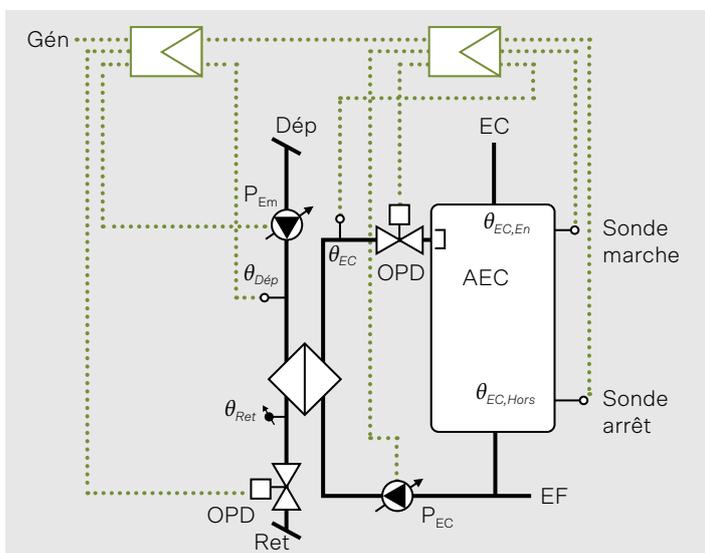
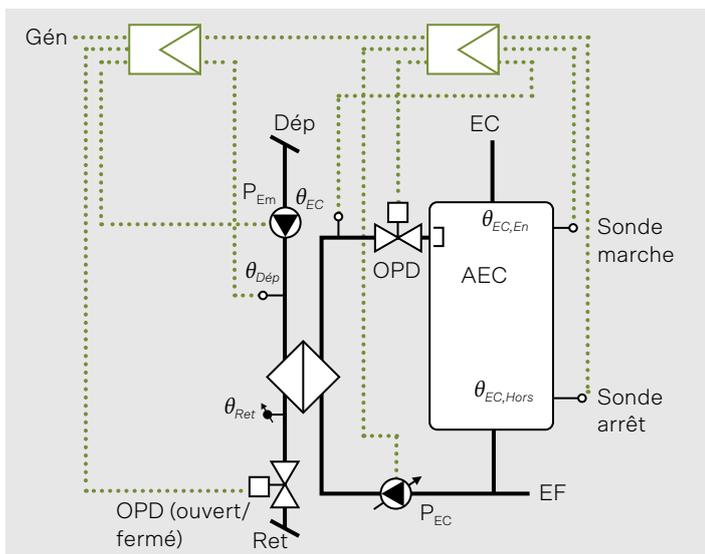
Si la température de l'accumulateur passe en dessous de sa valeur de consigne ($\theta_{EC,En}$) les pompes de circulation du circuit primaire se mettent en marche (P_{Em}). Dès que la température al-

ler requise est atteinte, le circuit secondaire (P_{EC}) se met à son tour en marche. La fourniture de puissance doit être variable côté secondaire. La charge de l'accumulateur s'effectue du haut vers le bas. Au moyen d'un diffuseur, par exemple d'un déflecteur, l'eau chauffée devrait être réintroduite sans à-coups dans l'accumulateur, en dessous du volume couvrant les charges de pointes (sonde marche). Dès que la sonde arrêt ($\theta_{EC,Hors}$) mesure la température d'eau chaude requise, la charge de l'eau chaude est arrêtée.

Etant donné que la température de l'eau froide n'est pas constante côté secondaire, une pompe à régime régulé (P_{EC}) permet de travailler avec un débit massique variable. Il est ainsi possible de maintenir l'eau chaude à une température constante. Si la pompe à régime régulé à elle seule ne permet pas d'atteindre le débit massique minimal, il faut réduire celui-ci davantage au moyen d'une vanne

Figure 5.22: Exemple de fonction de régulation - charge par stratification sans régulation de la température aller et maintien de la température côté secondaire.

Figure 5.23: Evolution possible de la température dans l'échangeur de chaleur en cas d'un débit massique variable ($m'_{Prim} > m'_{Sec}$).



à passage droit. Le générateur de chaleur modulant adapte la puissance en fonction du besoin en puissance. Ainsi, la pompe côté primaire (P_{Em}) arrive à fournir un débit massique constant (figure 5.20). Si la plage de modulation est limitée ou encore si un générateur de chaleur sans modulation est utilisé, il est possible de recourir côté primaire à une pompe à régime réglé (P_{Em}) (figure 5.21).

Propriétés:

- Aucune régulation de la température aller côté primaire.
- Charge par stratification de l'AEC.
- La température d'eau chaude requise (θ_{EC}) n'est pas atteinte au démarrage de la charge. Une réinjection de l'eau sans à-coups dans l'accumulateur est impérative.
- Génération de chaleur modulante ou débits massiques variables côté primaire indispensables.
- Si la sonde arrêt est placée en dehors de l'AEC, la totalité de l'accumulateur d'eau chaude peut être exploitée (pas de zone d'eau froide ou d'eau mitigée). Dans ce cas, la température retour augmente vers la fin du processus de charge. Dès lors, une chaudière à condensation n'arrive plus à utiliser de manière optimale la chaleur de condensation.
- Si la sonde arrêt se trouve à l'intérieur de l'AEC, la zone d'eau mitigée est préservée dans l'AEC, ce qui assure de basses températures retour pendant tout le processus de charge.
- Risque d'entartrage de l'échangeur de chaleur.

Figure 5.24: Charge par stratification avec EchC non intégré; avec régulation de la température aller et régulation de la température côté secondaire au moyen d'un débit massique constant côtés primaire et secondaire.

Figure 5.25: Exemple de fonction de régulation - charge par stratification avec régulation de la température aller et avec maintien de la température côté secondaire.

Domaine d'utilisation:

- Pour des besoins d'eau chaude moyens à élevés, et en cas de pointes importantes de la demande d'eau chaude
- Maisons plurifamiliales, hôpitaux, centres sportifs, piscines, hôtels, etc.

Charge par stratification avec régulation de la température aller et circuit mélangeur côté secondaire

Fonctionnement avec débit massique constant côtés primaire et secondaire: lorsque la sonde marche ($\theta_{EC,En}$) réagit

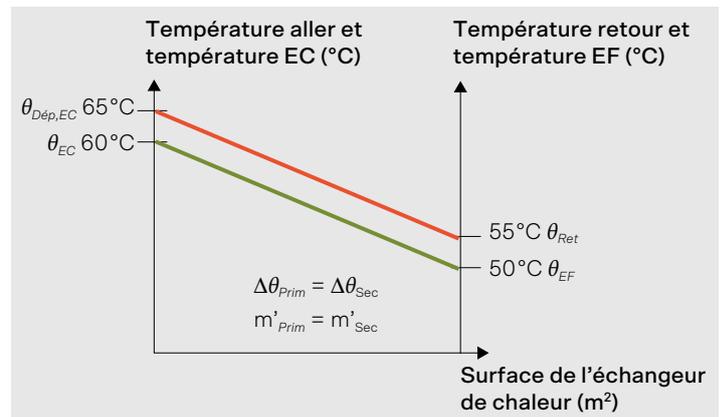
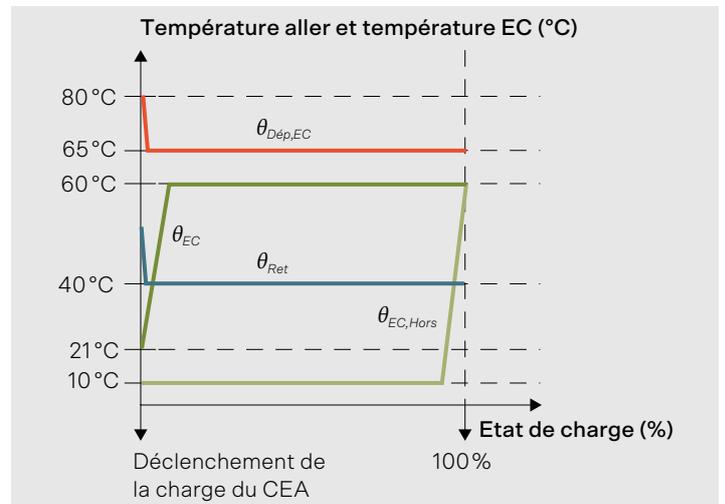
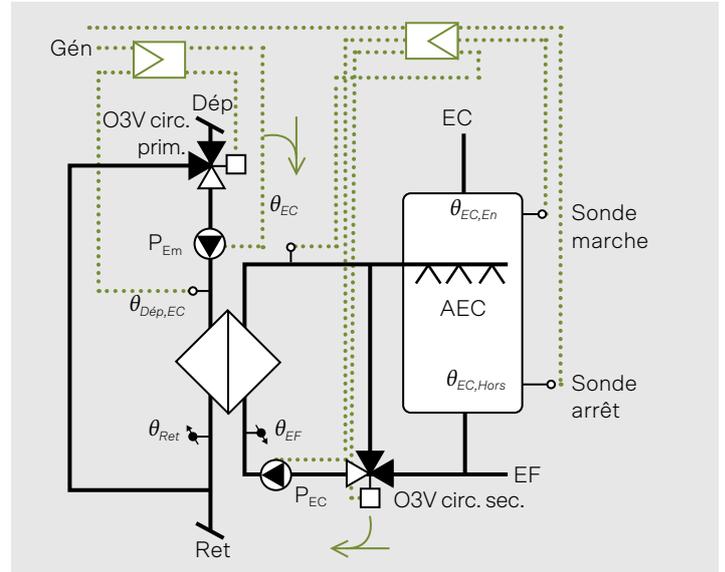


Figure 5.26: Evolution possible de la température dans l'échangeur de chaleur en cas de débits massiques constants ($m'_{Prim} = m'_{Sec}$).

parce qu'on passe en dessous de la température de consigne, la pompe de circulation (P_{Em}) dans le circuit primaire se met en marche. De l'eau retour est ajoutée au moyen de l'organe de réglage à 3 voies jusqu'à ce que la température de consigne ($\theta_{Dép,EC}$) soit atteinte. Ce procédé permet d'éviter une température aller trop élevée via l'échangeur de chaleur et réduit par là le dépôt de calcaire.

Parallèlement, le circuit secondaire est mis en marche. L'organe de réglage à 3 voies (O3V) se trouve alors en position «déviation» jusqu'à ce que la température souhaitée de l'eau chaude (θ_{EC}) soit atteinte. Ensuite, l'organe de réglage à trois voies ajoute de l'eau froide et maintient la température EC souhaitée. L'accumulateur est chargé de manière homogène du haut vers le bas jusqu'à ce que la température de consigne soit atteinte au droit de la sonde arrêt; la charge de l'eau chaude s'arrête.

Propriétés:

- Régulation de la température aller côté primaire.
- Puissance fournie (côté primaire), respectivement puissance absorbée (côté secondaire) constantes.
- Charge de l'AEC par stratification.
- Débit massique constant dans les circuits primaire et secondaire.

- Si la sonde arrêt est placée en dehors de l'AEC, la totalité de l'accumulateur d'eau chaude peut être exploitée (pas de zone d'eau froide ou d'eau mitigée).

- Risque minimal d'entartrage de l'échangeur de chaleur.
- Températures retour plus élevées comparées à la charge par stratification sans circuit mélangeur côté secondaire; par conséquent un COP plus mauvais pour les PAC ou un rendement plus mauvais pour les chaudières à condensation.
- Nécessité d'une génération de chaleur modulante ou de débits massiques variables côté primaire, si la température EF (θ_{EF}) varie beaucoup.

Domaine d'utilisation:

- Pour des besoins d'eau chaude moyens à élevés, et en cas de pointes importantes de la demande d'eau chaude
- Maisons plurifamiliales, hôpitaux, centres sportifs, piscines, hôtels, etc.
- En cas de générateurs de chaleur avec des températures aller élevées

Système de production instantanée d'eau chaude «Module d'eau chaude sanitaire»

Le chauffe-eau instantané comprend une sonde de débit volumique et une sonde de température (régulation par

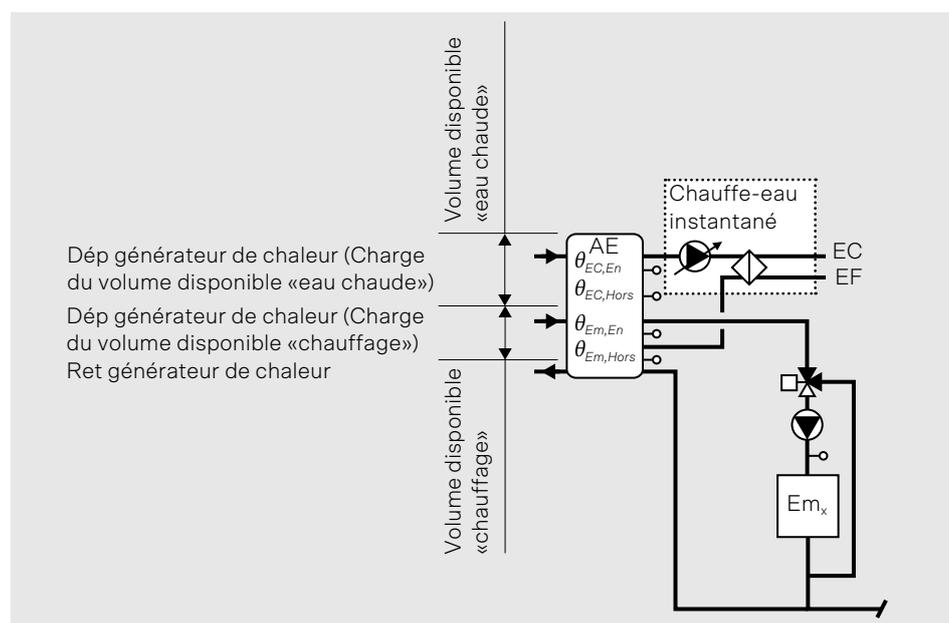


Figure 5.27: Intégration d'un module d'eau chaude sanitaire (chauffe-eau instantané).

microprocesseur). En cas de soutirage d'eau chaude, la sonde de débit volumique réagit et la pompe de charge d'eau chaude sanitaire à puissance réglée achemine de l'eau de chauffage chaude provenant de la zone supérieure de l'accumulateur d'énergie à travers l'échangeur de chaleur à plaques du chauffe-eau instantané. Le retour revient dans la zone inférieure de l'accumulateur d'énergie (AE).

La régulation par microprocesseur mesure les débits volumiques et les températures côté eau de chauffage et côté eau chaude sanitaire et calcule le débit volumique instantané requis de la pompe de charge d'eau chaude sanitaire. Celle-ci fait en sorte que le chauffage de l'eau chaude sanitaire soit homogène même lors de soutirage d'eau chaude en faibles quantités et lors de températures variables de l'accumulateur d'énergie. La pompe de charge du chauffe-eau instantané est enclenchée par modulation de largeur d'impulsion (PMW, de l'anglais Pulse Width Modulation). Ce signal permet de fournir des débits volumiques très faibles et de changer la puissance fournie en quelques millisecondes. Ainsi, les températures d'eau chaude peuvent être maintenues constantes même en cas de soutirage variable d'eau chaude.

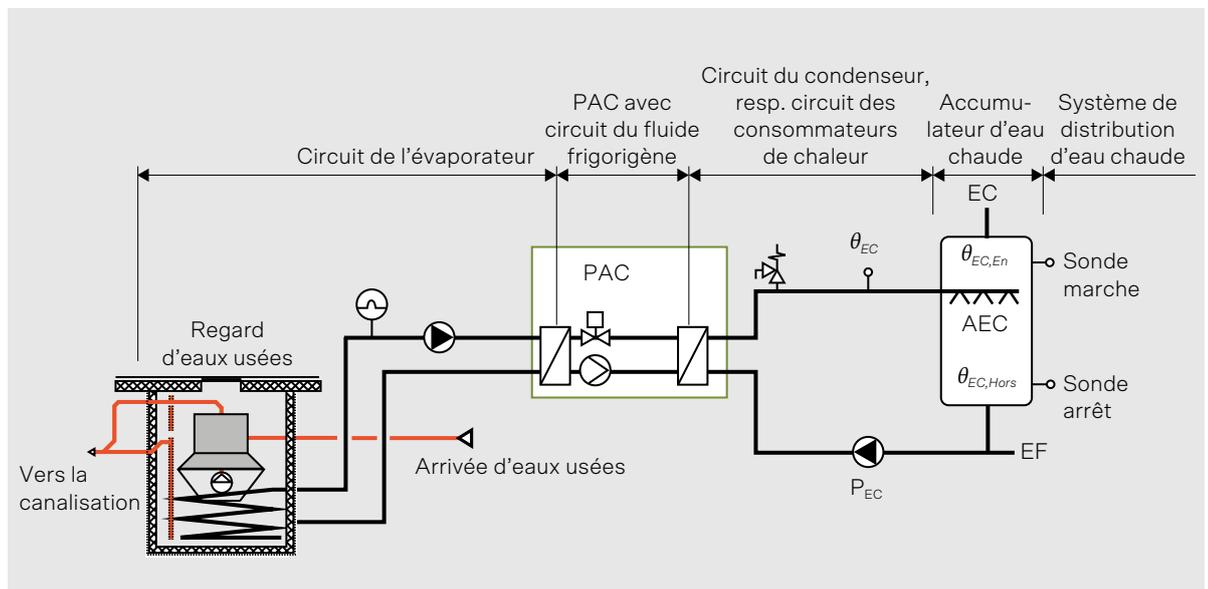
Propriétés:

- Le stockage de l'eau chaude s'effectue dans l'accumulateur d'énergie côté chauffage et non pas côté eau chaude sanitaire.
- Toute offre de chaleur telle que la chaleur rejetée, l'énergie solaire, etc. peut être utilisée dans l'accumulateur d'énergie.
- Les besoins en puissance de pointes doivent être fournis par le chauffe-eau instantané.
- Un accumulateur d'énergie est requis afin d'optimiser la puissance du générateur de chaleur.
- Les strates de température doivent être préservées par des mesures telles que la mise en place d'un diffuseur.

Domaine d'utilisation:

- Maisons unifamiliales et plurifamiliales
- Douches dans les centres sportifs et les piscines avec des débits de soutirage importants

Figure 5.28: Utilisation de la chaleur des eaux usées au moyen d'une production d'eau chaude indirecte.



5.6 Production d'eau chaude par des rejets thermiques

Utilisation de la chaleur perdue des stations d'épuration

Il y a en principe trois solutions pour récupérer de la chaleur des eaux usées:

- Récupération de la chaleur des eaux usées traitées en aval d'une station d'épuration (STEP)
- Récupération de la chaleur des eaux usées dans les canalisations publiques en amont de la STEP
- Récupération de la chaleur dans l'eau polluée dans le bâtiment ou sur site

Le paragraphe ci-après traite la solution «Récupération de la chaleur dans l'eau polluée dans le bâtiment ou sur site».

Fonctionnement: dans le regard d'eaux usées, la température de l'eau est comprise entre 16 et 23 °C. Les matières fécales et les salissures sont retenues par le regard; la pompe de vidange les refoule ensuite régulièrement dans la canalisation. Si l'évaporateur dans la PAC a besoin de chaleur, la quantité de chaleur nécessaire est soutirée aux eaux polluées collectées dans le regard d'eaux usées. Les eaux polluées refroidies s'écoulent dans la canalisation. Les eaux polluées peuvent être refroidies jusqu'à une température de 5 °C; les prescrip-

tions communales y relatives doivent être prises en compte.

Propriétés:

- Tout type d'eaux usées peut être utilisé: les eaux usées domestiques en général y c. WC, les eaux usées des piscines, des hôtels, des hôpitaux, des cuisines professionnelles, des blanchisseries, etc.
- Offre de température côté évaporateur comprise entre 16 et 23 °C.
- Chauffage d'appoint nécessaire uniquement lors de la mise en service et lors des travaux de révision.
- Les besoins en eau chaude peuvent être couverts pendant toute l'année. Il n'est en général pas pertinent d'intégrer la récupération de chaleur à partir des eaux usées dans le système de chauffage selon le document [WAS-WRG].
- Pour les objets de petite taille, l'entretien est trop important comparé au bénéfice escompté.

Domaine d'utilisation:

- Immeubles d'habitation de taille moyenne avec 10 à 30 logements (besoin en eau chaude $\Phi_{EC} \geq 70$ kW)
- Bâtiments commerciaux et industriels générant un volume important d'eaux usées et nécessitant une grande quantité d'eau chaude, par exemple des hôpitaux ou des piscines

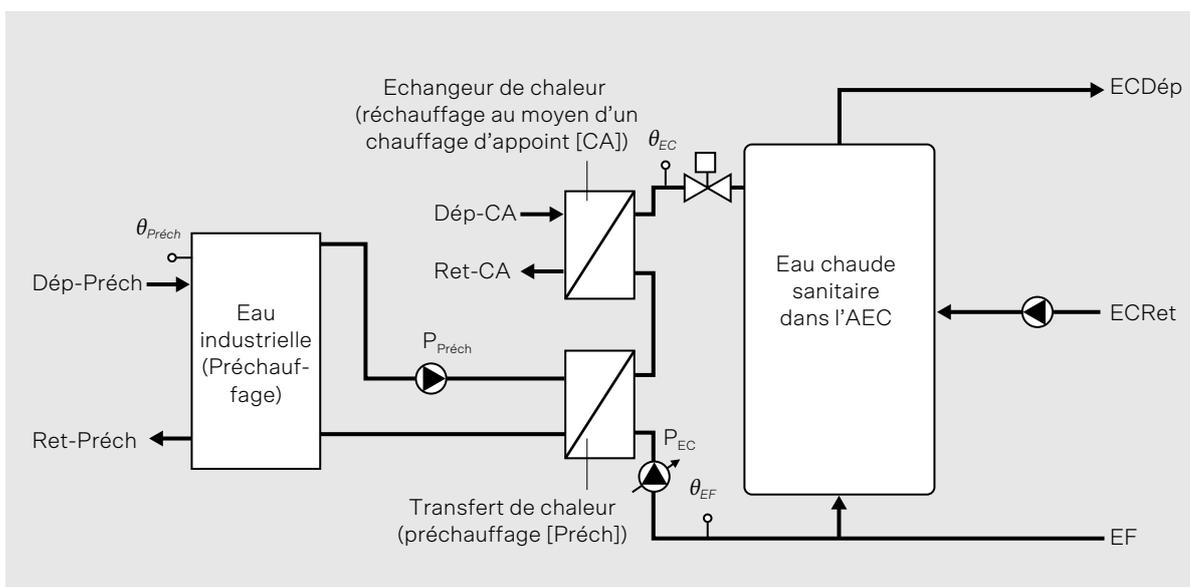


Figure 5.29: Récupération de chaleur dans le volume d'eau industrielle.

Utilisation de la chaleur perdue d'installations et de processus

Pour le préchauffage de l'eau chaude, il est possible d'utiliser la chaleur perdue provenant des machines frigorifiques professionnelles, par exemple. Etant donné que la récupération de chaleur ne permet en général que des températures maximales $< 50^\circ\text{C}$, le préchauffage devrait se limiter au volume d'eau industrielle sans inclure l'eau sanitaire pour des raisons d'hygiène

Mode charge de la chaleur perdue dans le volume d'eau industrielle: le circuit de préchauffage se met en marche dès que le circuit de charge de l'AEC est en marche et que la température dans l'accumulateur de préchauffage ($\theta_{Préch}$) est supérieure à celle du circuit de charge de l'AEC (θ_{EF}). La température d'eau chaude requise dans le circuit de charge AEC (θ_{EC}) peut être atteinte avec ou sans circuit mélangeur côté secondaire.

Mode charge de la chaleur perdue dans le volume d'eau chaude sanitaire:

la chaleur perdue d'un processus frigorifique, par exemple issue d'une machine frigorifique professionnelle, permet de préchauffer l'eau froide à 40°C environ. À cet effet, la charge de l'eau chaude recourt à la chaleur rejetée en excès provenant du condenseur de la machine frigorifique, ceci directement via le fluide frigorigène ou indirectement via un échangeur de chaleur. Si le volume d'eau préchauffé n'atteint jamais une température supérieure à 55°C , une désinfection thermique est nécessaire pour des raisons d'hygiène. Dans ce cas, l'accumulateur de préchauffage doit être chauffé une fois par mois à 60°C pendant 6 heures selon la norme [SIA 385/1].

Dans la figure 5.30, la chaleur perdue disponible du préchauffage (Préch) est acheminée de manière indirecte via un échangeur de chaleur. Si la température au droit de la sonde augmente dans le circuit du condenseur (θ_{RR}), la chaleur résiduelle est transférée par le refroidisseur de retour (RR). Pendant la désin-

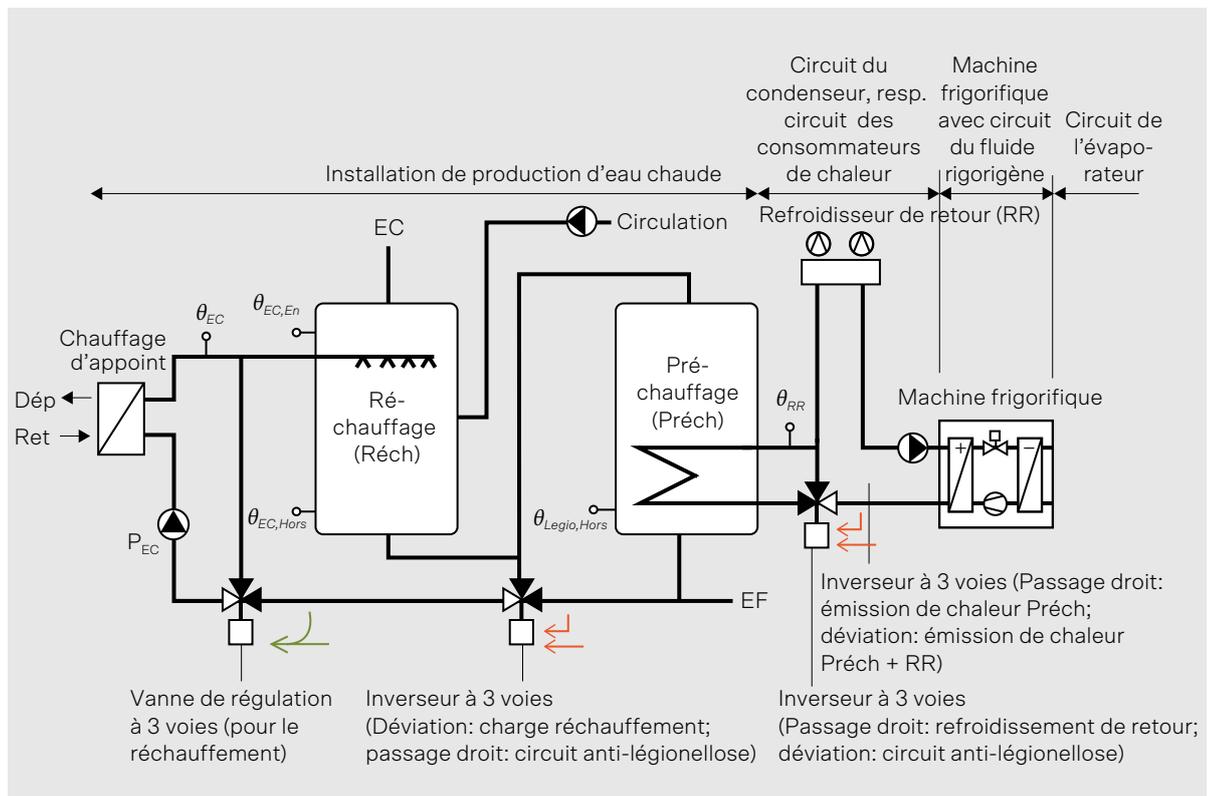


Figure 5.30: Utilisation de la chaleur rejetée (issue du froid industriel) dans le volume d'eau potable.

fection thermique (charge de prévention contre les légionelles), toute la chaleur de condensation est également transférée via le RR.

Le réchauffage (Réch) commence dès que la sonde marche ($\theta_{EC,En}$) déclenche le circuit de charge de l'eau chaude. A cet effet, la pompe de circulation (P_{EC}) soutire l'eau préchauffée de l'accumulateur de réchauffage (position «déviation») et la fait passer par le chauffage d'appoint, qui la chauffe à la température requise. Soutirer l'eau uniquement du réchauffeur permet d'empêcher des allers-retours de l'eau entre les deux accumulateurs.

La désinfection thermique se fait une fois par mois, les deux accumulateurs sont alors chauffés pendant au moins 6 heures à 60 °C. Le circuit de prévention de légionellose est arrêté dès que la température requise au droit de la sonde arrêt ($\theta_{Legio,Hors}$) est atteinte dans le Préch. Le chapitre 5.7 donne des informations supplémentaires sur les légionelles.

Propriétés:

- La chaleur perdue est utilisée pendant toute la durée du soutirage de l'eau chaude. Il est recommandé de recourir à un condenseur de secours et à un refroidisseur de retour dans le circuit du condenseur pour le cas où la chaleur perdue ne pourrait être utilisée.
- Le réchauffage s'effectue par charge stratifiée et avec une régulation de température côté secondaire. Si aucune régulation de température côté secondaire n'est prévue, la fourniture de puissance doit être régulée côté primaire.
- Circuit de prévention de légionellose afin de réchauffer périodiquement l'accumulateur de préchauffage. Le réchauffage s'effectue par charge stratifiée.
- «Barrière de légionelles» à l'intérieur du volume de couverture des pointes.

Domaine d'utilisation:

- Bâtiments commerciaux et industriels (industrie gastronomique et alimentaire)

5.7 Légionelles

Les légionelles sont des bactéries vivant dans l'eau susceptibles de provoquer la maladie de la légionellose chez l'homme. La sévérité de la pathologie peut varier, allant de légers symptômes grippaux jusqu'à des pneumonies graves. L'infection se fait par les voies respiratoires, p. ex. par l'inhalation d'aérosols contenant des légionelles. Il est en revanche sans risque de boire de l'eau contenant des légionelles, car les acides gastriques tuent les bactéries. Les [recommandations OFSP/OSAV] fournissent des informations au sujet des légionelles et de la légionellose, et proposent également des mesures préventives.

On trouve les légionelles aussi dans les cours d'eau naturels et les milieux humides, mais généralement en petites quantités. Dans les installations conductrices d'eau, les conditions sont en revanche souvent favorables à leur prolifération, car elles se multiplient principalement dans les biofilms à des températures comprises entre 25 et 45 °C. Pour cette raison, la norme [SIA 385/1] exige une température minimale de 50 °C à tous les points de soutirage, après un délai correspondant au retard au soutirage multiplié par 7. Il faut assurer une température minimale de 55 °C dans les conduites maintenues en température (boucles de circulation et conduites avec rubans chauffants).

La norme [SIA 385/1] ne définit aucune température de l'accumulateur en cas d'un système de distribution maintenu en température. Dans ces conditions, celle-ci doit être déterminée en fonction des déperditions thermiques des conduites maintenues en température. En l'absence de conduites maintenues en température, la norme SIA exige une température de 55 °C à la sortie de l'accumulateur d'eau chaude.

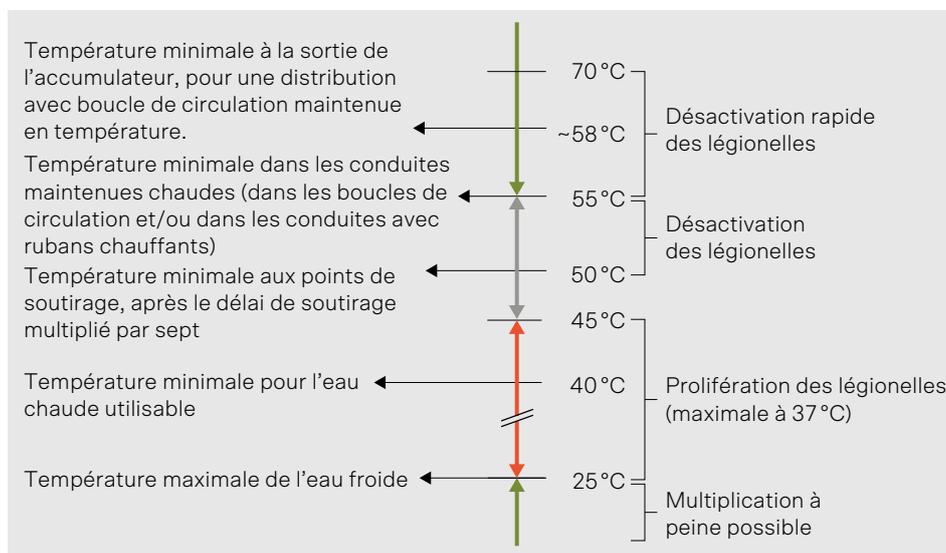
Toutes les installations conductrices d'eau qui peuvent générer des aérosols entrent en ligne de compte comme sources d'infection potentielles. Voici les sources d'infection les plus importantes dans le domaine de l'eau potable:

- Par principe, tous les points de soutirage (à cause du risque d'inhalation), notamment ceux avec formation d'aérosols tels que les douches
- Tours de refroidissement
- Jacuzzis
- Appareils d'humidification directe de l'air ambiant

Principes de prévention contre la prolifération des légionelles

Le tracé des conduites doit être planifié de sorte que l'eau ne stagne pas dans des tronçons ayant des températures critiques. Après un soutirage d'eau, les conduites de distribution non maintenues en température devraient se refroidir aussi rapidement que possible à une

Figure 5.31: Impact de la température d'eau chaude sur les légionelles et recommandations consécutives relatives aux températures de dimensionnement selon la norme [SIA 385/1].



température inférieure à 25°C. Un siphon thermique empêche que les conduites non maintenues en température se réchauffent en raison d'une éventuelle circulation à contre-courant (voir figure 5.32 et figure 5.33). Pour assurer la température minimale de 55°C dans les conduites maintenues

en température, les conduites doivent être isolées sur toute leur longueur. En cas d'une circulation, l'ajustage hydraulique entre les boucles de circulation est indispensable (voir figure 5.34). En outre, il faut pouvoir contrôler les températures des conduites maintenues en température (boucles de circulation et

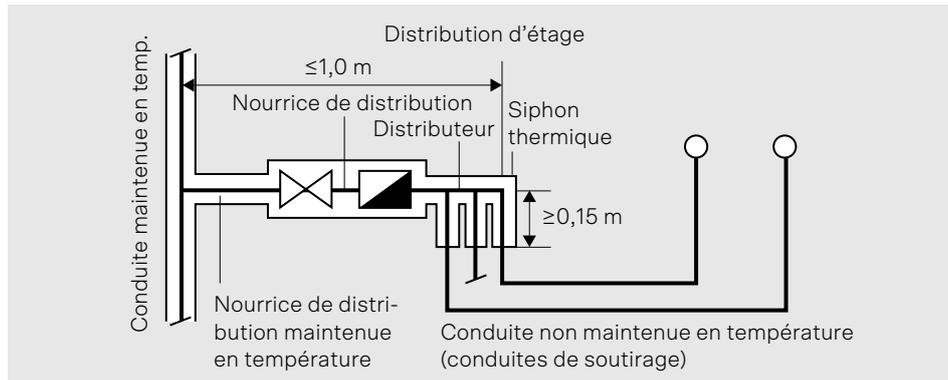


Figure 5.32: Principe d'un distributeur maintenu en température.

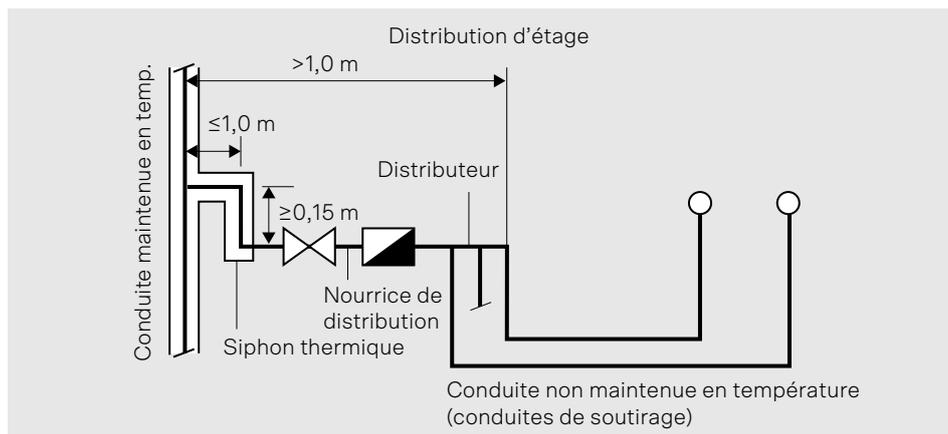


Figure 5.33: Principe d'un distributeur non maintenu en température.

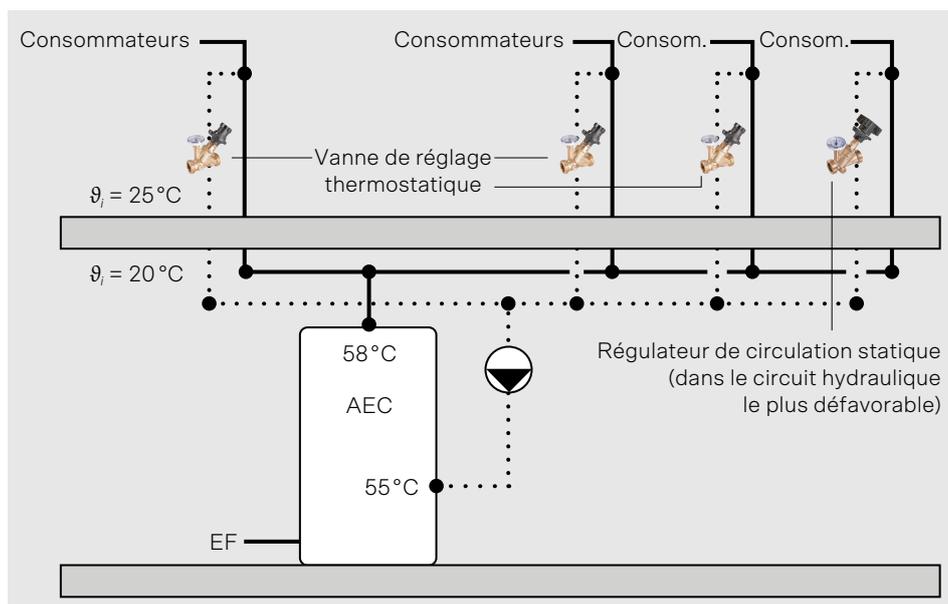


Figure 5.34: L'ajustage hydraulique de toutes les boucles de circulation doit être possible.

rubans chauffants) et des composants (voir figure 5.35).

Les températures d'eau froide ne doivent pas dépasser 25 °C. Pour cette raison, les conduites d'eau froide doivent être isolées sur toute leur longueur contre le réchauffement. En outre, leur tracé ne doit pas être parallèle à celui des conduites d'eau chaude ou des conduites de chauffage. Les installations d'eau froide doivent par principe ne pas être disposées dans des environnements chauds.

Matériaux recommandés

Dans les installations d'eau potable, seuls des matériaux sans risques micro-

biologiques et toxicologiques devraient être utilisés. Il est recommandé de recourir à des produits avec marque de conformité des SSIGE «Eau» ou «Sécurité hygiénique» (voir figure 5.36).

Eviter l'eau stagnante

L'eau doit circuler! Il faut éviter de longues durées de stagnation non seulement durant l'exploitation, mais dès le premier remplissage de l'installation. L'eau ne devrait pas stagner plus de 72 heures dans les installations d'eau potable. Avant une nouvelle utilisation, il faut rincer les points de soutirage tels que les douches ou autres robinetteries générant des aérosols si leur dernière

Figure 5.35: Les températures dans toutes les boucles de circulation et dans toutes les branches (rubans chauffants) doivent être contrôlables.

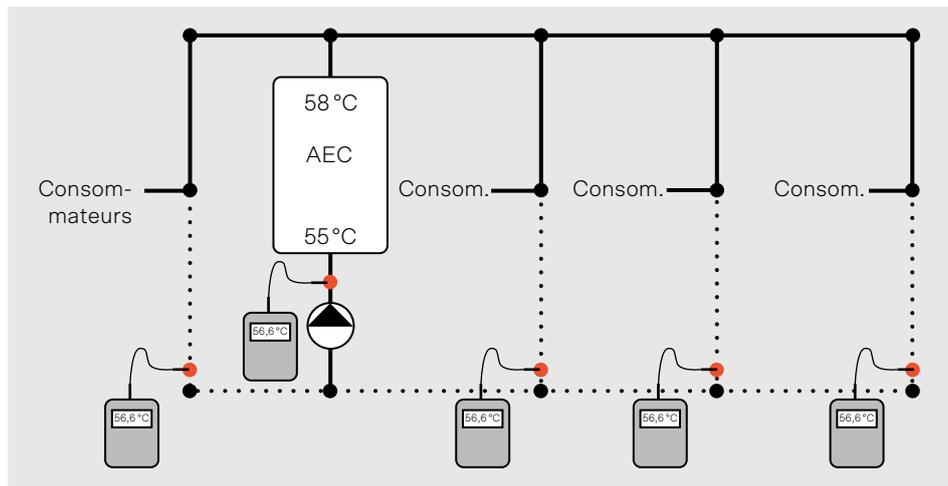
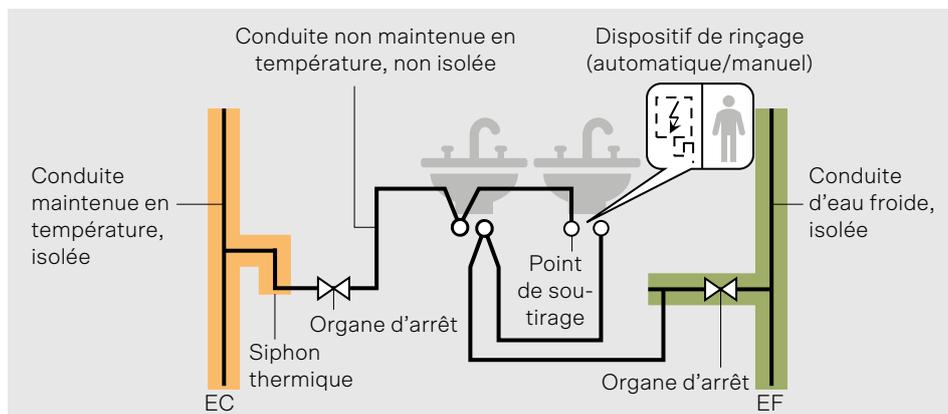


Figure 5.36: Marque de conformité «Eau» (à gauche) et «Sécurité hygiénique» des [SSIGE] (à droite).



Figure 5.37: Distribution d'étage avec dispositif de rinçage – automatique ou manuel – p. ex. dans les hôpitaux, les établissements médico-sociaux ou les hôtels.



utilisation remonte à plus d'une semaine. C'est le cas notamment pour les douches dans les chambres d'hôtel, les appartements secondaires et de vacances, éventuellement aussi dans les écoles lors d'une utilisation réduite pendant les vacances.

Il faudrait régulièrement rincer les points de soutirage d'eau froide et d'eau chaude qui ne sont d'habitude pas utilisés pendant plus de trois jours. Le rinçage peut se faire de manière automatique ou manuelle en suivant un plan de rinçage (voir figure 5.37).

Si un point de soutirage n'est que rarement ou plus du tout utilisé, la déconstruction est une option judicieuse. Il faudrait alors démonter les conduites jusqu'à la bifurcation depuis la conduite de distribution. La longueur maximale admise des tracés rarement utilisés est égale au diamètre nominal multiplié par 4 (voir figure 5.38).

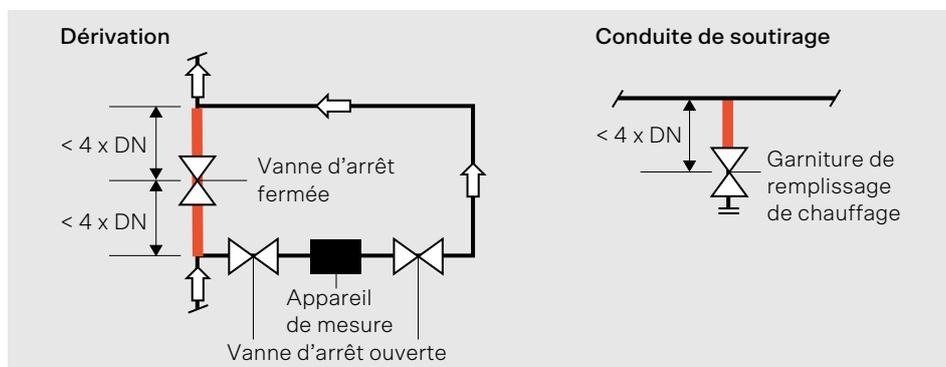


Figure 5.38: Longueur des boucles rarement utilisées ($l \leq 4 \times DN$).

5.8 Sources

- [Recommandations OFSP/OSAV] Recommandations OFSP/OSAV, Légionelles et légionellose. Office fédéral de la santé publique (OFSP) et Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires (OSAV). Berne, 2018. www.bag.admin.ch, www.blv.admin.ch
- [MoPEC] Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK). Modèle de prescriptions énergétiques des cantons – MoPEC. Edition 2014 (mise à jour en 2018 – en raison de la modification des normes), Berne. www.endk.ch
- [SIA 385/1] Norme SIA 385/1. Installations d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments – Bases générales et exigences. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2020.
- [SIA 411] Norme SIA 411. Représentation modulaire des installations. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2016.
- [Stasch] Afjei Thomas.; et al. Schémas standard pour petites installations de pompes à chaleur – Partie 1: Fiches techniques STASCH. Office fédéral de l'énergie. Berne, 2002.
- [SSIGE] Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE). www.svgw.ch, consulté en mai 2022.
- [WAS-WRG] Van Velsen Stefan, Benz Michael. Wärmerückgewinnung aus Schmutzwasser – Vorabklärung bezüglich des Potentials der Wärmerückgewinnung aus Schmutzwasser im Gebäude respektive auf dem Grundstück. Bundesamt für Energie. Bern, 2013.

Eclairage

Björn Schrader 6.1 Efficacité énergétique de l'éclairage

La lumière du jour représente l'éclairage de choix pour les bâtiments, car elle est neutre en CO₂ et gratuite. De plus, elle se caractérise par une qualité lumineuse exceptionnelle, raison pour laquelle les utilisatrices et utilisateurs la préfèrent à l'éclairage artificiel. Par conséquent, il faudrait réduire au strict minimum les heures nécessitant de la lumière artificielle dans les bâtiments.

En Suisse, la performance énergétique de l'éclairage dans un bâtiment est déterminée à l'aide de la norme [SIA 387/4]. Son application est aussi exigée par Minergie et d'autres labels pour bâtiments.

Planification concernant la lumière du jour dans les phases initiales de projet

Pour assurer un apport optimal de lumière du jour, il est primordial de disposer et de dimensionner les ouvertures de l'enveloppe du bâtiment en pleine connaissance de cause. La planification des ouvertures comprend des paramètres déterminants supplémentaires tels que la protection contre la surchauffe estivale ou l'exploitation des apports solaires. Ces ouvertures permettent par ailleurs la vue sur l'extérieur et les utilisatrices ont ainsi la possibilité de s'orienter par rapport à l'heure du jour, l'emplacement et la position de la pièce ou encore la météo.

Tout projet de bâtiment doit impérativement prendre en compte le climat, le site avec sa topographie et les constructions existantes. Seule cette démarche permet d'agir assez tôt sur des décisions importantes telles que l'orientation et la disposition des volumes, qui influencent fortement l'apport de lumière du jour tout comme la consommation globale d'énergie. Il est difficile de revenir sur ces décisions dans les phases de projet ulté-

rieures; compenser une décision erronée plus tard implique de devoir recourir à d'importants moyens techniques de bâtiment.

Objectifs contradictoires

L'utilisation de la lumière du jour s'oppose à d'autres exigences: les apports solaires optimisés sont certes recherchés pendant l'hiver, ce qui est bien compatible avec l'utilisation de la lumière du jour. En été, il faudrait en revanche protéger le bâtiment contre la surchauffe provoquée par le rayonnement solaire. Etant donné les exigences de plus en plus sévères dans ce domaine, l'utilisation optimale de la lumière du jour pendant toute l'année est devenue un défi de taille.

Figure 6.1: Les ouvertures zénithales assurent un apport suffisant de lumière du jour dans la salle de classe.
(Photo: Velux)



6.2 Lumière du jour

L'utilisation optimale de la lumière du jour contribue à réduire drastiquement la consommation d'électricité destinée à l'éclairage des bâtiments. La [loi sur le travail] suisse insiste sur l'importance particulière de la lumière du jour pour la santé.

Paramètres déterminants l'apport de lumière du jour

Il est impossible d'atteindre un bon apport de lumière du jour par une simple pondération des surfaces, par exemple surface vitrée par rapport à surface au sol; la figure 6.2 le démontre. Cette manière de faire négligerait la plupart des paramètres lumineux déterminants.

Pour dimensionner les ouvertures d'un bâtiment, il faut donc recourir à la norme suisse [SN EN 17037] «Lumière naturelle dans les bâtiments». Cette norme porte sur l'évaluation de la lumière du jour dans les locaux. Elle prend en compte les quatre dimensions d'évaluation suivantes:

- Apport de lumière du jour
- Vue sur l'extérieur
- Exposition au rayonnement solaire direct
- Protection contre l'éblouissement

Méthodes estimatives simples dans les phases initiales de planification

Dans les phases initiales de planification, il suffit de recourir à des méthodes estimatives simples pour assurer de bonnes conditions relatives à l'apport de lumière du jour. Les recommandations ci-dessous se réfèrent aux règles estimatives figurant au tableau 6.1.

- Depuis la partie supérieure de la fenêtre, la lumière pénètre loin dans le local. La hauteur du linteau devrait par conséquent être aussi faible que possible.
- La partie inférieure de la fenêtre ne contribue que peu à l'éclairage d'un local. Un contre-cœur jusqu'à la hauteur de travail est très utile.
- Les balcons et les porte-à-faux fixes péjorent l'apport de lumière du jour pen-

dant toute l'année. De plus, les porte-à-faux horizontaux ne sont que rarement utilisés en Suisse pour diminuer la surchauffe estivale. Pour cette raison, il est indispensable de vérifier soigneusement leur pertinence.

- Le choix du vitrage doit se faire en tenant compte du facteur de transmission solaire et lumineuse τ ainsi que des valeurs g et U .

- Par comparaison à l'apport de lumière du jour réalisé par des fenêtres de même taille, des ouvertures zénithales amènent davantage de lumière dans un espace, car la part de lumière pénétrant directement depuis le ciel dans le local est plus élevée.

Protection contre la surchauffe estivale et contre l'éblouissement

La protection contre la surchauffe estivale doit faire partie intégrante de toute réflexion sur la lumière du jour. La protection contre l'éblouissement est avant tout importante pour les espaces de travail, néanmoins l'affectation et les besoins des utilisateurs devraient toujours être pris en considération. Elle n'est pas nécessaire pour la plupart des bâtiments d'habitation.

La protection contre l'éblouissement est en principe posée côté intérieur de la fenêtre afin de pouvoir tirer profit des apports solaires passifs en hiver. Et même en position fermée, un contact visuel avec l'extérieur devrait rester possible, ce qui peut être réalisé par exemple au moyen de perforations.

Plus tard dans la planification, l'emploi de logiciels permet de déterminer le facteur de la lumière du jour pour les différentes zones d'utilisation du bâtiment. Ce facteur est défini comme le ratio de l'éclairement intérieur sur l'éclairement extérieur à un point donné du local. La norme SN EN 17037 définit des valeurs cibles du facteur de la lumière du jour. Plus tard encore, la consommation globale d'énergie peut être estimée au moyen de simulations intégrales basées sur les données climatiques de l'emplacement du bâtiment. Elles permettent

ainsi d'évaluer différentes stratégies possibles en matière de protection contre la surchauffe estivale.

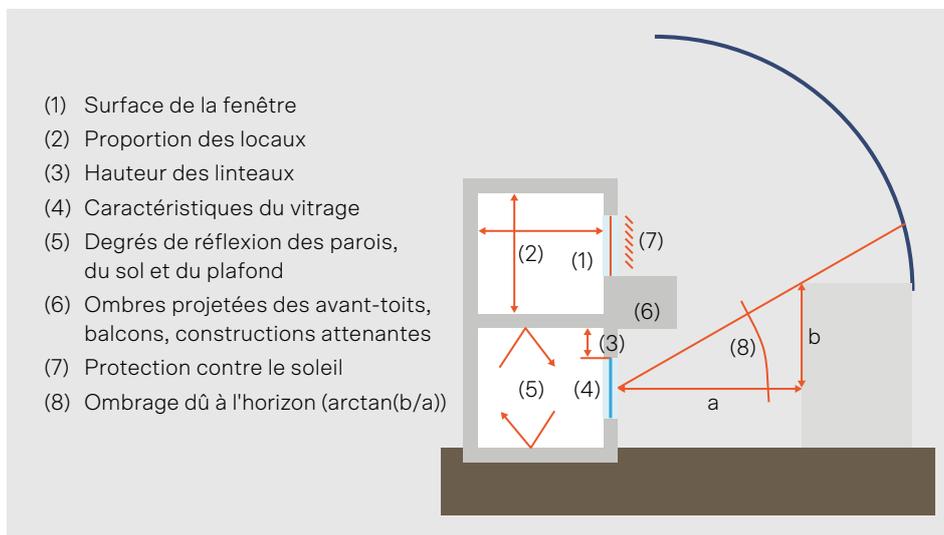
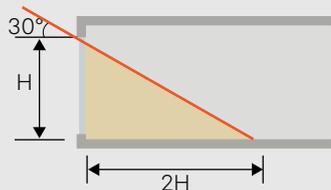


Figure 6.2: Les paramètres les plus importants déterminant l'apport de lumière du jour dans les espaces intérieurs. (Source: [Minergie Lumière naturelle])

Méthodes pour estimer l'apport de lumière du jour

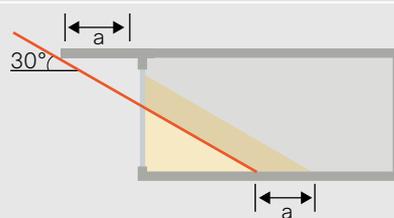
Règle 2H – apport de lumière du jour dans la profondeur (en coupe)

La profondeur jusqu'à laquelle la lumière du jour arrive à pénétrer est égale à la hauteur du bord supérieur de la fenêtre multiplié par 2. Une autre méthode consiste à reporter un trait à un angle de 30° , partant du bord supérieur de la fenêtre.



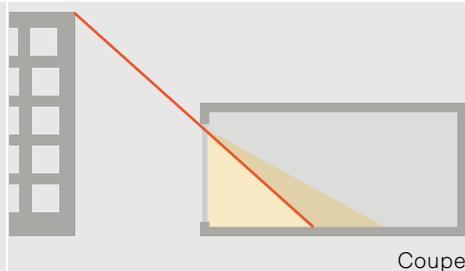
Ombres projetées des porte-à-faux et balcons

Les porte-à-faux diminuent la zone où la lumière du jour est exploitable. Cette réduction équivaut à la longueur du porte-à-faux.



Ombage dû aux constructions attenantes

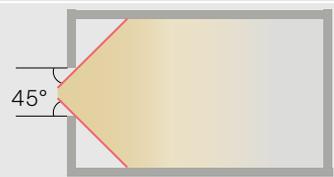
Les ombres projetées par les objets situés en face diminuent l'apport de lumière du jour, notamment dans la profondeur des locaux, car ils interrompent le tracé direct entre le ciel et la surface utile du local.



Coupe

Règle des 45° – apport latéral de lumière du jour (en plan)

Une fenêtre verticale permet un apport suffisant de lumière du jour dans la zone délimitée par deux traits partant des bords de la fenêtre à un angle de 45° .



Plan

Tableau 6.1: Dès les phases initiales de projet, des méthodes simples permettent d'estimer l'apport de lumière du jour dans un local. (Source: [Minergie Lumière naturelle])

6.3 Lumière artificielle

Dans la planification de l'éclairage artificiel, l'efficacité énergétique d'une installation d'éclairage ne représente qu'un seul aspect parmi beaucoup d'autres. De nos jours, la planification globale de l'éclairage artificiel doit remplir des exigences supplémentaires.

Exigences pour la planification de l'éclairage artificiel

En premier lieu, la planification doit tenir compte des trois effets suivants:

- Effet visuel de la lumière
- Effet émotionnel de la lumière
- Effet biologique de la lumière

La course du soleil et la lumière du jour marquent le rythme de l'Homme. L'émergence de la lumière électrique au 19^e siècle a instauré une nouvelle époque. Dans le sillage de l'industrialisation, l'utilisation de l'éclairage artificiel a été analysée de plus près afin de l'adapter aux exigences visuelles nécessaires pour accomplir différents processus de travail et accroître ainsi la productivité. C'est dans ce contexte qu'ont été mises en place les premières réglementations au sujet de l'éclairage. Elles ont par la suite été complétées et développées pour devenir les normes actuellement en vigueur.

Figure 6.3: Projet d'éclairage combinant luminaires suspendus au-dessus des postes de travail et projecteurs disposés avec précision pour l'éclairage des murs. (Photo: Zumtobel)



Planification quantitative et qualitative de l'éclairage

Le terme « planification quantitative de l'éclairage » désigne une planification basée exclusivement sur la justification des valeurs définies par les normes. En plus de l'éclairage, il s'agit alors aussi de justifier l'uniformité, l'éblouissement, la distribution des luminances, etc. [SN EN 12464-1].

L'éclairage amplifie et influence l'effet spatial tout comme l'ambiance d'une pièce. Le terme « planification qualitative de l'éclairage » désigne une planification prenant en compte les effets de la lumière touchant à la psychologie de la perception et au ressenti de l'espace. Il est donc indispensable d'adapter l'éclairage à l'espace et aux matériaux pour provoquer un impact émotionnel positif.

Planification intégrale de l'éclairage

Le terme « planification intégrale » désigne une planification qui intègre en plus l'effet biologique de la lumière, cette troisième fonction qui suscite de plus en plus d'intérêt depuis quelques années. Il s'agit de comprendre comment la lumière influence des processus essentiels dans le corps humain. Le récepteur synchronisant le rythme sommeil-éveil n'a été détecté qu'en 2001. Depuis, des efforts de recherche importants ont été déployés pour analyser les synergies et les mécanismes d'action de la lumière sur l'être humain. En 2019, la Commission internationale de l'éclairage CIE a publié la [norme S 026], qui définit la sensibilité spectrale des différents récepteurs. Il n'existe en revanche encore que peu de recommandations et de consignes destinées aux planificateurs qui permettraient une mise en pratique simple de ces découvertes récentes.

Planification de l'éclairage artificiel dans les phases initiales de projet

Certes, les installations d'éclairage ne sont posées que dans la phase finale d'une construction. Néanmoins, comme déjà mentionné, sa planification inté-

grale ne se limite de nos jours pas au simple éclairage de locaux. Une installation d'éclairage n'est pas uniquement une installation technique du bâtiment, mais un élément servant à aménager l'espace, élaboré par une équipe pluridisciplinaire.

Pour cette raison, il est judicieux de décider suffisamment tôt de l'importance à accorder au projet d'éclairage (lumière du jour et lumière artificielle) et de voir si le projet se limite aux aspects purement quantitatifs. Une approche intégrative prenant en compte les effets émotionnels et biologiques requiert des compétences allant au-delà des compétences habituelles d'un planificateur électricien.

Efficacité énergétique et domotique

L'éclairage artificiel détermine grandement la consommation d'électricité dans un bâtiment [OFEN]. En plus des luminaires efficaces, la commande de l'éclairage selon la lumière du jour et selon la présence constitue l'exigence de base pour atteindre les objectifs énergétiques requis par la norme SIA 387/4. Un bon apport de lumière du jour en fait également partie.

Dans les bâtiments utilitaires, la commande intelligente de l'éclairage et de l'ombrage fait partie intégrante des standards actuels. Jusqu'à présent, elle ne s'est pas imposée dans le logement bien qu'elle soit absolument recommandée dans ce domaine-là aussi, pour accroître le confort et l'efficacité énergétique. Le chapitre 8 traitera de la domotique plus en détail.

Normes

Les prescriptions régissant l'éclairage artificiel sont ancrées dans le commentaire de l'ordonnance 3 relative à la loi sur le travail et consignées dans la norme SN EN 12464-1. En plus des exigences concernant l'éclairage, il s'agit de remplir celles concernant le rendu de couleur, l'uniformité, l'éblouissement, etc. Il est recommandé, dans la phase d'avant-projet, de consulter le cahier technique [SIA 2024] «Données d'utili-

sation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment»; les prescriptions relatives à l'éclairage lumineux y figurent par ailleurs également.

L'efficacité énergétique d'un projet d'éclairage artificiel est vérifiée au moyen de la puissance électrique spécifique p_l , en W/m^2 . La norme SIA 387/4 est appliquée dans les phases consécutives. Elle comprend aussi les exigences de la norme SN EN 12464-1.

L'optimisation de la demande en électricité représente l'objectif principal de la norme SIA 387/4. Le modèle de calcul intègre non seulement l'éclairage, mais encore la grandeur des fenêtres, la luminosité des locaux, la protection solaire, etc. Pour cette raison, l'optimisation de la demande en électricité s'effectue en commun, au sein de l'équipe des planificateurs, non pas par domaine de planification. L'efficacité énergétique d'un projet d'éclairage (lumière du jour, lumière artificielle, commande) est vérifiée au moyen de la demande annuelle en électricité spécifique en kWh/m^2 a.

Méthodes estimatives

Dans le domaine de l'éclairage artificiel, il existe également des méthodes estimatives à utiliser durant les phases initiales de planification. Par la suite, des simulations et des visualisations permettent de préciser la planification. Les méthodes suivantes constituent un premier contrôle de plausibilité; les grandeurs lumineuses utilisées sont commentées au point 6.4.

$$E_n = \frac{\Phi_{ges} \cdot \eta_R \cdot \eta_L \cdot WF}{A}$$

E_n = Eclairage lumineux nominal

A = Surface éclairée

Φ_{ges} = Flux lumineux de tous les luminaires

η_R = Utilance

η_L = Efficacité lumineuse des luminaires

WF = Indice de maintenance

Calcul fortement simplifié:

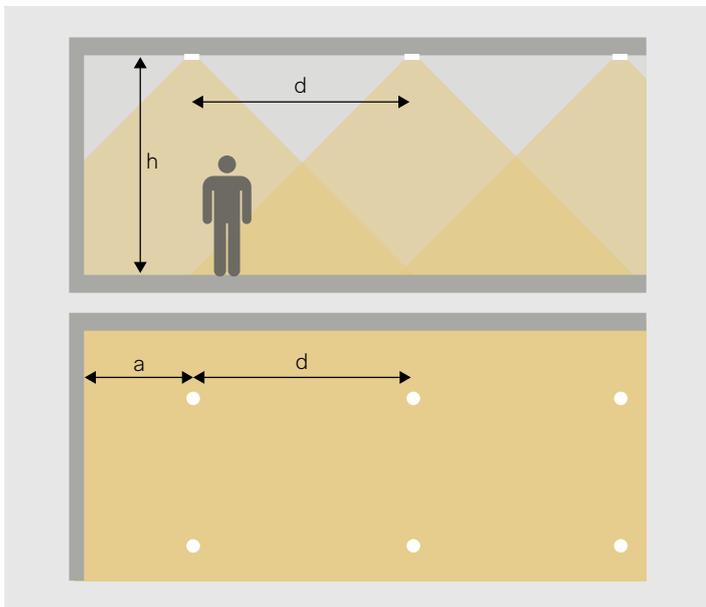
$$k_p = \eta_R \cdot \eta_L \cdot WF$$

$$E_n = \frac{\Phi_{ges} \cdot k_p}{A}$$

Dans l'hypothèse d'un luminaire efficace et de locaux lumineux d'une hauteur de 3 m environ, la valeur k_p = peut être admise à 0,6.

La distance entre les luminaires constitue un autre aspect à analyser. Elle est déterminante du point de vue lumineux, énergétique et économique. La règle empirique communément admise stipule que la distance entre les luminaires d devrait correspondre à la hauteur h , hauteur sol – bord inférieur du luminaire. Pour une répartition homogène, la distance par rapport à la paroi a devrait être égale à la moitié de la distance d (figure 6.4).

Figure 6.4: La distance d entre luminaires devrait être égale à la hauteur h . La distance par rapport à la paroi a devrait être égale à la moitié de la distance d . (Source: [Ercol])



6.4 Eclairage, bases et grandeurs

Le terme de lumière désigne les longueurs d'onde entre 380 et 780 nm du rayonnement électromagnétique (figure 6.5). Ce spectre provoque dans l'œil humain une perception de luminosité et de couleurs.

Flux lumineux Φ

Unité: lumen (lm)

Le flux lumineux Φ indique la quantité d'énergie rayonnée par une source lumineuse.

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} s(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Eclairement lumineux E

Unité: lux (lx)

L'éclairement lumineux E décrit la quantité de flux lumineux qui est interceptée par une surface. L'éclairement lumineux est une des grandeurs définies par les normes relatives à l'éclairage, la norme SN EN 12464-1 par exemple, et qui doivent être respectées dans le cadre de la planification.

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

Luminance L

Unité: (cd/m²)

La luminance L est l'intensité lumineuse I émise, divisée par la surface lumineuse A et perçue par l'œil humain dans une

Valeurs d'éclairement lumineux

Lumière du jour	5000–100 000 lx
Pleine lune	1 lx
Bureau	500 lx

Tableau 6.2: Comparatif de divers éclairagements lumineux.

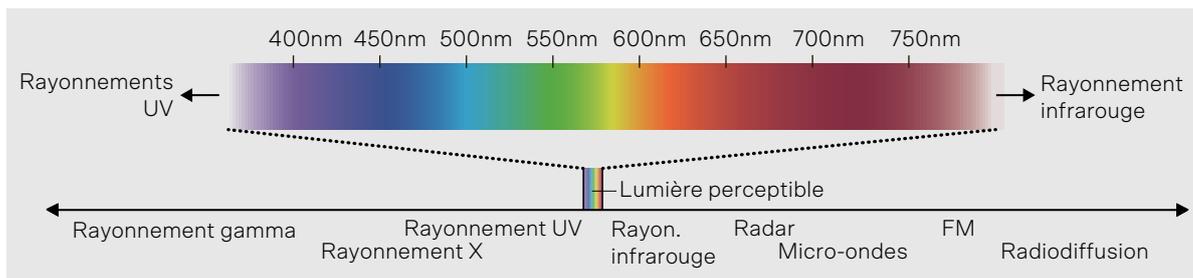


Figure 6.5: Rayonnement électromagnétique détaillant le spectre perceptible par l'œil humain. (Source: Wikipédia)

direction donnée. La luminance est l'unique grandeur de base de l'éclairage qui est immédiatement perceptible par l'œil humain. Le terme de luminosité illustre le mieux cette grandeur.

Facteur de réflexion lumineuse ρ

Le facteur de réflexion lumineuse ρ est une grandeur sans unité caractérisant un matériau. Il indique la part de lumière, respectivement de rayonnement électromagnétique, qui est réfléchi par sa surface.

- 0 = noir idéal (= aucune réflexion)
- 1 = blanc idéal (= réflexion maximale possible)

Les matériaux totalement diffus (le papier ou encore la peinture de dispersion mate par exemple) se caractérisent par le rapport suivant entre l'éclairage lumineux E et la luminance L :

$$L = \frac{E \cdot \rho}{\pi}$$

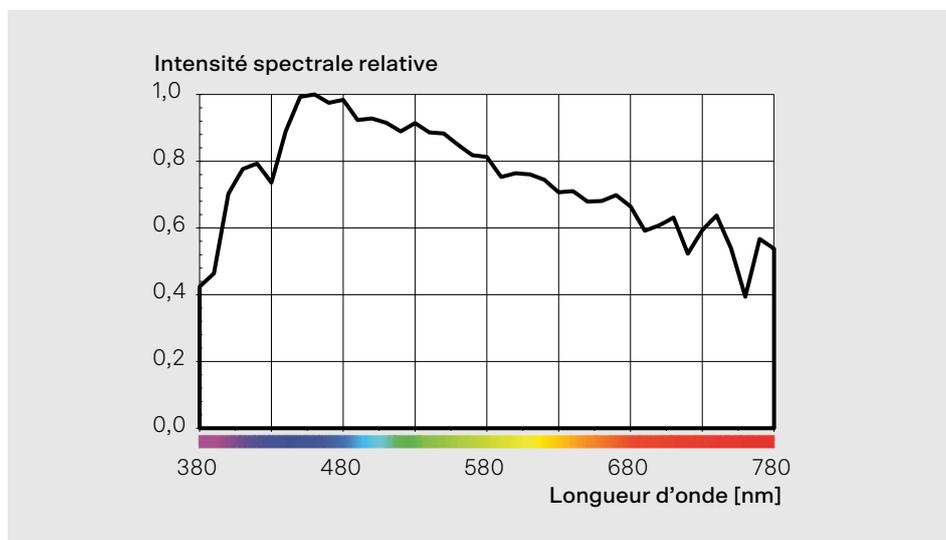


Figure 6.6: Spectre brute $s(\lambda)$ de la lumière du jour. (Source: Licht@hslu)



Figure 6.7: Grandeurs lumineuses de base.

Angle solide Ω

Unité: steradian (sr)

L'angle solide Ω est l'aire de la calotte sphérique d'une boule unité divisée par le rayon de la boule unité R élevé au carré. L'angle solide sert à calculer d'autres grandeurs lumineuses.

Intensité lumineuse I

Unité: candela (cd)

L'intensité lumineuse I est la part du flux lumineux rayonnée dans une direction donnée (rapporté à l'angle solide), voir figure 6.8.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

Figure 6.8: Le flux lumineux Φ rapporté à l'angle solide Ω donne l'intensité lumineuse I . (Source: Schrader 2011, illustration de l'auteur)

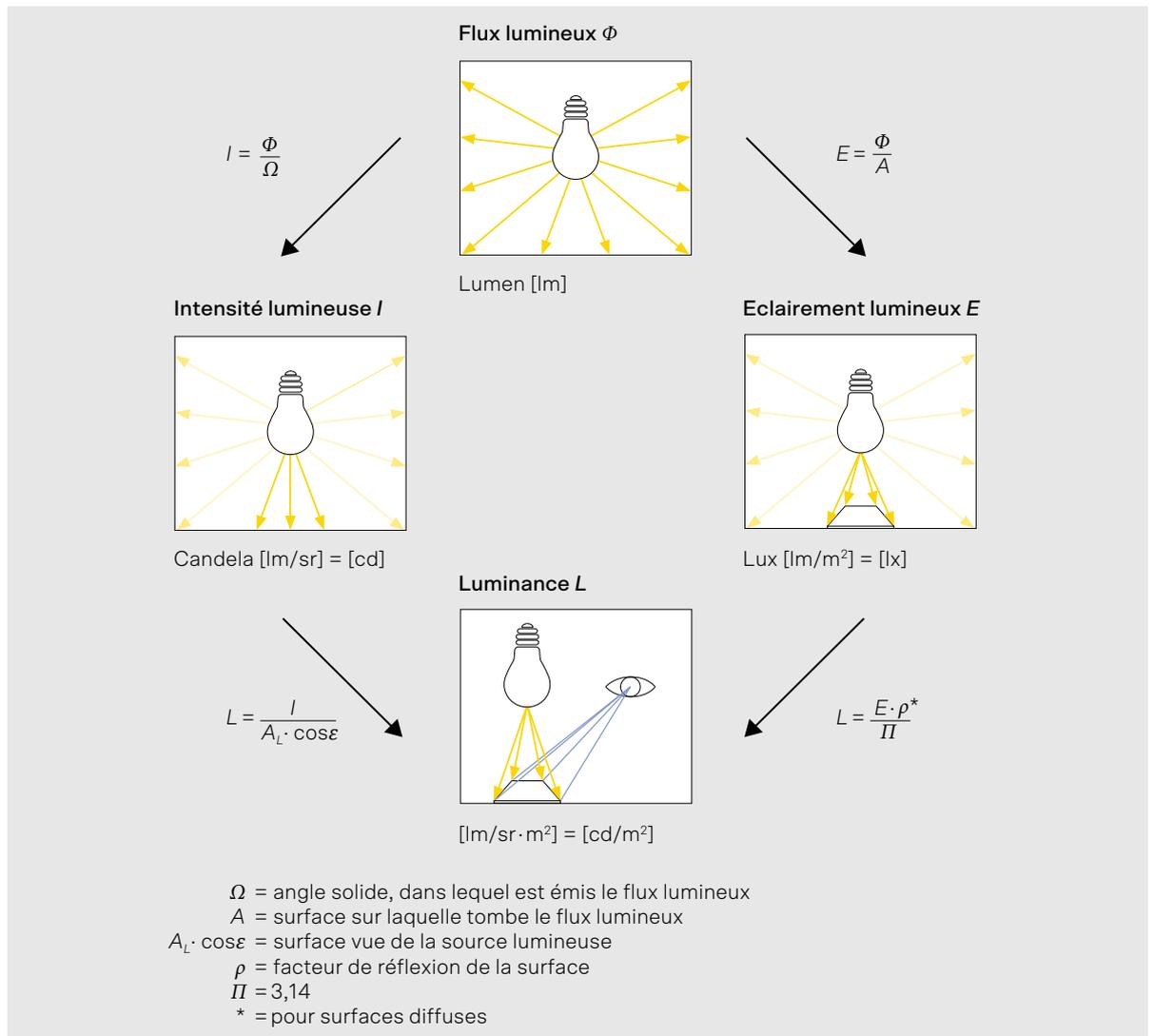
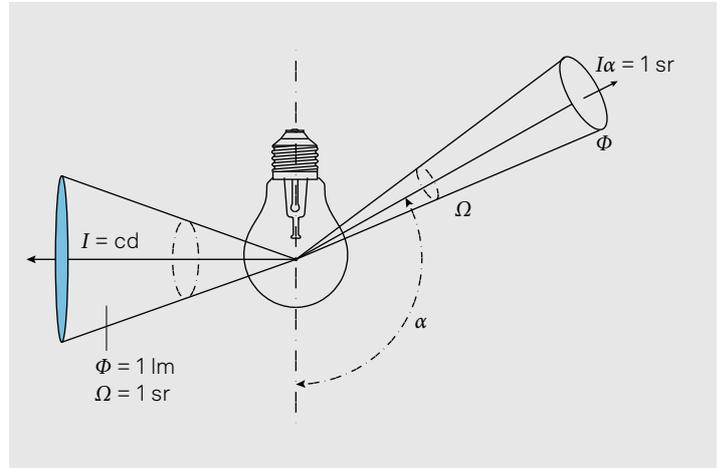


Figure 6.9:
Relation entre les
grandeurs photomé-
triques de base.
(Source: Zumtobel)

Courbe de répartition lumineuse

Si les valeurs pour l'intensité lumineuse sont reportées sous forme de longueur en fonction de l'orientation, il en résulte un diagramme de répartition lumineuse (LVK) d'un luminaire. Le diagramme LVK d'un downlight est représenté à titre d'exemple à la figure 6.10. Le diagramme de répartition lumineuse sert à évaluer la caractéristique de rayonnement d'un luminaire.

6.5 Lampes et luminaires

Un luminaire est un dispositif pour l'éclairage dans lequel un corps lumineux est incorporé de manière fixe, respectivement qui permet d'incorporer un corps lumineux. Dans le langage courant, le terme de lampe est souvent utilisé pour désigner un luminaire. Dans le domaine technique pourtant, la lampe est le corps lumineux, par exemple la lampe à incandescence ou la lampe fluorescente. Le luminaire est composé d'un boîtier, du dispositif de fixation, du réflecteur, de la douille et, selon le type de luminaire, du ballast (figure 6.11).

Types de lampes

Il y a dix ans encore, un nombre considérable de catégories types de lampe étaient disponibles sur le marché. Elles se différençaient par le type de production de lumière, le niveau de puissance, l'efficacité énergétique, le socle et d'autres caractéristiques encore. Le choix de la lampe dépendait fortement de son utilisation, et il était déterminant pour l'efficacité énergétique du projet d'éclairage.

Depuis 2010, il est de plus en plus courant d'utiliser des diodes électroluminescentes (LED). La technologie LED a révolutionné la production de lumière en moins de dix ans. De nos jours, les LED représentent la source lumineuse principale, les lampes classiques n'ont plus guère d'importance sur le marché. Le recours à des lampes inefficaces est ainsi devenu rare. Pour cette raison, les différents types de lampe et de production de lumière ne sont pas abordés de manière détaillée dans cet ouvrage.

Figure 6.10: Diagramme de répartition lumineuse d'un downlight émettant la totalité du flux lumineux vers le bas. (Source: diagramme LVK dans le logiciel [Relux])

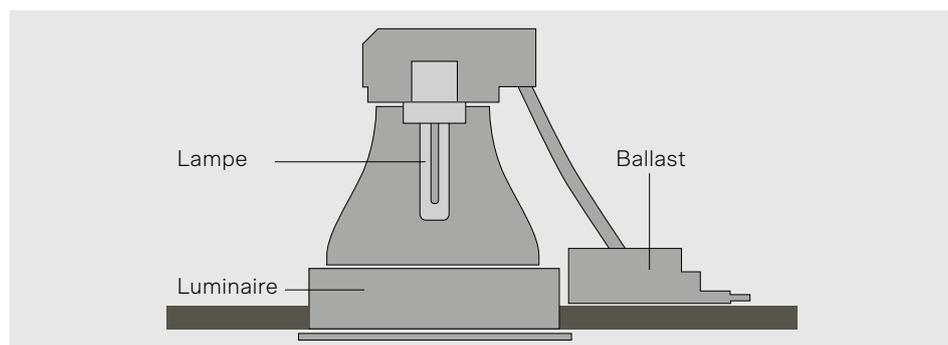
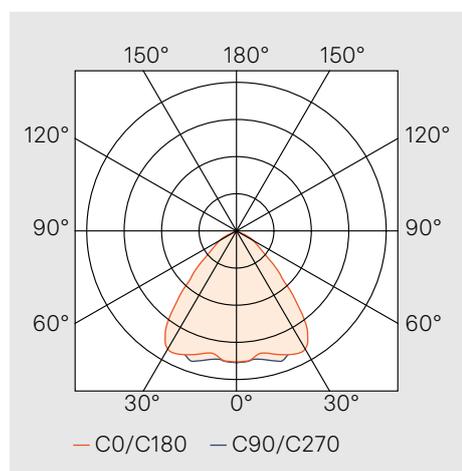


Figure 6.11: Distinction luminaire – lampe. (Source: Licht@hslu)

Caractéristiques des lampes:

Chaque source lumineuse se caractérise par un spectre spécifique induit par la production lumineuse (figure 6.12). Le spectre de la source lumineuse permet de déterminer des propriétés importantes et décisives pour la qualité de la lumière. Le flux lumineux, la température de couleur et le rendu de couleur sont les grandeurs les plus importantes pour la planification de l'éclairage.

Efficacité lumineuse d'une lampe:

Unité: lumen/watt [lm/W]

La puissance absorbée en watt indique la puissance P que la lampe nécessite pour fonctionner. Le flux lumineux Φ et la puissance P permettent de calculer l'efficacité lumineuse de la lampe, en

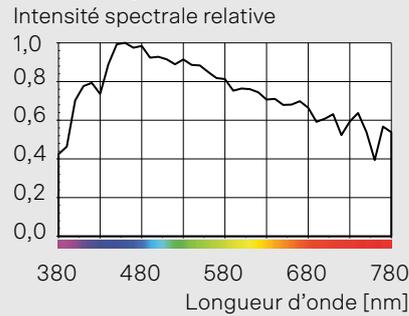
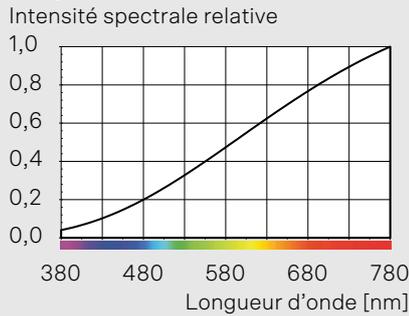
d'autres termes, l'efficacité énergétique de la source lumineuse.

$$\eta_{Lampe} = \frac{\Phi}{P}$$

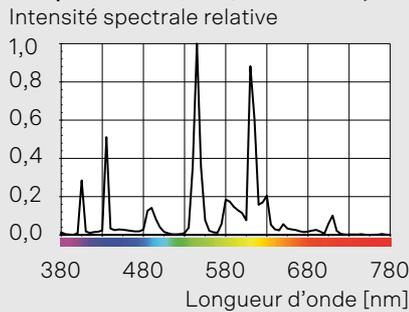
Rendu de couleur:

La couleur perçue d'une source lumineuse est provoquée par le spectre qu'elle émet. L'indice de rendu de couleur Ra (en anglais Colour Rendering Index, CRI) est utilisé pour indiquer la capacité d'une source lumineuse à restituer les nuances de couleur. Cet indice est déterminé sur la base de 8, respectivement de 14 couleurs d'essai. Sans unité, le meilleur rendu correspond à un indice de 100, qui est atteint exclusivement par la lumière d'une lampe à incandescence et par la lumière du jour. Une

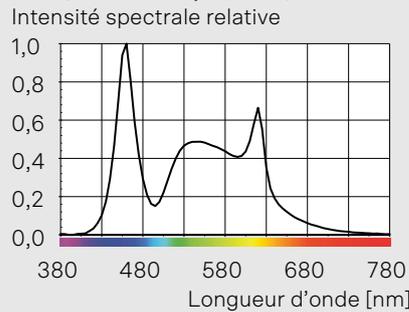
Lampe à incandescence (Ta = 2700 K, Ra = 100) Lumière du jour (Ta = 6500 K, Ra = 100)



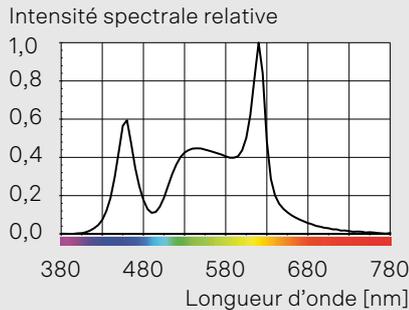
Lampe fluorescente (Ta = 4000 K, Ra = 80)



LED (Ta = 5700 K, Ra = 89)



LED (Ta = 3700 K, Ra = 92)



LED (Ta = 2700 K, Ra = 89)

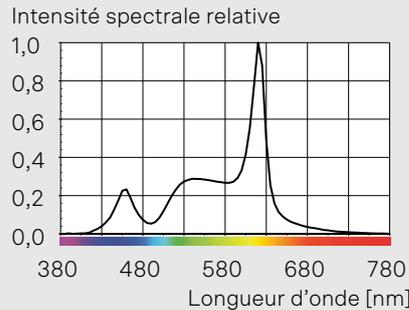


Figure 6.12: Spectre caractéristique de différentes sources lumineuses. Ta: température de couleur Ra: indice de rendu de couleur. (Source: Licht@hslu)

valeur égale ou supérieure à 80 indique un bon rendu de couleur, égale ou supérieure à 90 un très bon rendu de couleur. Ce système suranné est insuffisant pour évaluer des LED. Une information plus précise est possible en recourant au Ra basé sur 14 couleurs d'essai avec indication de la valeur R9 pour le rouge saturé. Des systèmes d'évaluation alternatifs comme le [TM-30] proposé par la Commission internationale de l'éclairage CIE font actuellement l'objet de discussions internationales. Ils sont plus appropriés pour évaluer le rendu de couleur des LED, mais leur usage ne se sont pas encore généralisés.

Température de couleur:

La température de couleur (en anglais CCT, Correlated Colour Temperature) est exprimée en Kelvin (K). Elle indique comment la couleur de la source lumineuse est perçue, p. ex. comme couleur chaude ou froide (figure 6.13). Le terme «couleur de la lumière» est aussi employé. La température de couleur est la température d'un corps noir provoquant la même perception de couleur que la lampe évaluée. Elle est comprise entre 2500 et 3400 K pour les lampes à incandescence, elle est un peu plus élevée pour les lampes halogènes à incandescence. Les LED couvrent une plage comprise entre environ 1500 et 8000 K. Pour simplifier, la température de couleur et le rendu de couleur des sources lumineuses sont souvent indiqués par un code comportant trois chiffres (YXX). Le premier chiffre se réfère à l'indice de rendu de couleur, les deux suivants à la température de couleur.

Le chiffre 965 signifie ainsi un indice de rendu de couleur $Ra \geq 90$ et une température de couleur de **6500 K**.

Types de luminaires

De très nombreux de types de luminaire sont disponibles sur le marché. Il est judicieux que les planificateurs d'éclairage les choisissent pour qu'ils correspondent bien à leur future utilisation. Pour un fonctionnement stable, la plupart des lampes requièrent un ballast ou un driver qui assure la tension d'alimentation requise. A ce titre, il faut faire la distinction entre appareils avec et sans intensité variable (variateur de tension d'alimentation pour dimmer). De plus, il existe des drivers intelligents avec variateur de tension et interface bus; en général, ceux-ci fonctionnent de nos jours selon le standard DALI. La consommation en mode veille des ballasts DALI actuels s'élève à moins de 0,3 W par appareil.

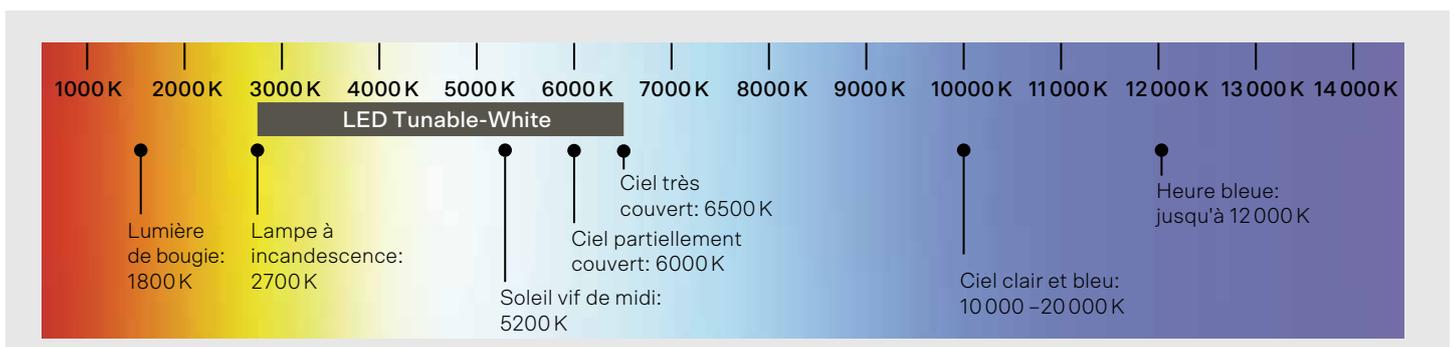
Efficacité lumineuse d'un luminaire:

Unité: lumen/watt [lm/W]

Le rendement η_{LOR} , le flux lumineux de la lampe et les indications relatives à la puissance de la lampe et du driver permettent de déterminer l'efficacité lumineuse d'un luminaire. Elle renseigne sur l'efficacité énergétique du luminaire. Une efficacité lumineuse d'un luminaire supérieure à 100 lm/W est recommandée. Les sites [toplicht.ch] et [topten.ch] fournissent des informations et conseils d'actualité au sujet de lampes et de luminaires efficaces.

$$\eta_{Luminaire} = \frac{\Phi_{Lampe} \cdot \eta_{LOR}}{P_{Lampe} + P_{Ballast}}$$

Figure 6.13: Température de couleur de différentes sources lumineuses: une lumière avec une part bleue importante est ressentie comme froide. (Source: Licht@hslu)



6.6 Sources

- [Loi sur le travail] Commentaire de l'ordonnance 3 relative à la loi sur le travail, chapitre 2, section 2, article 15 Eclairage. Secrétariat d'Etat à l'économie (SECO). Berne, 2018 et Commentaire de l'ordonnance 4 relative à la loi sur le travail, chapitre 2, section 4, article 17 Fenêtres. Secrétariat d'Etat à l'économie (SECO). Berne, 2016.
- [OFEN] Prognos et.al. Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2020 nach Verwendungszwecken. Bundesamt für Energie (BFE). Bern, 2021.
- [Erco] Erco Ratgeber. www.erco.com
- [Minergie
Lumière naturelle] Minergie Suisse (éd.). Minergie, Savoir-faire: Lumière naturelle. Bâle, 2020. www.minergie.ch
- [Relux] Relux. www.relux.com
- [SIA 2024] Cahier technique SIA 2024. Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2021.
- [SIA 387/4] Norme SIA 387/4. Electricité dans les bâtiments – Eclairage: calcul et exigences. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2017.
- [SN EN 12464-1] Norme suisse SN EN 12464-1. Lumière et éclairage – Eclairage des lieux de travail – Partie 1: Lieux de travail intérieurs. Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour, 2021.
- [SN EN 17037] Norme suisse SN EN 17037+A1. Lumière naturelle dans les bâtiments. Association Suisse de Normalisation (SNV). Winterthour, 2022.
- [Standard S 026] Norme CIE S 026. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light. International Commission on Illumination. Vienna, 2018.
- [TM-30] International Commission on Illumination. Technical Memorandum – Method for Evaluating Light Source Color Rendition. Vienna, 2020.
- [toplicht.ch] Toplicht.ch. www.toplicht.ch
- [topten.ch] Topten.ch. www.topten.ch → Eclairage

Appareils et installations électriques

Jürg Nipkow

7.1 Importance grandissante de l'électricité

La technique du bâtiment nécessite en premier lieu de l'électricité pour remplir sa fonction, à savoir p. ex. pour éclairer une pièce ou renouveler l'air. D'autre part, presque toutes les installations techniques – brûleurs, pompes, commande et régulation, etc. – requièrent également de l'énergie auxiliaire sous forme d'électricité pour fonctionner. Pour les bâtiments plus récents, l'importance de l'énergie électrique est encore plus conséquente, car ils sont souvent équipés de pompes à chaleur. De nombreuses nouvelles applications faisant partie des installations générales du bâtiment ont elles aussi besoin d'électricité pour fonctionner. Le cahier technique [SIA 2056] énumère à ce propos 26 catégories, voir tableau 7.1. En outre, des solutions modernes d'entraînements électriques sont importantes afin d'utiliser l'énergie électrique de manière efficace. Il s'agit là, à titre d'exemples, de convertisseurs de fréquence, de moteurs EC et leurs commandes respectivement de leur gestion de l'énergie. Dans le cadre d'installations complexes, c'est l'automatisation du bâtiment qui assure les conditions nécessaires à une bonne gestion de l'énergie. Les bâtiments non résidentiels d'une certaine taille sont équipés par défaut d'une automatisation du bâtiment; de plus en plus souvent, les bâtiments résidentiels le sont également – mot clef «Smart Home». Mais l'automatisation du bâtiment nécessite elle-même de l'électricité – sa consommation est donc à examiner d'un œil tout aussi critique. Toujours est-il qu'il faut tenir compte de cet aspect lors de l'établissement des appels d'offres. Le chapitre 8 donne des informations plus détaillées à ce sujet.

7.2 Cahier technique SIA 2056 «Electricité dans les bâtiments»

Quasiment tout le contenu de l'ancienne norme SIA 380/4 «L'énergie électrique dans le bâtiment» de 2006 est suranné. Celle-ci a été remplacée par les documents suivants:

- Les chapitres relatifs à la ventilation, y compris la puissance du ventilateur et la régulation, ont été remplacés par la norme [SIA 382/1] «Ventilation mécanique dans les bâtiments – Bases et performances requises».
- Les chapitres relatifs à l'éclairage ont été remplacés par la norme [SIA 387/4] «Electricité dans les bâtiments – Eclairage: calcul et exigences».
- Les autres consommateurs électriques sont traités dans le nouveau cahier technique SIA 2056 «Electricité dans les bâtiments – Besoins en énergie et puissance requise».

Le but principal du cahier technique SIA 2056 est de déterminer les besoins en puissance et en énergie électriques dans les bâtiments lors de la phase d'avant-projet selon la norme [SIA 112]. Il ne définit aucune exigence mais comporte, sous forme de tableaux et de remarques, de nombreuses compilations de valeurs actuelles correspondant à une consommation énergétiquement efficace. Ainsi, avec les autres normes pertinentes, ce cahier technique contribue sans aucun doute à l'utilisation rationnelle de l'électricité dans les bâtiments. En comparaison avec l'ancienne norme SIA 380/4, le cahier SIA 2056 aborde les thèmes suivants d'une façon nouvelle, respectivement sous un autre angle:

- Appareils: l'ancien terme «équipements d'exploitation» n'est plus utilisé. Les appareils électriques ne sont plus présentés par catégorie isolée, mais regroupés pour constituer des combinai-

sons d'ordre fonctionnel. Cette approche améliore, dans la phase d'avant-projet, la quantification des besoins en électricité.

Exemples de combinaison d'appareils:

«Gastro 1» est une kitchenette avec frigidaire et lave-vaisselle. La combinaison «Gastro 2» correspond à «Gastro 1» avec en sus four, grille, etc., mais ce n'est pas encore un équipement pour restaurant.

Les combinaisons «Bureau à utilisation sporadique» et «Bureau à utilisation normale» se rapportent à des bureaux avec équipement simple, respectivement normal. Les besoins en puissance et en énergie électriques sont indiqués, pour tous les groupes de combinaisons d'appareils, par classe d'intensité.

– Installations de production: seules quelques installations courantes sont abordées: réfrigérateurs et congélateurs

pour froid commercial, appareils pour cuisines industrielles, etc. Les installations de production industrielles ne peuvent toujours pas être traitées, en raison de leur diversité.

– Eclairage: le cahier technique SIA 2056 comporte une méthode de calcul simplifiée, basée sur la norme SIA 387/4. Le calcul conformément à la SIA 387/4 est exigé uniquement pour des projets complexes.

– Installations générales: ce terme regroupe de nombreuses nouvelles applications, de l'installation pour la téléphonie mobile à l'installation de surveillance vidéo jusqu'au contrôle d'accès, en partie avec des besoins importants en électricité. Le cahier SIA 2056 fournit des valeurs pour les besoins en énergie et en puissance électriques pour 26 catégories (tableau 7.1).

– Chaleur: le cahier SIA 2056 expose de manière succincte le calcul des besoins en énergie et en puissance électriques pour les chauffages par pompe à chaleur (sur la base de la norme [SIA 384/3]), pour l'énergie auxiliaire destinée au chauffage et à l'eau chaude ainsi que pour les rubans chauffants électriques.

– Ventilation et climatisation: selon le cahier SIA 2056, les besoins en énergie et en puissance électriques des installations de ventilation sont calculés à partir de la surface utile, de la puissance spécifique des ventilateurs ou de la différence de pression. Ces données de base doivent provenir d'une planification de l'installation conforme à la norme SIA 382/1.

– Demande d'électricité des bâtiments d'habitation: un modèle de calcul simple – rapporté soit au nombre des occupants ou à la surface – permet de déterminer les besoins en énergie et en puissance électriques des bâtiments d'habitation.

– Production d'électricité sur place: le cahier SIA 2056 définit des modèles de calcul simples pour déterminer l'apport énergétique des installations photovoltaïques (PV) et des couplages chaleur-force (CCF) faisant partie du bâtiment. Les accumulateurs intégrés dans l'ins-

Tableau 7.1: Les installations générales du bâtiment comportent depuis peu de temps de nombreuses nouvelles applications. Elles nécessitent toutes de l'électricité pour fonctionner – au minimum sous forme d'énergie auxiliaire.

Catégories d'installations générales selon la norme SIA 2056	
6.1	Installation d'éclairage de secours
6.2	Dispositifs de protection solaire
6.3	Barrières
6.4	Parcmètre collectif
6.5	Porte à tambour
6.6	Porte coulissante
6.7	Tourniquet
6.8	Chauffage de gouttière
6.9	Récepteur satellite
6.10	Chauffages électriques à résistance utilisés en plein air
6.11	Installation pour la téléphonie mobile
6.12	Automation du bâtiment
6.13	Système de prévention d'incendie
6.14	Installation d'extraction de fumée et de chaleur
6.15	Système de sonorisation et système d'alerte électroacoustique
6.16	Installation de détection d'effractions
6.17	Installation de contrôle d'accès
6.18	Installation de surveillance vidéo
6.19	Transformateur
6.20	Ensemble de commutateurs
6.21	Système d'alimentation sans coupure (UPS)
6.22	Installation de substitution au réseau (groupe diesel de secours)
6.23	Ascenseur
6.24	Escaliers mécaniques et trottoirs roulants
6.25	Véhicules électriques
6.26	Très petits consommateurs

tallation PV sont aussi pris en compte. Les valeurs calculées ne servent qu'à une estimation dans les phases initiales du projet; pour la planification du projet proprement dite, il est obligatoire de procéder aux calculs conformément aux normes et méthodes en vigueur (cahiers techniques [SIA 2061] et [SIA 2062]).

Le cahier technique [SIA 2024] «Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment» définit également comment estimer les besoins en énergie et en puissance électriques des bâtiments, ceci en sus des besoins en énergie pour le chauffage. Les valeurs estimatives indiquées se basent cependant exclusivement sur la surface de plancher nette, par utilisation du local, et ne tiennent pas compte des installations générales. Pour cette raison, les résultats obtenus par l'application du cahier technique SIA 2056 sont plus complets et plus précis.

7.3 Consommation d'électricité d'un ménage et d'un poste de travail types

Selon les statistiques de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), environ 33% de la consommation d'électricité en Suisse incombe aux ménages; ce pourcentage élevé est dû principalement aux chauffages électriques (en fonction des conditions météorologiques) et à la production électrique de l'eau chaude. C'est pourquoi l'étude de la consommation d'un ménage-type (figure 7.1) livre davantage de renseignements utiles.

Selon les données les plus récentes, la consommation des maisons plurifamiliales a diminué entre 2011 et 2019 de 20% environ, celle des maisons individuelles de largement 25%. Les valeurs sont indiquées en fonction de la taille du ménage [SuisseEnergie]. La consommation d'électricité d'un ménage-type est calculée sans production électrique de l'eau chaude sanitaire, mais avec utilisation du lave-vaisselle. Un congélateur séparé est compté en sus pour les maisons individuelles. Pour les maisons plurifami-

Tableau 7.2: Exemples de consommation d'électricité de la combinaison d'appareils «bureau à utilisation normale» pour 261 jours de fonctionnement. La classe d'intensité «élevée» correspond à un poste de travail hautement équipé (p. ex. deux ordinateurs, plusieurs moniteurs) et utilisé de manière intensive avec des appareils plutôt inefficaces, la classe «faible» à un poste de travail peu équipé avec des appareils efficaces.

	Classe d'intensité		
	faible	moyenne	élevée
Exploitation	170	350	850
Mode veille	30	60	260
Total	200	410	1110

Valeurs en kWh/a

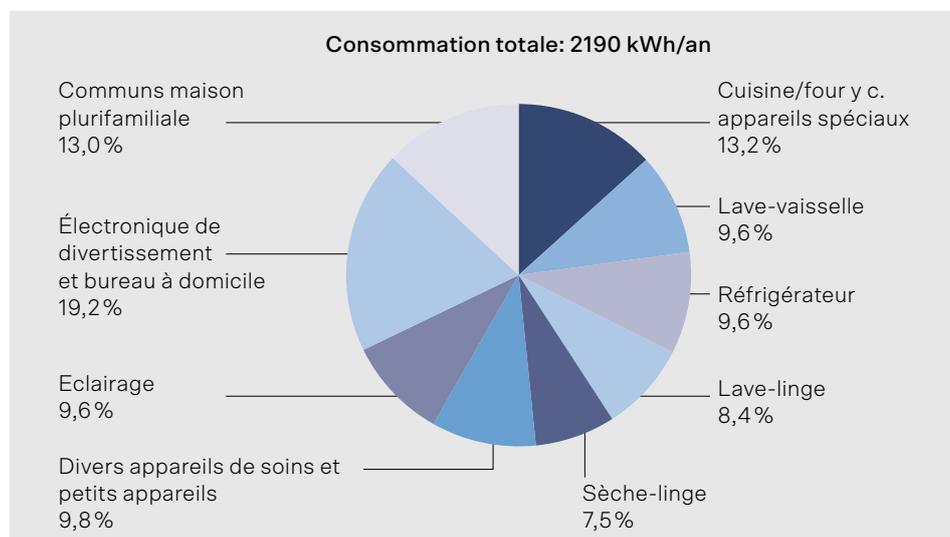


Figure 7.1: Consommation d'un ménage-type en 2019 pour un appartement de deux personnes dans une maison plurifamiliale.

liales, une valeur fixe de 285 kWh est supposée pour la consommation d'électricité des communs (400 kWh en 2011). La consommation d'électricité de quelques appareils et installations a fortement diminué ces dernières années, aussi grâce aux prescriptions. Il s'agit là avant tout de l'éclairage, des appareils de réfrigération et de congélation, des sèche-linge (sèche-linge à pompe à chaleur) et des pompes de circulation.

Le cahier technique SIA 2056 contient de nombreuses données relatives à la demande en électricité des bâtiments du secteur tertiaire. Pour les combinaisons d'appareils, les valeurs de consommation sont indiquées selon un nombre-type de jours d'exploitation (p. ex.: bureaux, 261 jours; commerces, 313 jours; hôtels, 365 jours), ceci pour les classes d'intensité d'exploitation, resp. d'efficacité énergétique «faible», «moyenne» et «élevée». Le tableau 7.2 liste quelques valeurs de consommation annuelle d'électricité pour la combinaison d'appareils «bureau à utilisation normale», à savoir ordinateur ou ordinateur portable, écran(s), chargeurs, téléphone, imprimante ou imprimante réseau (au prorata).

Le cahier technique SIA 2056 réunit par ailleurs des valeurs de consommation d'électricité pour les services centraux, p. ex. les technologies de l'information et de la communication (TIC), ou encore pour les équipements de restauration (Gastro 1 et Gastro 2).

Figure 7.2: Pour mesurer la consommation d'électricité des appareils enfilables, il existe des appareils de mesure peu coûteux et suffisamment précis sous forme de fiches intermédiaires. (Photos dans le sens des aiguilles d'une montre: EMU Check/ EMU Electronic AG; appareil de mesure d'énergie EMR-1 220-240V/Max Hauri AG; appareil de mesure d'énergie Digital IP20/A. Stefan AG; CLM1000/ Transmetra GmbH)



7.4 Mesure de la consommation électrique

Une mesure de la consommation des appareils et installations électriques peut s'imposer pour différentes raisons:

- Contrôle de fonctionnement et de résultat pour les constructions nouvelles et les rénovations ou assainissements énergétiques
- Décompte des coûts énergétiques d'après la consommation effective, par exemple pour les buanderies communautaires des maisons plurifamiliales ou pour les services centraux des bâtiments non résidentiels
- Relevé de l'état existant en amont d'assainissements ou de renouvellements

De nos jours, il est simple de déterminer la consommation d'appareils enfilables à l'aide de wattmètres mesurant l'énergie et la puissance de manière assez précise (exemples à la figure 7.2). Afin de pouvoir en plus représenter graphiquement les valeurs sur une période donnée, il faut recourir à des appareils enregistreurs. Ces enregistreurs coûtent cher.

En cas d'appareils ou d'installations avec raccordement fixe, un enregistreur d'énergie électrique triphasée est souvent nécessaire pour mesurer et enregistrer les valeurs. Il doit être raccordé par un professionnel. Afin de pouvoir exploiter de telles mesures de manière pertinente, il est important de consigner le dispositif et les paramètres de la mesure avec précision. Seule cette manière de procéder permet d'obtenir des résultats cohérents et fiables.

7.5 Moteurs électriques et convertisseurs de fréquence

Les entraînements électriques sont des consommateurs importants dans le domaine des installations techniques; dès fois bien visibles, par exemple les entraînements des ventilateurs pour installations aérauliques ou encore des pompes de grande taille, ou parfois aussi cachés, comme c'est le cas pour les stores, les portes automatiques, les ascenseurs, les pompes de circulation d'un chauffage, les petits ventilateurs d'appareils électroniques, etc. Pour beaucoup de ces applications, des moteurs monophasés très inefficaces, voire des moteurs asynchrones à bague de déphasage ont été utilisés et le sont en partie toujours. Et pourtant, presque toutes les applications peuvent de nos jours également être mises en œuvre avec des moteurs appelés EC, qui sont très efficaces. EC est l'abréviation pour «electronically commutated», à savoir des moteurs à commutation électronique avec aimants permanents, caractérisés par un rendement supérieur à 80 %. À l'opposé, les moteurs précités de l'ancienne génération ne dépassent pas les 10 à 30 %.

Pour une importante catégorie d'entraînements, une technique efficace est prescrite depuis 2009: afin d'être autorisées à la vente, les pompes de circulation à rotor noyé d'une puissance hydraulique jusqu'à 2500 W doivent être conformes à la législation européenne et suisse relative à l'indice d'efficacité EEI (Energy Efficiency Index). L'exigence minimale en vigueur est égale à $EEI \leq 0,23$; la directive est actuellement en révision, le débat porte entre autres sur une exigence minimale de $EEI \leq 0,20$ et sur un élargissement aux pompes de circulation pour l'eau sanitaire.

Pour être autorisés à la vente en Suisse, les produits doivent respecter soit les exigences de la directive européenne, soit celles de l'annexe de l'ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique (OEEE). Les planificatrices

et installateurs n'ont donc qu'à vérifier, quand ils pensent pouvoir profiter d'une «bonne affaire», s'il ne s'agit pas là d'un produit non autorisé. En revanche, il faut comme auparavant être attentif à dimensionner les pompes correctement, à savoir au plus juste: une erreur fréquente consiste à croire que surdimensionner les moteurs modernes avec régulation automatique du régime ne porte plus à conséquence. Mais il se peut alors que la régulation fonctionne à sa limite inférieure et ne remplisse plus correctement sa fonction.

Pour les ventilateurs d'une certaine taille avec des moteurs séparés des installations aérauliques, il existe également des prescriptions relatives à l'efficacité des ventilateurs et des moteurs. Pour les appareils plus petits, construits selon le principe du ventilateur compact, il n'existe pour le moment pas de prescriptions analogues. Dans ce cas, il s'agit non seulement de respecter les exigences de la norme SIA 382/1, mais il faut encore être attentif à choisir des ventilateurs vraiment efficaces. De tels appareils portent dans la plupart des cas la dénomination «ventilateur EC». Les ascenseurs sont entre-temps équipés par défaut d'entraînements avec convertisseur de fréquence, notamment pour la meilleure précision d'arrêt. Pour cette application, la consommation en mode veille joue un rôle primordial. L'étiquette-énergie pour le secteur des ascenseurs [VDI 4707] prend en compte cet aspect-là de manière détaillée. Les exigences par rapport à l'efficacité de la catégorie A du label sont très élevées, il faut déployer de grands moyens pour y parvenir. Mais aussi les ascenseurs portant le label de la catégorie B sont encore assez efficaces.

Les entraînements des stores représentent des petits consommateurs cachés et en grand nombre. Sur le marché, on trouve toujours des moteurs tubulaires inefficaces, par exemple avec une puissance absorbée comprise entre 100 et 300 W. La puissance absorbée de moteurs efficaces est comprise entre 20

et 50 W. Etant donné que dans leur cas, le nombre des heures de fonctionnement est très peu élevé, les moteurs inefficaces ne provoquent tout de même pas une consommation d'électricité significative. Il se trouve que la commande à distance sans fil de telles applications est plus discutable, car leurs récepteurs utilisent souvent une puissance de quelques watts en mode veille. Vu qu'ils fonctionnent par principe sans interruption, la consommation d'énergie est considérable au cours d'une année. Cela est aussi valable pour tous les appareils IoT, qui sont mis en réseau et connectés à l'Internet des objets (Internet of Things). Leur consommation d'électricité n'est souvent pas déclarée spécifiquement et doit être réclamée par les planificateurs.

7.6 Optimisation globale des installations techniques

Les systèmes et équipements techniques du bâtiment touchent de nombreux corps de métier, ils sont généralement complexes, dépendent d'énormément de paramètres et se caractérisent par des objectifs très variés. Certes, le premier objectif visé est qu'ils remplissent leur fonction et respectent les exigences définies, cependant il ne faut pas négliger leur demande en électricité. Une consommation élevée d'électricité se répercute pendant des décennies sur les coûts d'exploitation et représente non seulement un désavantage écologique, mais également économique. Pour les systèmes comportant des entraînements, l'efficacité et la demande en électricité ne dépendent d'ordinaire pas en première ligne du moteur, mais des facteurs suivants: dimensionnement des conduites d'air, commande et régulation (mode veille, mise en réseau), fonctions supplémentaires inutiles et grandes marges de sécurité. Pour cette raison, une optimisation énergétique implique de prendre en compte tous les composants et paramètres. Le cahier technique SIA 2056 fournit des bases détaillées à cet effet.

De nombreux composants des installations techniques du bâtiment doivent répondre à des exigences minimales d'efficacité énergétique. Celles-ci sont fréquemment issues de directives ou de règlements de l'UE, que reprend en principe l'OEEE suisse. Les produits largement inefficaces ne sont par conséquent pas autorisés à la vente. Néanmoins, les produits autorisés présentent souvent une marge de manœuvre considérable en matière d'efficacité énergétique. D'éventuelles étiquette-énergie et autres labels énergétiques constituent une aide bienvenue pour les évaluer.

7.7 Sources

- [SuisseEnergie] Office fédéral de l'énergie, SuisseEnergie. Fiche d'information «Consommation électrique d'un ménage». Berne, 2021.
www.suisseenergie.ch/menage/
- [SIA 112] Norme SIA 112. Modèle Etude et conduite de projet. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2014.
- [SIA 2024] Cahier technique SIA 2024. Données d'utilisation des locaux pour l'énergie et les installations du bâtiment. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2021.
- [SIA 2056] Cahier technique SIA 2056. Electricité dans les bâtiments – Besoins en énergie et puissance requise. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2019.
- [SIA 2061] Cahier technique SIA 2061. Systèmes de stockage par batteries dans les bâtiments. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2021.
- [SIA 2062] Cahier technique prSIA 2062 (projet). Photovoltaïque intégré et attaché au bâtiment. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich.
- [SIA 382/1] Norme SIA 382/1. Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2014.
- [SIA 384/3] Norme SIA 384/3. Systèmes de chauffage dans les bâtiments – Besoins en énergie. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2020.
- [SIA 387/4] Norme SIA 387/4. Electricité dans les bâtiments – Eclairage: calcul et exigences. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA). Zurich, 2017.
- [VDI 4707] Richtlinie VDI 4707 Blatt 1:2009. Aufzüge – Energieeffizienz. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Düsseldorf, 2009; en révision.

Automation du bâtiment

Olivier Steiger L'automation du bâtiment désigne tous les équipements pour la commande et la régulation, la surveillance et l'optimisation des installations techniques du bâtiment. Le domaine d'application de l'automation du bâtiment englobe habituellement le climat intérieur (CVC), l'éclairage, la protection solaire et la gestion technique du bâtiment. De plus en plus souvent, d'autres installations sont également intégrées, par exemple la sécurité du bâtiment, le monitoring technique [AMEV 135], le multimédia, les installations sanitaires, les appareils ménagers, les systèmes de gestion de l'énergie et l'Active Assisted Living (AAL), à savoir les systèmes d'assistance pour personnes âgées [Monekosso; et al.]. Les systèmes de gestion technique du bâtiment (SGTB) sont utilisés dans le domaine des bâtiments utilitaires tout comme dans celui des bâtiments d'habitation. Dans le contexte des bâtiments d'habitation, on utilise fréquemment les termes «domotique» et «smart home» pour les désigner.

L'automation du bâtiment remplit différentes tâches, par exemple: améliorer l'efficacité énergétique, augmenter le confort, optimiser la sécurité, offrir des fonctionnalités supplémentaires ou baisser les coûts.

Elle économise de l'électricité en gérant les installations techniques du bâtiment selon les besoins, à titre d'exemples:

- L'éclairage et la ventilation ne fonctionnent seulement lorsque des personnes sont présentes.
- La chaleur et le froid sont fournis dans les locaux en fonction des besoins.

Elle augmente le confort en réagissant aux besoins des utilisateurs, à titre d'exemples:

- La température de couleur de l'éclairage est réglée en fonction de l'heure de la journée et de l'utilisation.
- La qualité de l'air est régulée en fonction de l'occupation des locaux et de la densité de personnes.

Les moteurs de l'automation du bâtiment sont très variés. Les économies d'énergie en font partie. En Suisse, les bâtiments génèrent largement 44 % de la consommation énergétique finale [OFEN 2021]. Le potentiel d'économies est par conséquent considérable. En outre, les bâtiments sont de plus en plus souvent non seulement des consommateurs finaux, mais également des producteurs finaux. Il en résulte un besoin de solutions de monitoring et de gestion.

À quoi s'ajoute que beaucoup de personnes passent jusqu'à 90% de leur temps de vie à l'intérieur [EUA 2013]. Pour cette raison, un confort élevé est un facteur essentiel pour notre bien-être et notre santé.

En fin de compte, la demande d'automation du bâtiment augmente aussi du fait de l'allongement mondial de l'espérance de vie. Le nombre des personnes nécessitant de l'assistance et des soins médicaux augmente en parallèle. Les bâtiments intelligents peuvent y apporter une contribution.

Figure 8.1:
L'automation du bâtiment sert entre autres à augmenter l'efficacité énergétique, le confort et la sécurité. (Photo: FrankBoston/stock.adobe.com)



8.1 Structure

Les éléments clés d'un système de gestion technique du bâtiment (SGTB) sont schématisés dans la figure 8.2. La pièce maîtresse est le contrôleur, appelé également «commande à mémoire programmable (SPS)». Il s'agit là d'un ordinateur intégré qui prend en charge la commande, la régulation, la surveillance et l'optimisation.

Le contrôleur est équipé d'entrées et de sorties pour recevoir et émettre des signaux électriques. Les informations nécessaires sont relevées par des capteurs (aussi: sondes) dans le bâtiment. Voici quelques exemples: les sondes de température relèvent la température ambiante et la température extérieure pour la régulation du chauffage, les capteurs pyroélectriques détectent les personnes présentes pour la commande de l'éclairage en fonction de la présence.

Les valeurs relevées sont transmises via les entrées, le contrôleur les exploite ensuite en tenant compte des paramètres de configuration, par exemple des paramètres de consigne. Ensuite, les instructions de commande sont transmises via les sorties à des actionneurs, qui les transforment en grandeurs électriques, mécaniques ou autres grandeurs physiques. Les actionneurs interviennent donc de manière active dans les processus techniques du bâtiment.

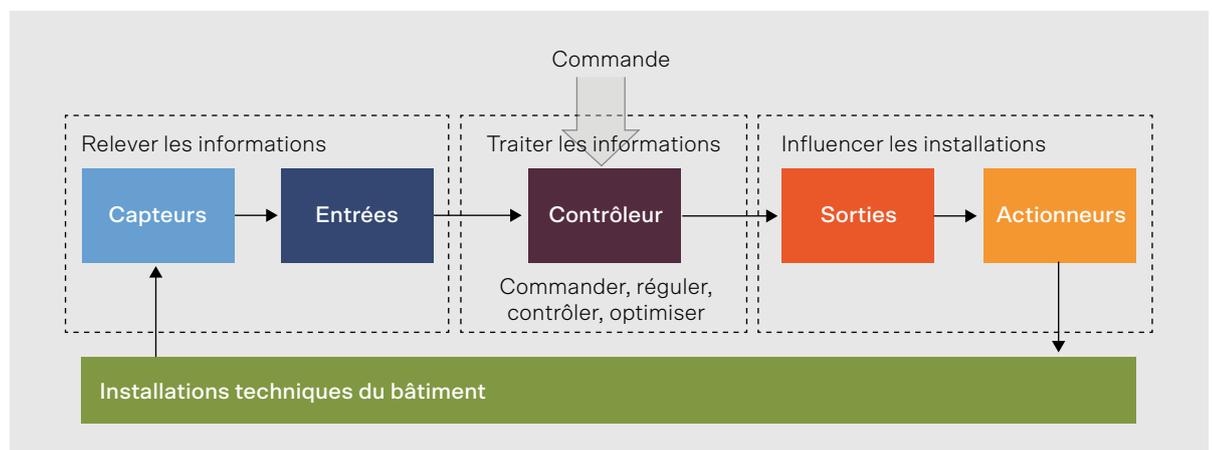
En plus des capteurs, des actionneurs et des contrôleurs, les SGTB sont en réalité composés de nombreux composants supplémentaires, parmi lesquels se

trouvent les modules de commande et les composants du réseau. Selon la norme [EN ISO 16484-2], ces derniers sont attribués aux trois niveaux suivants (figure 8.3):

- Niveau «terrain»
- Niveau «automation»
- Niveau «gestion»

Au niveau «terrain», les différentes installations techniques du bâtiment sont gérées à l'aide des appareils de terrain (capteurs, actionneurs, modules de commande des locaux). Le niveau «automation» prend en charge les tâches d'automation proprement dites, à savoir la commande, la régulation, la surveillance et l'optimisation des installations. Les données fournies par le niveau du terrain ainsi que les consignes issues du niveau «gestion» sont utilisées à cet effet. La commande globale, la surveillance des processus ainsi que les alertes en cas de défaillances se font au niveau «gestion». Le niveau «gestion» est de plus en plus souvent relié en sus à des services de cloud de l'exploitant du bâtiment ou complètement externalisé dans le cloud public.

Figure 8.2:
Représentation schématique des éléments clés d'un système de gestion technique du bâtiment (SGTB).
(Source: Olivier Steiger)



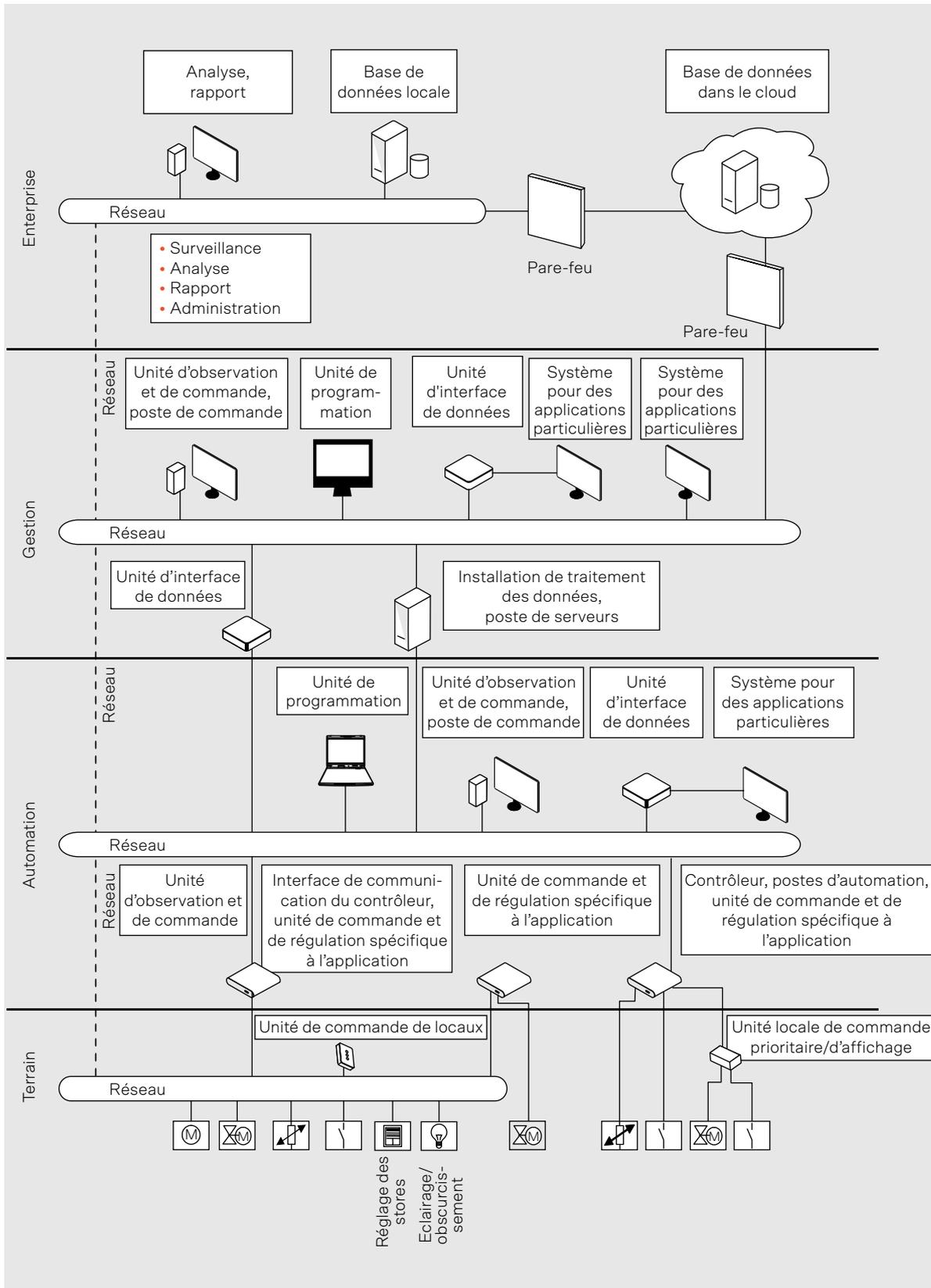


Figure 8.3: Modèle général du matériel (vue technique) d'un STGB. (Source: [EN ISO 16484-2:2016])

8.2 Fonctions

L'automatisation du bâtiment se compose de plusieurs systèmes partiels [DIN 276-1]:

- Système de gestion centralisée du bâtiment (en anglais Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA, donc surveillance, commande et relevés des données)
- Système d'automatisation (automatisation du bâtiment «Direct-Digital-Control» DDC-STGB)
- Système d'automatisation de locaux

Pour chaque système partiel, on définit des fonctions. Une fonction est la plus petite unité de programme standardisée pour l'automatisation du bâtiment. En d'autres termes, les fonctions sont des blocs fonctionnels à partir desquels sont assemblées les différentes applications de l'automatisation du bâtiment. Les fonctions de l'automatisation du bâtiment sont définies dans la norme [EN ISO 16484-3], celles de l'automatisation de locaux dans la directive [VDI 3813, feuille 2]. Les fonctions de gestion sont définies par les deux normes. Elles sont résumées succinctement dans les tableaux 8.1 et 8.2.

8.3 Communication entre systèmes

Un composant central de l'automatisation du bâtiment est la communication entre systèmes, à savoir les connexions de communication entre différents composants. Au début, des connexions directes (aussi: point à point, P2P, PtP) étaient établies entre les différents appareillages. Dans les années septante, les premiers systèmes de bus pour l'automatisation du bâtiment ont été élaborés afin de remplacer la transmission en parallèle de signaux numériques traditionnelle tout comme la transmission analogique de signaux. Ils ont permis de réduire considérablement le câblage et d'améliorer les possibilités d'extension des systèmes.

Les exigences posées aux systèmes de bus actuels vont nettement plus loin. À côté des possibilités d'extension, les exigences prioritaires actuelles sont: l'interopérabilité – à savoir la capacité de collaborer entre différents systèmes et standards –, la fiabilité et la capacité de traitement en temps réel. Pour les applications dans le domaine du smart home, les prérequis sont une installation et une mise en service simples, des coûts bas ainsi que la compatibilité avec les installations techniques et électriques préexistantes. Quelques-uns des systèmes de bus qui ont fait leurs preuves sont schématisés

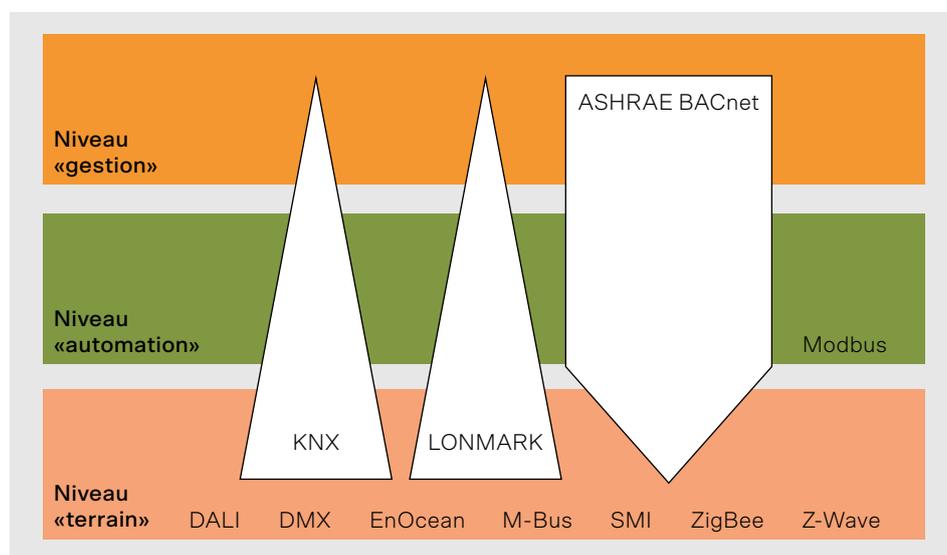


Figure 8.4: Systèmes de bus pour l'automatisation du bâtiment.
(Source: Olivier Steiger)

dans la figure 8.4. Les bus de terrain sont principalement utilisés au niveau du terrain. Ils servent à la communication entre appareillages de terrain et à la communication avec le contrôleur. D'autres systèmes de bus relient les composants de différents niveaux, par exemple le contrôleur avec le niveau de gestion.

Les systèmes de bus se différencient aussi par leurs champs d'application. Ainsi, les bus BACnet, EnOcean, KNX, LON, Modbus, ZigBee et Z-Wave peuvent être utilisés au-delà des corps de métier. L'utilisation d'autres bus est limitée à des corps de métier précis: DALI et DMX à l'éclairage, SMI aux protections solaires, M-Bus au monitoring technique (p. ex. relevé de compteurs).

	Fonctions d'entrée et de sortie	Fonctions de traitement	Fonctions de gestion	Fonctions de commande
But	Entrées et sorties de valeurs analogiques, d'états binaires, de valeurs de comptage	Commande, régulation, surveillance et optimisation des installations techniques du bâtiment	<ul style="list-style-type: none"> – Communication avec des composants à l'intérieur et à l'extérieur du réseau d'automatisation – Enregistrer et archiver les points de données 	<ul style="list-style-type: none"> – Visualisation des points de données dans le schéma de l'installation – Notifications et alertes
Exemples concrets	<ul style="list-style-type: none"> – Entrée depuis le détecteur de gel via l'entrée analogique ou binaire – Réglage de la vanne de chauffage via la sortie analogique 	<ul style="list-style-type: none"> – Commutation d'un entraînement électrique (commande) – Réglage de la température d'air fourni au moyen d'un régulateur PID (régulation) – Relevé des heures de fonctionnement d'une machine frigorifique (surveillance) – Récupération de l'énergie (chaleur, froid, humidité) contenue dans l'air extrait (optimisation) 	<ul style="list-style-type: none"> – Communication avec une installation de détection d'incendie – Enregistrement (Logging) de points de données 	<ul style="list-style-type: none"> – Visualisation des valeurs de capteurs dans le schéma de l'installation – Notification par sms en cas de défaillances

Tableau 8.1: Fonctions de l'automatisation des installations techniques, selon la norme [EN ISO 16484-3].

	Fonctions de capteur	Fonctions d'actionneur	Fonctions de commande et d'affichage	Fonctions d'application
But	Conversion des grandeurs physiques en informations de sortie qui servent à leur tour d'infos d'entrée pour les fonctions d'application ou d'actionneur	Conversion en grandeurs physiques des informations d'entrée provenant de fonctions de commande ou d'application	Conversion des procédés de commande en informations de sortie qui sont alors disponibles comme informations d'entrée pour les fonctions d'application	Elles expriment la fonctionnalité qui fait l'objet de l'automatisation (pour l'éclairage, la protection solaire, le climat intérieur)
Exemples concrets	<ul style="list-style-type: none"> – Génération d'une information de présence («présent»/«absent») à partir du signal du détecteur de présence – Calcul de la température ambiante à partir du signal d'une sonde de température 	<ul style="list-style-type: none"> – Calcul de la valeur actuelle du variateur et de la commutation de l'éclairage sur la base d'une commande manuelle – Réglage de vannes, de clapets d'air ou de ventilateurs sur la base des informations d'entrée issues de fonctions de commande ou d'application (p. ex. pour la régulation de la température ambiante) 	<ul style="list-style-type: none"> – Conversion de l'activation manuelle de l'interrupteur en une information de sortie – Réglage de la valeur de consigne pour la température ambiante via des molettes, des écrans de commande avec graphiques ou des dispositifs similaires 	<ul style="list-style-type: none"> – Sélection des types d'utilisation (scénarios) – Commutation de l'éclairage sur la base de la présence – Ajustement des lamelles de stores en fonction de la position actuelle du soleil – Réglage du régime des moteurs de ventilateurs selon la différence de temp. entre l'air ambiant et la valeur de consigne

Tableau 8.2: Fonctions de l'automatisation de locaux selon la norme [VDI 3813, feuille 2].

8.4 Mise en œuvre de l'automatisation du bâtiment

La mise en œuvre d'une automatisation du bâtiment dans les règles de l'art s'effectue en cinq phases. L'utilisation prévue et l'exploitation devraient toujours rester prioritaires. Il est par ailleurs expressément recommandé de planifier l'automatisation du bâtiment de manière transversale pour tous les corps de métier concernés et de ne pas la diviser par corps de métier distincts.

– **Phase 1 – exigences:** les exigences (économiques, temporelles, techniques) de l'exploitant de l'installation sont déterminées dans cette phase. Et le cadre réglementaire est défini, sur la base des lois, normes et labels. Cette phase sert à déterminer les besoins, qui sont réunis dans un cahier des charges.

– **Phase 2 – planification du projet:** les concepts sont élaborés pour la commande de locaux et celle des installations, pour la notification et les alertes, pour le monitoring technique, etc. Les concepts servent à définir les fonctionnalités et permettent une première estimation approximative des coûts et des délais.

– **Phase 3 – planification d'exécution:** les composants du SGTB et les fonctions sont choisis, et la typologie de système correspondante est déterminée (structure, communication entre systèmes). Les mesures nécessaires pour la réalisation sont également engagées. [Kranz] propose une analyse approfondie de la planification d'exécution.

– **Phase 4 – réalisation:** les installations sont construites, programmées, configurées, mises en service et livrées au maître d'ouvrage.

– **Phase 5 – exploitation:** les installations sont exploitées et entretenues, en tant que partie du Facility-Management. En outre, une optimisation de l'exploitation peut avoir lieu afin de réduire la consommation et les coûts énergétiques, respectivement pour assurer que les exigences initiales soient remplies.

Les installations techniques du bâtiment devraient être exploitées de sorte que les exigences fixées soient respectées tout en présentant une consommation d'énergie faible. La norme européenne [EN 15232-1] fournit des aides, premièrement pour la planification d'un SGTB qui contribue de manière significative à une bonne efficacité énergétique du bâtiment, et deuxièmement pour une estimation de l'étendue de cette contribution. A cet effet, quatre classes d'efficacité énergétique des SGTB (A, B, C, D) ont été définies, qui sont basées sur la fonctionnalité de l'automatisation du bâtiment.

– La classe D correspond aux SGTB qui sont inefficaces énergétiquement, resp. qui sont inexistantes. Les bâtiments concernés devraient être modernisés; il n'est pas permis de construire de nouveaux bâtiments de cette manière.

– La classe C correspond à des SGTB standards, elle est souvent utilisée comme valeur de référence.

– La classe B correspond aux SGTB élargies et à quelques fonctions GTB spéciales (GTB = gestion technique du bâtiment).

– La classe A correspond aux SGTB et GTB d'une haute efficacité énergétique.

Pour chaque classe, il est possible de déterminer les économies potentielles relatives au besoin énergétique, thermique et électrique – ceci en fonction du type de bâtiment et de son utilisation. La norme indique, à titre d'exemple, qu'une économie d'énergie thermique (chauffage et refroidissement) de 30 % est possible si un SGTB de la classe C atteint suite à une transformation la classe A. L'économie est de 13 % pour l'énergie électrique (éclairage et dispositifs aux.). Pour chaque classe SGTB, la norme détermine en outre quelle variante des différentes fonctions d'automatisation du bâtiment doit être mise en œuvre, ceci d'une part pour les bâtiments non résidentiels et de l'autre pour les bâtiments résidentiels. Les classes correspondent donc à quatre niveaux d'équipement avec des fonctions d'automatisation et de GTB.

8.5 Sources

- [AMEV 135] Empfehlung AMEV Nr. 135. Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung. Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik (AMEV). Berlin, (2017).
- [OFEN 2021] Office fédéral de l'énergie. Consommation énergétique suisse 2000 – 2020 en fonction de l'application. Berne, 2021.
- [DIN 276-1] Norm DIN 276-1. Kosten im Bauwesen – Teil 1: Hochbau. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, 2008.
- [EN 15232-1] Norme EN 15232-1 (SIA 386.111). Performance énergétique des bâtiments – Partie 1: Impact de l'automatisation, de la régulation et de la gestion technique. Comité européen de normalisation. Bruxelles, 2017.
- [EN ISO 16484-2:2016] Norme DIN EN ISO 16484-2 (projet). Systèmes d'automatisation et de gestion technique du bâtiment – Partie 2: Equipement. Institut allemand de normalisation (DIN). Berlin, 2016.
- [EN ISO 16484-2] Norme DIN EN ISO 16484-2. Systèmes de gestion technique du bâtiment (SGTB) – Partie 2: Equipement. Institut allemand de normalisation (DIN). Berlin, 2004.
- [EN ISO 16484-3] Norme DIN EN ISO 16484-3 (norme SIA 386.153). Systèmes de gestion technique du bâtiment (SGTB) – Partie 3: Fonctions. Institut allemand de normalisation (DIN). Berlin, 2005.
- [EUA 2013] Europäische Umweltagentur (EUA). Raumluftqualität. In: Signale 2013. Kopenhagen, 2013.
- [Kranz] Kranz Hans R. BACnet Gebäudeautomation 1.12. CCI Dialog GmbH. Karlsruhe, 2013.
- [Monekosso; et al.] Monekosso Dorothy et al. Ambient Assisted Living. IEEE Computer Society Publications Office. Los Alamitos, 2015.
- [VDI 3813 Blatt 2] Richtlinie VDI 3813, Blatt 2. Gebäudeautomation (GA) – Raumautomationsfunktionen (RA-Funktionen). Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Düsseldorf, 2011.

Photovoltaïque

Christof Bucher

9.1 Exigences générales

Une installation photovoltaïque (installation PV) est une installation électrique qui, comme les autres installations électriques du bâtiment, doit être conforme à l'Ordonnance sur les installations à basse tension [OIBT] et à la norme sur les installations à basse tension [NIBT]. L'installation PV impose toutefois au concepteur et à l'installateur toute une série d'autres exigences qui ne se posent guère ailleurs dans la technique du bâtiment:

- Le générateur PV est souvent bien visible et pose donc des exigences accrues de conception architecturale.
- Le système de montage relie les modules PV à l'enveloppe du bâtiment et doit résister de manière fiable aux forces élémentaires, notamment aux charges de vent et de neige, pendant des décennies. Il ne doit pas entraver la fonction de l'enveloppe du bâtiment, il devrait au contraire même la soutenir.
- Des cellules solaires à onduleur, les câbles transportent du courant continu et, à l'extérieur, ils sont en outre exposés aux intempéries. Il en résulte des exigences accrues en matière de matériaux et d'installation.

9.2 Modules PV

Parmi le grand nombre des technologies connues, ce sont les modules PV aux cellules au silicium cristallin et les modules à couche mince qui sont principalement utilisés dans le domaine du bâtiment. Les premiers atteignent une part de marché supérieure à 80 %.

Le tableau 9.1 liste leurs caractéristiques typiques ainsi que leurs avantages et inconvénients. Dans la pratique, la décision «couche mince ou silicium cristallin» dépend souvent des caractéristiques optiques et mécaniques des produits. Les caractéristiques physiques énumérées au tableau 9.1 jouent alors un rôle mineur.

Watt-crête (W ou Wc)

Dans la branche photovoltaïque, le terme «watt-crête» (puissance de crête) est devenu courant, avec l'unité «Wc» qui est formellement incorrecte. Cette unité désigne la puissance d'un module PV en watts dans des conditions d'essai normalisées (Standard Test Conditions, STC) de 1000 W/m² de rayonnement à une temp. de cellule de 25 °C et un spectre lumineux Air Mass (AM) de 1,5 (valeur standard pour la lumière solaire). Il est toutefois recommandé d'éviter l'unité Wc et d'utiliser p.ex. la notation P_{STC} = 5 kW.

Cellules	Avantages	Inconvénients
Cellules au silicium cristallin	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement élevé - Longue durée de vie - Le silicium est très présent dans l'enveloppe terrestre - Synergies avec l'industrie électronique 	<ul style="list-style-type: none"> - Fabrication complexe des cellules solaires à partir d'un matériau très pur - Les modules doivent être assemblés à partir de cellules individuelles
Cellules à couche mince	<ul style="list-style-type: none"> - Faible consommation de matériaux et d'énergie - Aspect homogène - Processus de production potentiellement très avantageux - Légèrement plus tolérant en ce qui concerne l'ombrage partiel 	<ul style="list-style-type: none"> - En général, rendement inférieur à celui des cellules cristallines - Utilisation partielle de matériaux rares ou délicats (Ga, In, Cd, Te) - Machines de production très spécifiques sur le plan technologique

Tableau 9.1: Comparaison: modules cristallins et modules à couche mince.

L'offre de modules PV est variée comme jamais auparavant. Voici les principaux critères distinctifs des modules PV:

- Verre-film ou verre-verre: à l'opposé des modules standard dotés d'un film Tedlar sur la face arrière, les modules verre-verre sont dotés d'un verre sur la face arrière également. Ils sont par conséquent un peu plus onéreux que les modules verre-film, en revanche ils ont une durée de vie nettement plus longue. De plus, ils sont mieux adaptés pour une utilisation en façade en raison de leur stabilité mécanique supérieure.
- Avec ou sans cadres: les modules sans cadres (le plus souvent des modules verre-verre) sont un peu plus délicats à transporter et à installer. En revanche, ils sont plus beaux et moins problématiques en ce qui concerne le salissement. Pour cette raison, il est préférable que les modules posés avec une inclinaison inférieure à 10° n'aient pas de cadres.
- Aspect visuel: c'est probablement dans ce domaine-là que les choses ont le plus évolué au cours des dernières années et la Suisse y détient un rôle essentiel au niveau international. Il existe des méthodes très variées pour influencer l'esthétique des modules.

Figure 9.1: Les armoiries des cantons produisent de l'électricité – des modules PV cristallins colorés par un procédé d'impression numérique. (Source: Stiftung Umweltarena Schweiz)



Esthétique des modules PV

Divers procédés permettent d'influencer l'aspect des modules PV. Voici quelques exemples:

- Il est possible d'appliquer n'importe quelle image, forme et couleur par impression numérique au dos du verre avant.
- Le dépolissage du verre avant à l'acide donne un aspect mat et chaud au module PV.
- Des couches à réflexion sélective permettent de ne réfléchir de manière ciblée que certaines parts de lumière. Ce procédé induit moins de pertes d'énergie comparé au procédé par impression numérique, en revanche les couleurs sont moins bien contrôlables.
- Des films appliqués sur la face avant influencent l'aspect visuel et haptique du verre.

Figure 9.2: Une installation PV intégrée à la façade, qui se distingue à peine d'une façade normale. (Source: Viridén + Partner AG)

Figure 9.3: Modules PV imprimés en gris, posés en écailles. (Source: Stiftung Umweltarena Schweiz)

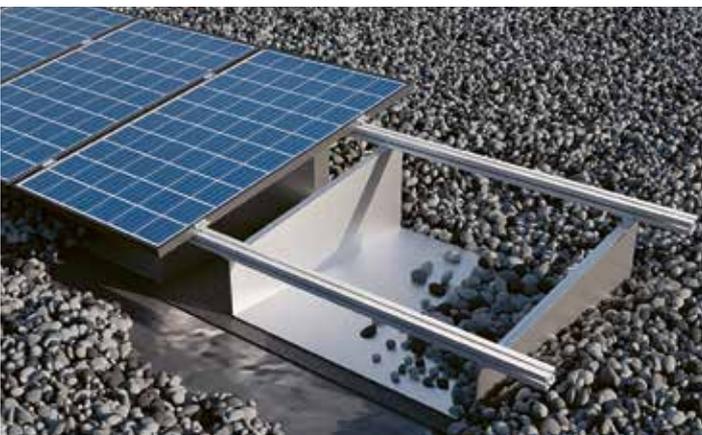


9.3 Systèmes de montage

De nos jours, la plupart des composants PV sont standardisés et optimisés à un point tel que la pose d'une installation est simple, rapide et avantageuse. Ce n'est par contre que partiellement le cas pour le dispositif qui relie le système de montage au toit: s'il est conçu ou posé de manière incorrecte, il comporte le risque d'endommager considérablement l'installation et le bâtiment. Le calcul statique sans faille du système de montage représente un point critique et il devrait être exigé de l'installateur, resp. du fournisseur du système pour chaque projet. Pour les toits plats, les systèmes de montage fixés sur des supports très lourds et sans percement du toit se sont imposés. Pour les toits en pente, on utilise en général une sous-construction constituée de rails profilés simples ou croisés, vissée à la toiture ou rivetée à la couverture. Pour les installations en façade, il existe une grande offre de fixations. A cet égard, le manque d'expérience par rapport à ces systèmes, fabriqués souvent en séries très limitées, représente toujours un défi majeur.

Figure 9.4: Système de montage PV pour toits végétalisés.

Figure 9.5: Système de montage PV pour toits recouverts de gravier.



9.4 Câbles solaires

Une attention particulière doit être accordée aux câbles solaires, car à l'inverse d'autres câbles électriques, ils sont soumis quotidiennement aux influences météorologiques. De plus, ils conduisent du courant continu et ne peuvent souvent être protégés ni par des disjoncteurs ni par des fusibles. C'est pourquoi lors du choix et de l'installation des câbles solaires, les principes suivants sont à respecter:

- Utiliser des câbles à double isolation ayant une résistance élevée aux UV.
- Malgré leur résistance aux UV, les câbles ne doivent pas être exposés au rayonnement solaire direct.
- Il faut veiller à une protection suffisante contre les sollicitations mécaniques – si possible les poser dans des canaux fermés et des tubes en métal mis à terre.

Figure 9.6: Système de montage PV pour toits en pente.



9.5 Connecteurs

Dans le secteur photovoltaïque, les connecteurs DC représentent un problème qui n'est toujours pas résolu. Les fabricants de modules déclarent certains connecteurs comme «compatibles MC4»; ils entendent par là que ces connecteurs sont enfichables dans un autre connecteur sans devoir user de trop de force si ce dernier est également «compatible MC4».

Il est cependant impossible de vérifier lors du montage si ces contacts commencent à corroder peu de temps après, par exemple parce qu'ils sont fabriqués à partir de matériaux incompatibles, constituant ainsi un risque d'incendie aigu. Pour cette raison, seuls les connecteurs du même fabricant doivent être enfichés l'un dans l'autre.

Le danger du courant continu

Alors que le courant alternatif (en anglais Alternating Current, AC) présente cent fois par seconde un passage par zéro, le courant continu (en anglais Direct Current, DC) circule toujours dans la même direction sans passage par zéro. Par conséquent, un arc électrique dû à un mauvais contact s'éteint 100 fois par seconde avec du courant alternatif avant de disparaître complètement au bout de peu de temps, tandis qu'avec du courant continu, il peut persister même si la distance entre les contacts défaits est importante. C'est pourquoi un faux contact en courant continu entraîne plus rapidement des dommages qu'en courant alternatif. Toutefois, une installation de haute qualité permet de réduire considérablement ce risque.

Figure 9.8: Cinq marques différentes de connecteurs de modules PV. Ils ne sont pas compatibles entre eux, même s'ils sont enfichables.



9.6 Coffrets de raccordement

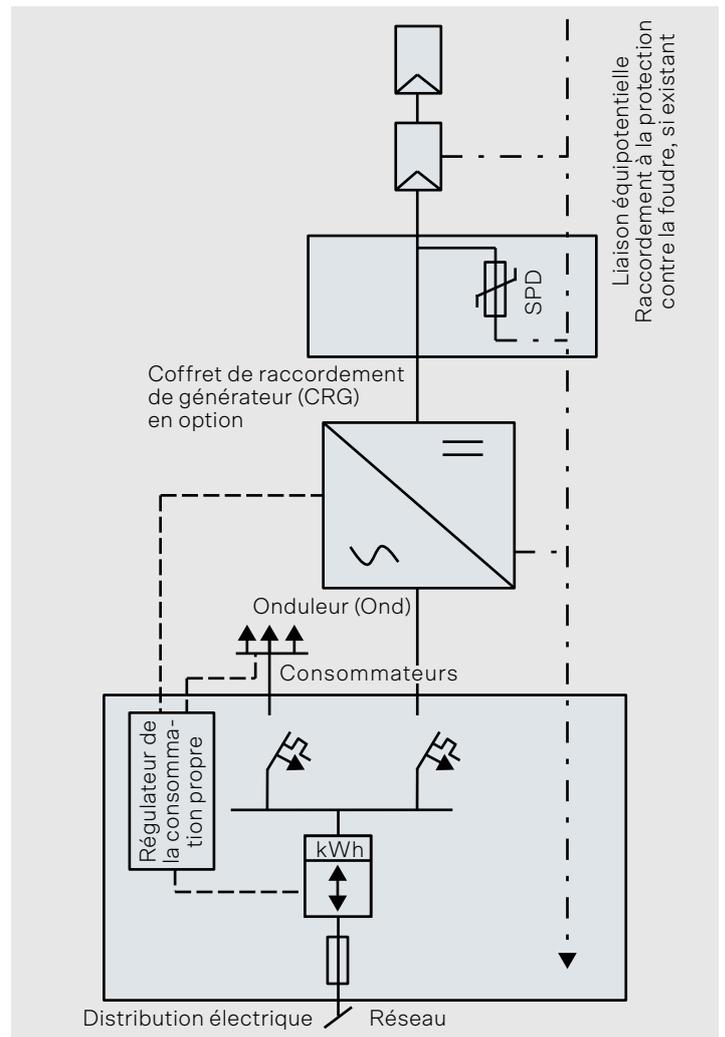
Dans le coffret de raccordement de générateur (CRG) les câbles de chaîne sont rassemblés et branchés en parallèle sur la ligne principale de courant continu.

Les éléments de protection et de commutation suivants sont en général intégrés dans le coffret:

- Fusibles de chaînes
- Déviateur de surtension (SPD)
- Séparateur de puissance DC
- Dispositif de surveillance

Pour les installations avec des onduleurs de chaîne ou de multi-chaînes, on renonce en principe au CRG. Les câbles de chaîne sont dans ce cas directement raccordés à l'onduleur, qui ne rassemble alors pas seulement les câbles, mais doit aussi assurer la protection et la commutation du coffret de raccordement.

Figure 9.7: Schéma électrique général d'une installation PV avec régulateur de consommation propre. (Source: Basler & Hofmann AG)



9.7 Onduleurs

L'onduleur a deux fonctions principales: il convertit le courant continu des modules photovoltaïques en courant alternatif conforme au réseau et il assure le point de fonctionnement optimal des modules. En outre, il ne devrait pas impacter négativement la qualité du réseau, ce qui implique toute une série d'exigences particulières.

Les onduleurs modernes sont multi-tâches et offrent souvent bien davantage que ce qu'exigent les prescriptions actuelles. C'est impératif, car les directives relatives au raccordement des installations PV sont adaptées en continu, ce qui ne devrait pourtant pas forcer à remplacer l'onduleur.

Les onduleurs sont proposés dans des classes de puissance allant de quelques centaines de watts à nettement plus d'un mégawatt. Ce n'est pas toujours la taille d'une installation PV qui détermine la taille de l'onduleur. Même de grandes installations photovoltaïques fonctionnent souvent avec un nombre élevé de petits onduleurs. C'est en fin de compte une question philosophique que de savoir quel est le concept d'onduleur le plus efficace: de nombreux onduleurs de petite taille ont un taux de défaillance plus élevé qu'un seul onduleur de taille importante, en revanche la perte de rendement est plus petite en cas de panne et l'installateur peut lui-même remplacer l'appareil. Dans les bâtiments, il est souvent plus simple d'installer plusieurs petits onduleurs au lieu d'un grand onduleur, cela aussi pour des raisons logistiques.

Dimensionnement de l'onduleur

De nos jours, quasiment tous les modules PV sont compatibles avec tous les onduleurs. Il faut tout de même respecter les points suivants:

- La tension de chaîne maximale ne doit pas dépasser la tension d'entrée maximale admissible de l'onduleur.
- L'intensité maximale de toutes les chaînes ne doit pas dépasser l'intensité d'entrée maximale admissible de l'onduleur.

- Certains modules doivent être mis à terre. L'onduleur doit alors être doté d'une séparation galvanique côté courant continu et courant alternatif (transformateur).
- La puissance du module PV et celle de l'onduleur doivent être adaptées l'une à l'autre.

Le dernier point reste controversé: étant donné que la puissance nominale des modules PV n'est que rarement, voire jamais atteinte si leur orientation est mauvaise, l'onduleur peut être dimensionné plus petit que les modules PV. Mais de combien?

La figure 9.11 montre les pertes de rendement en fonction de la taille de l'onduleur pour une installation réalisée à Zurich. Plus l'onduleur est petit, plus les coûts de l'onduleur et du raccordement au réseau sont bas. Ces économies doivent être comparées aux pertes de rendement attendues, afin d'en déduire la dimension optimale de l'onduleur. Malgré des modules PV toujours moins chers, on peut admettre des pertes de rendement comprises entre 1 à 2% environ. C'est le cas à 70% de la puissance de l'onduleur pour une installation orientée de manière optimale vers le sud et située sur le Plateau suisse. Pour une installation posée à l'horizontale, il ne faut en revanche que 60% de la puissance de l'onduleur pour injecter 99% de l'énergie solaire dans le réseau.

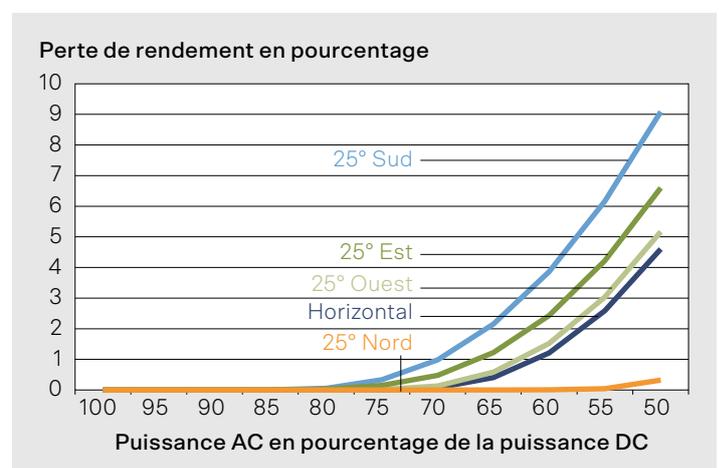


Figure 9.9:
Onduleur de Fronius,
3 kW. (Source:
Fronius Schweiz AG)



Figure 9.10:
Onduleur de ABB,
20 kW. (Source:
ABB)

Figure 9.11: Perte de rendement en fonction du dimensionnement de l'onduleur pour une installation PV à Zurich. (Source: Basler & Hofmann AG)



9.8 Dispositifs de protection et fusibles

Plusieurs dispositifs de protection et fusibles doivent faire partie intégrante d'une installation PV. Voici les plus importants:

- Protection contre la foudre: une installation PV n'est soumise à aucune obligation de protection contre la foudre. La nécessité pour un bâtiment de disposer d'une telle protection ne dépend pas de la présence ou non d'une installation PV, mais est déterminée par les assurances incendie. Les directives relatives à la mise en œuvre figurent dans les principes directeurs de l'Association pour l'électrotechnique, les technologies de l'énergie et de l'information [AES].
- Déviateurs de surtension: les déviateurs de surtension réduisent le risque qu'une tension induite par la foudre endommage les installations électriques. Si le bâtiment est équipé d'un système de protection extérieur contre la foudre, les déviateurs de surtension sont posés idéalement au droit de l'entrée du câblage de l'installation PV dans le bâtiment. Dans ce cas, un SPD de type 1 est à prévoir. Seul le type 1 est en mesure de dévier le courant si l'installation est frappée directement par la foudre. En l'absence de protection contre la foudre, un SPD de type 2 suffit; il est à poser aussi près que possible de l'appareil à protéger. Si la longueur des conduites est inférieure à 30 m, il est même possible de se passer complètement d'un déviateur de surtension. Cette longueur est ramenée à 20 m dans le sud de la Suisse en raison de la plus grande probabilité d'orages.
- Fusibles: côté courant alternatif, on recourt aux mêmes fusibles que pour les installations électriques conventionnelles. Côté courant continu, des fusibles DC empêchent qu'en cas de court-circuit sur un circuit parallèle, plusieurs chaînes intactes n'injectent du courant sur cette chaîne court-circuitée. On ne peut se prémunir contre le risque d'un court-circuit dans une chaîne iso-

lée, qui n'est pas connectée en parallèle avec d'autres chaînes, car l'intensité de court-circuit correspond approximativement à l'intensité normale de fonctionnement. Pour cette raison, les petites installations PV ne nécessitent la plupart du temps pas de fusibles DC.

- Disjoncteur à courant de défaut (disjoncteur FI): il sépare l'installation PV du réseau si p. ex. du courant passe dans la terre en raison d'un défaut d'isolation. Pour les installations PV sans séparation galvanique du réseau, en d'autres termes celles avec des onduleurs sans transformateur, une surveillance du courant de défaut est prescrite. Celle-ci est souvent intégrée d'office dans l'onduleur. Un disjoncteur FI supplémentaire est nécessaire si le câble de courant alternatif allant à l'onduleur passe par des locaux comportant un risque d'incendie. C'est potentiellement le cas s'ils traversent l'étable d'une ferme.

9.9 Dispositifs de sectionnement et de commutation

Côté courant alternatif, les dispositifs de sectionnement et de commutation utilisés sont les mêmes que ceux utilisés pour les installations électriques traditionnelles. Du côté courant continu, il faut recourir à des interrupteurs adaptés au courant continu.

Sur la base de la recommandation [RR/IPE 2020] de l'AES, certains gestionnaires de réseau exigent un interrupteur de sectionnement séparé en guise de protection des réseaux électriques et des installations PV (protection RI). Celui-ci surveille le réseau électrique et sépare l'installation du réseau si la tension ou la fréquence ne se trouvent plus dans la plage admise. Etant donné que cette fonctionnalité fait d'office partie intégrante de l'onduleur, le recours en sus à une protection RI est controversé. Plusieurs normes internationales postulent que la fonction de protection intégrée à l'onduleur est suffisante comme protection RI.

9.10 Dispositifs de mesure

Voici les trois dispositifs de mesure traditionnellement utilisés pour les installations PV (figure 2.12):

- Mesure du courant excédentaire: seul le courant solaire excédentaire est relevé et injecté dans le réseau. Il s'agit du système de mesure le moins coûteux, car aucun compteur supplémentaire n'est nécessaire pour l'installation PV. Cependant, la tendance qui vise plus de transparence dans le domaine de la production d'électricité a pour effet que la mesure du courant excédentaire n'est pas toujours acceptée; pour les installations supérieures à 30 kVA, une mesure du courant produit est exigée en sus.
- Mesure du courant injecté: c'était le dispositif de mesure préféré pendant la période où des rétributions élevées étaient accordées pour l'injection. Il permet de mesurer la production de courant et de vendre le courant. Etant donné que l'injection dans le réseau public n'est aujourd'hui plus rentable, ce dispositif de mesure est moins souvent utilisé.
- La mesure sérielle: ce dispositif de mesure était utilisé auparavant surtout à l'intérieur de réseaux de faible envergure, dans les cas où le courant solaire devait

être vendu, mais où le raccordement de l'installation PV au point d'injection aurait représenté une dépense disproportionnée. Actuellement, la mesure sérielle est souvent utilisée dans le contexte d'installations à consommation propre qui en raison de leur puissance élevée nécessitent un relevé séparé du courant produit.

Les gestionnaires de réseaux utilisent de plus en plus fréquemment des compteurs de courant intelligents (smart meter). En d'autres termes, chaque installation PV et chaque site de consommation est équipé d'un appareil de mesure distinct et relativement avantageux.

Il est alors souvent possible de choisir la mesure du courant injecté comme dispositif de mesure. Toutefois, cela ne signifie pas que tout le courant est injecté et que la consommation propre n'est pas possible. Les valeurs mesurées par les smart meter peuvent être combinées entre elles sans restriction. Si dans un bâtiment, on souhaite attribuer le courant solaire à un autre consommateur, il suffit de procéder à une reconfiguration du système de relevé auprès du gestionnaire de réseau, sans aucune intervention sur place.

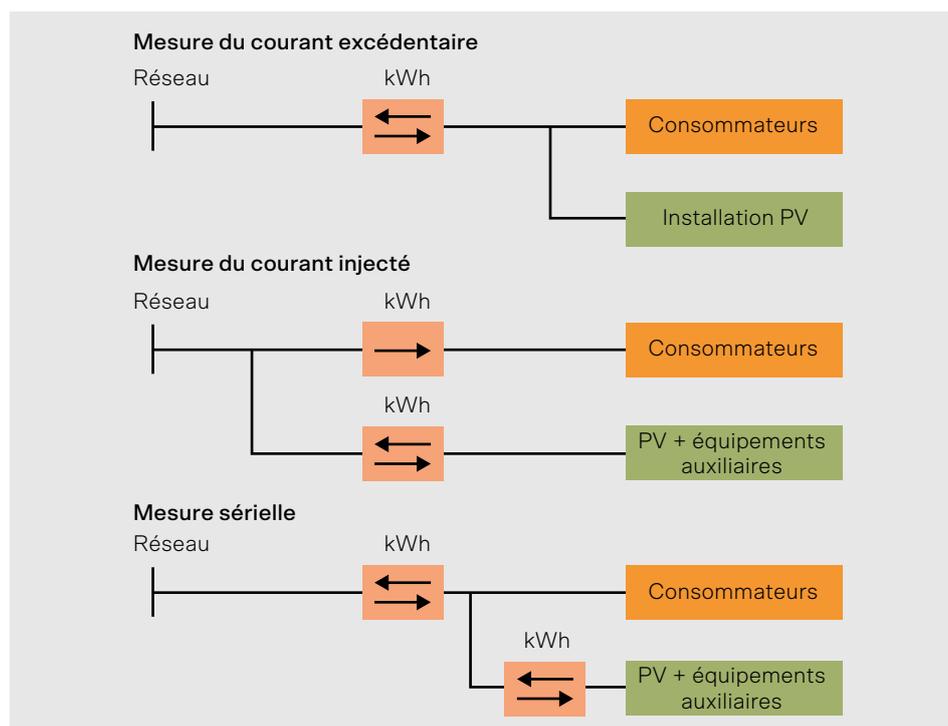


Figure 9.12: Schémas de dispositifs de mesure du courant produit au droit des installations PV.

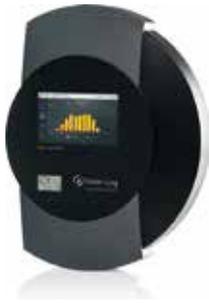


Figure 9.13:
Système de surveillance SolarLog indépendant de l'onduleur. (Source: Solare Datensysteme GmbH)

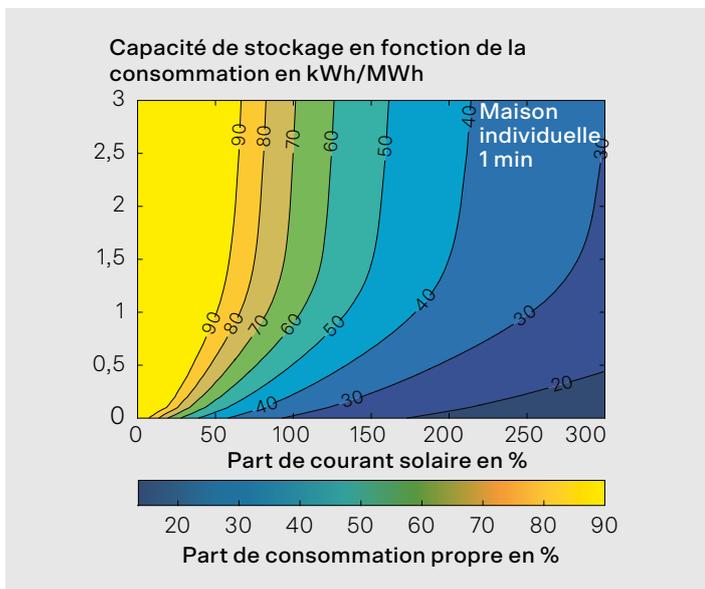
9.11 Systèmes de communication

Un système de communication fait aujourd'hui partie des standards d'une installation PV, on y renonce seulement parfois pour les petites installations. En général, le système de communication prend en charge les fonctions suivantes:

- Interface bidirectionnelle entre l'installation PV et l'exploitant
- Envoi quotidien des données de production de l'installation par e-mail
- Avertissement en cas de défaillance par e-mail ou SMS

A cet effet, le système est connecté à Internet au moyen d'un raccordement à large bande ou de la téléphonie mobile. En général, les fabricants d'onduleurs fournissent avec leurs appareils un système de communication adapté. Celui-ci permet certes la commande et la surveillance optimales de l'installation, en revanche la compatibilité avec d'autres onduleurs n'est pas donnée. Pour surveiller plusieurs installations PV, mieux vaut choisir un système de communication indépendant des installations.

Figure 9.14:
Part de consommation propre en fonction du rapport entre la capacité de stockage installée et la consommation électrique annuelle pour une maison individuelle.



9.12 Accumulateurs (batteries)

Il est assez controversé de considérer un accumulateur comme partie intégrante d'une installation PV. C'est un fait: bien qu'en Suisse les accumulateurs ne soient pas subventionnés et ne puissent pas être déduits des impôts jusqu'à présent, une installation PV sur quatre environ est de nos jours équipée d'un système de stockage. Actuellement, cet investissement n'est en général pas rentable. La décision en faveur d'un accumulateur est au contraire fortement influencée par le fait de pouvoir utiliser soi-même le maximum du courant solaire propre et par la valeur émotionnelle que cela représente. Les batteries sont également controversées pour des raisons écologiques: étant donné qu'elles ne font que stocker le courant, mais qu'elles ne le produisent pas, elles ont intrinsèquement un impact environnemental négatif. En revanche, pouvoir injecter davantage d'énergie renouvelable dans le réseau grâce aux batteries constitue un facteur positif. Actuellement, la Suisse n'a pas encore besoin d'accumulateurs pour intégrer le courant solaire dans le réseau. Cette donne pourrait par contre rapidement changer à l'avenir. Les accumulateurs pourraient jouer un rôle d'importance systémique lorsque des mesures telles que la flexibilisation des consommateurs et celles des centrales conventionnelles seront épuisées. Il est probable que l'augmentation rapide de l'électromobilité génère une capacité de stockage dix fois supérieure à celle nécessaire dans le bâtiment. En conséquence, lorsque la charge bidirectionnelle des voitures électriques sera possible, le stockage pour logements devrait s'avérer superflu à l'avenir. Le dimensionnement des accumulateurs dépend de leur utilisation. Afin d'optimiser la consommation propre, une capacité de stockage d'une à deux heures par kW de puissance DC de l'installation est judicieuse; ou alors le besoin d'une demi-journée des consommateurs qui doivent être alimentés par la batterie. La figure 9.14 montre de quelle manière la

part de consommation propre change en fonction de la puissance de l'installation PV et de la capacité de la batterie.

9.13 Régulateurs de la consommation propre

Avant de réfléchir à l'acquisition d'une batterie, il est judicieux de vérifier les optimisations possibles côté consommateurs. Notamment l'eau chaude sanitaire, le chauffage (PAC) ainsi que la mobilité électrique représentent un potentiel très élevé et en partie financièrement assez intéressant pour augmenter la consommation propre du courant solaire. Les régulateurs pour l'optimisation de la consommation propre peuvent être répartis dans les catégories suivantes:

- Systèmes commandés par l'onduleur: sans coûter vraiment plus cher, de nombreux onduleurs permettent actuellement d'activer ou de désactiver des consommateurs. A ce titre, une fonction très souvent utilisée consiste à forcer le signal de commande centralisée pour déverrouiller un accumulateur d'eau chaude (thermodynamique).
- Régulateurs de la consommation propre: des régulateurs disponibles à partir de quelques centaines de francs comparent la production photovoltaïque avec la consommation électrique et influencent en conséquence les consommateurs dans le bâtiment. Ce type de régulateur fait en général partie intégrante des bornes de recharge pour véhicules électriques.

Figure 9.15:
Régulateur de la consommation propre Smartfox.
(Source: DAfi GmbH)



- Systèmes d'automatisation du bâtiment: ces systèmes sont beaucoup plus onéreux, ils automatisent le bâtiment et optimisent en même temps la consommation propre. Ils sont cependant acquis en premier lieu pour augmenter le confort dans le bâtiment – ce n'est qu'accessoirement qu'ils optimisent la consommation propre.

9.14 Rendement énergétique d'une installation PV

Un assez petit nombre d'informations permet déjà d'estimer le rendement énergétique annuel d'une installation PV d'une manière étonnamment précise. Le «rendement annuel idéal» $E_{idéal}$ se calcule au moyen de la formule suivante:

$$E_{idéal} \text{ (kWh)} = \frac{P \text{ (kW)}}{1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} \cdot H \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right)$$

P étant la puissance de l'installation en kW, valable dans les conditions STC (à savoir = 1 kW/m² d'intensité de rayonnement), et G étant la somme annuelle du rayonnement global en kWh/m².

En réalité, la production annuelle de l'installation $E_{réel}$ effectivement injectée dans le réseau électrique s'avère généralement plus faible. Cela est dû à toute une série de déperditions, telles que le rendement de l'onduleur, les pertes ohmiques dans les câbles, l'efficacité réduite des modules PV en raison de températures de cellules élevées ou d'un faible rayonnement global. Le rapport entre la production énergétique réelle et idéale est appelé «Performance Ratio» (PR):

$$\frac{E_{réel}}{E_{idéal}} = PR$$

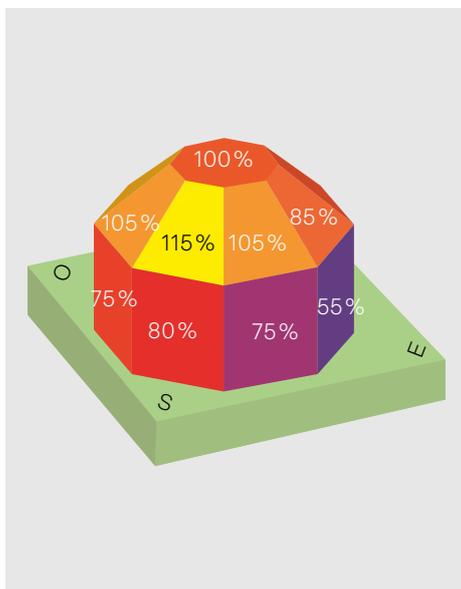
L'expérience montre que l'écrasante majorité des installations PV atteignent un PR de 75 à 85 % (0,75 à 0,85) sur l'année. Ainsi, si l'on ne connaît que la puissance, le site ainsi que l'orientation et l'inclinaison d'une installation planifiée, on peut prédire de façon relativement

précise son rendement, en utilisant un PR estimé à 80 % (0,8):

$$E_{réel} = PR \cdot E_{idéal}$$

Des programmes de simulation permettent d'estimer encore plus précisément la production énergétique. Toutefois, une précision supérieure du calcul est à double tranchant: les grandes inconnues sont entre autres la somme du rayonnement global réel, l'encrassement des modules PV et leur comportement par rapport à la température et en cas de faible éclairage. Ces influences pèsent nettement davantage sur le résultat que les approximations d'une méthode de calcul simplifiée. En règle générale, on peut donc renoncer à une simulation précise de la production pour les installations PV sans ombrage partiel important. Sur le Plateau suisse, une installation PV orientée vers le sud, avec un angle d'inclinaison de 30 à 45° environ, atteint les meilleurs rendements. Mais même des écarts relativement grands par rapport à cette orientation optimale n'ont pas pour effet de réduire significativement le rendement énergétique. Ainsi, sur un toit plat où les modules sont posés à l'horizontale, on atteint encore 90% environ du rendement énergétique maximal, du moins dans des régions peu enneigées (figure 9.16).

Figure 9.16: Rendement énergétique relatif d'installations PV sur des surfaces avec différentes orientations, en pourcentage. La base (100%) est le rayonnement sur la surface horizontale selon [SIA 2028]. (Source: Swissolar)

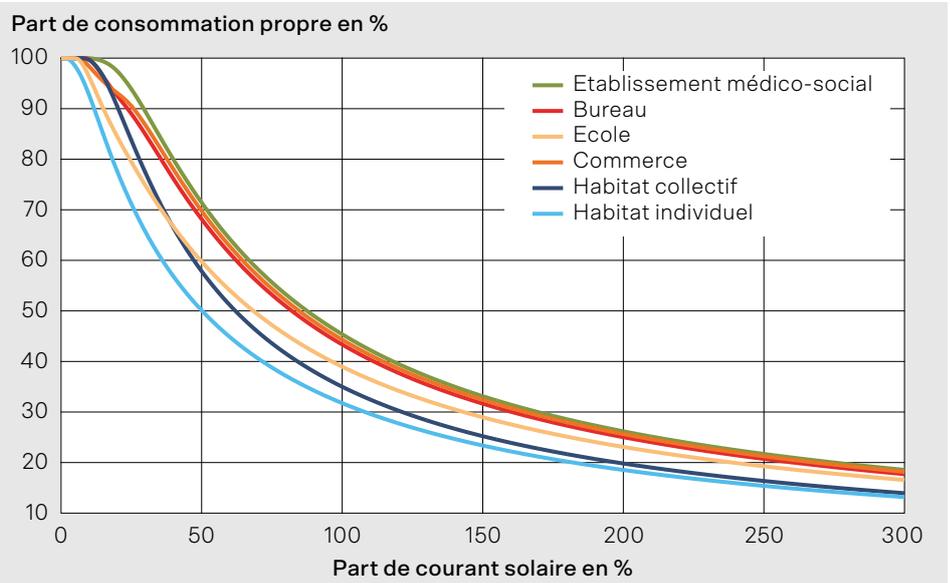


9.15 Consommation propre

D'une part, les conditions cadres actuelles ont comme effet que le prix de revient du courant solaire est en général plus bas que celui du courant traditionnel. De l'autre, les tarifs de rachat du courant solaire injecté dans le réseau sont souvent plus bas que le prix de revient de celui-ci. Par conséquent, le courant solaire autoconsommé est rentable, en revanche le courant solaire injecté est vendu à perte. La part de consommation propre, donc la part de courant solaire qui est consommé simultanément à la production ou stocké sur place dépend notamment des conditions cadres suivantes:

- Puissance de l'installation PV: plus l'installation est petite, plus la consommation propre est élevée.
- Consommation électrique: plus la consommation électrique est élevée dans le bâtiment, plus la consommation propre est élevée.
- Profil de consommation: plus la part du courant consommé pendant la journée est élevée, plus la consommation propre est élevée. Les logements ont une part relativement faible de consommation propre, tandis que les centres de soins et les bureaux ont une part élevée de consommation propre. Les écoles représentent un cas spécial: d'une part elles se caractérisent par une utilisation

Figure 9.17: Parts de consommation propre de différents profils d'utilisation.



diurne prononcée, de l'autre, les fins de semaine et les vacances d'été font qu'une part de consommation propre de 100% n'est guère atteignable, même par des installations PV très petites (figure 9.17).

- Optimisation: décaler les charges permet d'augmenter la consommation propre.
- Stockage par batterie: les accumulateurs permettent généralement de doubler la consommation propre.

Depuis 2018, plusieurs consommateurs de courant ont la possibilité de se regrouper pour former un seul consommateur final pour autant qu'ils disposent d'une installation PV d'une puissance de production de 10% au moins de la puissance de raccordement du regroupement. Celui-ci est appelé «regroupement dans le cadre de la consommation propre» (RCP). Cette règle présumée simple et les dispositions associées entraînent toute une série de conséquences. En voici quelques-unes:

Qu'est-ce que la consommation propre?

Selon l'article 16 de la Loi sur l'énergie [LEne], l'énergie autoproduite qui est consommée «sur le lieu de production» est une consommation propre.

L'article 14 de l'Ordonnance sur l'énergie [OEne] est un peu plus explicite: l'électricité est considérée comme consommée sur le lieu de production lorsqu'elle «n'a pas utilisé le réseau du gestionnaire de réseau».

Dans la pratique, cela n'est pas encore clair non plus. Ainsi en Suisse, les mesures sont effectuées par phases, ce qui signifie que si de l'électricité est injectée sur une phase et prélevée simultanément sur l'autre, cela est malgré tout considéré comme une consommation propre.

En revanche, si, au cours d'un intervalle de mesure de 15 minutes, du courant est d'abord prélevé pendant cinq minutes, puis injecté pendant cinq autres minutes, il ne s'agit pas de consommation propre.

- Etant donné que les partenaires d'un RCP sont considérés comme un seul consommateur final, ils sont autorisés à faire eux-mêmes les relevés et les décomptes de courant à l'intérieur du RCP. Cependant, les exigences légales relatives aux relevés et aux décomptes sont distinctes et en partie très contraignantes.

- Si le RCP affiche une consommation annuelle totale d'électricité supérieure à 100 000 kWh, il est autorisé à acheter du courant sur le marché libre de l'électricité.

- Afin de protéger les locataires de coûts d'électricité potentiellement plus élevés, l'ordonnance sur l'énergie inter-fère lourdement dans la fixation des prix du courant solaire autoconsommé.

La consommation propre est généralement rentable, malgré ces directives et certains impondérables. Les ventes et les marges sont néanmoins souvent peu importantes et nécessitent des structures simples pour la gestion d'un RPC. Des informations complémentaires figurent dans le «Guide pratique de la consommation propre» de Swissolar [Swissolar].

9.16 Sources

- [LEne] Loi sur l'énergie du 30 septembre 2016. www.admin.ch
- [OEne] Ordonnance sur l'énergie (OEne) du 1^{er} novembre 2017.
www.admin.ch
- [NA/EEA 2020] Recommandation de la branche AES – Raccordement au réseau pour les installations productrices d'énergie sur le réseau basse tension. Association des entreprises électriques suisses (AES). Aarau, 2020.
- [NIBT] Norme sur les installations à basse tension, SN 411000.
- [OIBT] Ordonnance sur les installations électriques à basse tension, Ordonnance sur les installations à basse tension (OIBT) du 7 novembre 2001. www.admin.ch
- [AES] Electrosuisse: Principes directeurs de l'Association suisse pour l'électrotechnique, les technologies de l'énergie et de l'information (AES), systèmes anti-foudre, 4022. Fehraltorf, 2008.
- [SIA 2028] Cahier technique SIA 2028 – Données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et les installations du bâtiment. Société suisse des Ingénieurs et des Architectes (SIA). Zurich, 2008.
- [Swissolar] Swissolar: Guide pratique de la consommation propre. Zurich, 2021. www.swissolar.ch

Annexe

10.1 Auteurs

Reto von Euw, Prof. ing. CVC dipl. HES, technicien en installations sanitaires dipl. TS; chargé de cours en techniques du bâtiment à l'Institut des techniques du bâtiment et de l'énergie de la HES de Lucerne – Technique & arch. Président de la Commission SIA 385, membre de la Commission SIA des normes relatives aux installations du bâtiment et à l'énergie (kge).

Zoran Alimpic, Prof. Dr ing. CVC dipl. HES, MBA; conseiller en énergie avec diplôme fédéral; chargé de cours à temps plein à l'Institut des techniques du bâtiment et de l'énergie ainsi qu'au Centre de technique intégrale du bâtiment (ZIG) de la HES de Lucerne – Technique & arch.

Heinrich Huber a été professeur en technique du bâtiment à la HES du Nord-Ouest de la Suisse et à la HES de Lucerne de 2011 à 2022. Il s'est spécialisé dans la ventilation des habitations et fait partie à ce titre des principaux experts en Suisse. Heinrich Huber a rédigé à ce propos plusieurs ouvrages spécialisés et de nombreux articles spécialisés, dirigé des projets de recherche et donné des conférences. Il a contribué au développement des systèmes de normes suisses et internationales.

Christof Bucher, Prof. Dr sc. ETH Zurich; chargé de cours, directeur du laboratoire pour des systèmes photovoltaïques au sein de la Haute école spécialisée bernoise – Technique et informatique. Directeur et chargé de cours CAS photovoltaïque à la HES de Lucerne. Président des Comités de normalisation CES/IEC TC 8 et 82. Membre de la Commission d'experts «Technique photovoltaïque» de Swissolar.

René Mosbacher, chimiste HES, journaliste spécialisé et lecteur, travaille à la société Faktor Journalisten AG et aux Editions Faktor. Ses sujets de prédilection sont

la technique du bâtiment, l'énergie et la durabilité dans le domaine du bâtiment.

Marvin King, ing. dipl. architecte SIA, économiste de la construction AEC; collaborateur scientifique senior au sein de la HES de Lucerne – Technique & arch. Directeur de divers projets de recherche portant sur la construction et l'assainissement durables et axés sur une considération globale du cycle de vie des bâtiments et des éléments de construction.

Jürg Nipkow, ingénieur en électricité dipl. ETH/ SIA; ARENA groupe de travail Alternatives énergétiques, Zurich. Il a œuvré pendant de nombreuses années comme expert dans le domaine de l'efficacité énergétique, ancien membre de la Commission SIA 2056 «Electricité dans les bâtiments».

Björn Schrader, Prof. ingénieur en électricité dipl. TU; chargé de cours, directeur de la plateforme thématique Licht@hslu au sein de la HES de Lucerne – Technique & arch. Membre de l'«Expert Board» à Electro-suisse, propriétaire du bureau de conseil Lichtkollektiv, à Zurich.

Gianrico Settembrini, architecte dipl. ETH/ SIA, MAS EN Bau; collaborateur scientifique senior et chef du groupe de recherche Construction et rénovation durables à l'Institut des techniques du bâtiment et de l'énergie à la HES de Lucerne – Technique & arch.

Olivier Steiger, Prof. Dr ingénieur en électricité dipl. ETH; chargé de cours et directeur de groupes de recherche à l'Institut des techniques du bâtiment et de l'énergie de la HES de Lucerne – Technique & arch. Ses domaines de compétences sont l'automatisation du bâtiment et le IoT.

10.2 Abréviations

AAL	Ambient Assisted Living, également Active Assisted Living: systèmes d'assistance pour personnes âgées	Dép	Côté départ (côté aller)
AC	Alternating Current, courant alternatif	Depletion	Potential
AE	Accumulateur d'énergie	Dét	Détendeur, aussi: réducteur de pression
AEAI	Association des établissements cantonaux d'assurance incendie	Disjoncteur FI	Disjoncteur à courant de défaut
AEC	Accumulateur d'eau chaude	DMX	Digital Multiplex, protocole pour la commande numérique de l'éclairage dans l'automatisation du bâtiment
AEE	Agence européenne pour l'environnement	EATR	Exhaust Air Transfer Ratio, rapport de transfert d'air repris
AMEV	Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik, Deutschland	EC	Electronically Commutated, moteurs électriques à commutation électronique, aussi: moteurs sans balais
BACnet	Building Automation and Control	EC	Eau chaude (eau chaude sanitaire – côté aller)
BIM	Building Information Modeling, modélisation des données du bâtiment	EchC	Echangeur de chaleur
CC	Circuit de chauffage	ECTA	Système d'éléments de construction thermoactifs
CC	Consommateur de chaleur	EEl	Energy Efficiency Index
CCF	Clapet coupe-feu	EER	Energy Efficiency Ratio, indice de performance, souvent utilisée à la place du COP pour les machines frigorifiques
CCF	Couplage chaleur-force	EF	Eau froide
CCT	Correlated Color Temperature, température de couleur	Em	Emission de chaleur
CEA	Chauffe-eau à accumulation	EnOcean	Standard pour le contrôle et la commande des installations techniques du bâtiment, indépendant des fabricants, sans fil et capable de fonctionner sans pile, basé sur la technologie radio
CEC	Circulation d'eau chaude	ESEER	European Seasonal Energy Efficiency Ratio, indice de performance qui tient compte des conditions-cadres saisonnières en Europe
CIE	Commission internationale de l'éclairage	FUGén	Fraction utile du générateur de chaleur
Circ	Circulation (eau chaude sanitaire – côté retour)	FUS	Fraction utile du système
COP	Coefficient de performance pour pompes à chaleur, en anglais: Coefficient of Performance	Gén	Générateur de chaleur, dans le chauffage
COPA	Coefficient de performance annuel, pour les pompes à chaleur	Gén	Production d'eau chaude, dans l'alimentation en eau chaude sanitaire
CRG	Coffret de raccordement de générateur, pour les installations PV	GES	Gaz à effet de serre
CRI	Indice de rendu de couleur, en anglais: Colour Rendering Index (aussi → Ra)	GESg	Emissions de gaz à effet de serre
CVC	Abréviation, dans la technique du bâtiment, désignant le chauffage, la ventilation et la climatisation	GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, en anglais: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
DALI	Digital Addressable Lighting Interface, protocole pour les installations d'éclairage dans l'automatisation du bâtiment	GSP	Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur
DAR	Dispositif anti-retour	GTB	Gestion technique du bâtiment
DC	Direct Current, courant continu	GWP	Potentiel de réchauffement, en anglais: Global Warming Potential
DDC-STGB	Automatisation du bâtiment «Direct-Digital-Control», système d'automatisation (des installations)		
DEC	Desiccative and Evaporative Cooling, refroidissement par séchage et évaporation		

HR	Humidité relative de l'air	ORaP	Ordonnance fédérale sur la radioprotection
Indice PPD	Predicted percentage of dissatisfied, indice pour décrire la part présumée des personnes insatisfaites du confort ambiant	ORRChim	Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques
INT	Air intérieur, dans la ventilation	OSAV	Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires
Inv	Inverseur	P2P	Voir sous PtP
IoT	Internet of Things, Internet des objets	PAC	Pompe à chaleur
IV	Vitrage isolant	PE	Polyéthylène
KNX	Bus Konnex, dans l'automatisation du bâtiment	PEne	Energie grise
LED	Diode électroluminescente	PIR	Capteurs pyroélectriques
LON	Local Operating Network, bus de terrain dans l'automatisation du bâtiment	PR	Performance Ratio, rapport entre la production énergétique réelle et idéale d'une installation PV
LVK	Courbe de répartition lumineuse	Préch	Préchauffage, accumulateur de préchauffage
M-Bus	Abréviation pour Meter-Bus, norme technique pour le monitoring de la consommation énergétique dans l'automatisation du bâtiment	Protection RI	Protection des réseaux électriques et des installations, pour les installations PV
MF	Machine frigorifique	PtP	Point to Point, liaisons point à point, respectivement connexions directes, dans l'automatisation du bâtiment
Modbus	Bus de terrain dans l'automatisation du bâtiment	PV	Photovoltaïque
MoPEC	Modèle de prescriptions des cantons dans le domaine énergétique	PWM	Modulation de largeur d'impulsion, p. ex. pour la régulation de la puissance des appareils électriques
MP-Bus	Abréviation pour «Multi Point Bus», bus multipoint, norme technique pour la commande des installations CVC	QAI	Qualité de l'air intérieur, en anglais: Indoor Environment Quality (IEQ)
MPP	Maximum Power Point, point de fonctionnement optimal d'un module PV	Ra	Indice de rendu de couleur (aussi → CRI)
NIBT	Norme sur les installations à basse tension	RC	Récupération de chaleur
OACF	Outdoor Air Correction Factor, facteur de correction d'air neuf	RCP	Regroupement dans le cadre de la consommation propre, pour les installations PV
ODD	Objectifs de développement durable selon l'agenda 2030 de l'ONU (en anglais: Sustainable Development Goals, SDG)	Réch	Réchauffage
ODP	Potentiel de destruction de l'ozone, en anglais: Ozon	Ret	Côté retour, dans le chauffage, le refroidissement, l'eau chaude
OéE	Optimisation énergétique de l'exploitation	RLT	Technique aéraulique
OEEE	Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique	RR	Refroidisseur de retour
OFEN	Office fédéral de l'énergie	SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition, contrôle, commande et relevé de données dans l'automatisation du bâtiment
OFEV	Office fédéral de l'environnement	Seco	Secrétariat d'Etat à l'économie
OFSP	Office fédéral de la santé publique	SFP	Specific Fan Power, puissance spécifique du ventilateur
OIBT	Ordonnance sur les installations à basse tension	SIA	Société suisse des Ingénieurs et des Architectes
OPB	Ordonnance sur la protection contre le bruit	SICC	Auparavant «Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation», actuellement «Société suisse des ingénieurs en technique du bâtiment»
OPD	Organe de régulation à passage droit		

SMI	Standard Motor Interface, interface standard pour moteurs de stores et volets roulants dans l'automatisation du bâtiment
SNV	Association Suisse de Normalisation
SPD	Surge Protective Devices, déviateurs de surtension
SPN	Surface de plancher nette
SPS	Commande à mémoire programmable, dans l'automatisation du bâtiment
SRCI	Système relié par circuit intermédiaire
SS	Solution standard de production de chaleur selon la MoPEC
SSIGE	Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux
STEP	Station d'épuration des eaux usées
STGB	Automatisation du bâtiment
Ta	Température de couleur, dans la technique d'éclairage
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
TIC	Technologies de l'information et de la communication
UCE (ou UBP)	Unités de charge écologique (ou éco-points), dans les écobilans
UCP	Utilisation de la chaleur perdue de l'automatisation du bâtiment
UIOM	Usines d'incinération des ordures ménagères
UPS	Système d'alimentation sans coupure
Valeur g	Facteur de transmission énergétique solaire totale
Valeur U	Coefficient de transmission thermique
VAV	Variable Air Volume, débit d'air variable, dans la technique aéraulique
VD	Volume disponible, dans les installations solaires thermiques
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile Organic Compounds, composés organiques volatils
VPréch	Volume de préchauffage solaire, dans les installations solaires thermiques
VS	Soupape de sécurité
VT	Volume total, dans les installations solaires thermiques
VVA	Variable Air Volume, voir sous VAV
ZigBee	Spécification pour des réseaux sans fil, dans l'automatisation du bâtiment

10.3 Index

A

Accumulateur combiné 89
 Accumulateur d'eau chaude
 sanitaire 157
 sonde 35
 Accumulateur de chaleur 34
 Accumulation de froid 97
 Agenda 2030 8
 Agents énergétiques 25
 caractéristiques 30
 Air extérieur 48
 Alimentation d'eau chaude
 sanitaire 155
 composants 155
 distributeur maintenu en
 température 173
 distributeur non maintenu en
 température 173
 distribution d'étage avec dispositif
 de rinçage 174
 Angle solide 184
 Appareil à induction 123
 Appareil d'allège 123
 Appareil de ventilation
 débits d'air 144
 de local individuel 149
 flux de chaleur à travers le
 caisson 142
 rendement de la température 144
 Appareils et installations
 électriques 189
 Apports de chaleur 105, 106
 Asymétries de température 20
 Automatisation de locaux 200
 Automatisation des installations
 techniques 200
 Automatisation du bâtiment 196
 communication entre systèmes 199
 fonctions 199
 mise en œuvre 201
 niveau de gestion 197
 structure 197
 systèmes de bus 199

B

BACnet 200
 Bâtiment comme système 5
 Bien-être 16

C

Câbles solaires 205
 Capacité intellectuelle et température
 ambiante 16
 Capteur à tubes sous vide 81
 Capteur plan 80, 81
 Centrale de cogénération 77
 Chaleur perdue 27
 Changement climatique 8
 Changeover 123
 Charges frigorifiques 105
 Charges thermiques nominales 92
 Chauffage à air chaud 92
 Chauffage au bois 67
 avec ou sans accumulateur
 d'énergie 72
 exemple pratique 72
 indications de planification 70
 intégration hydraulique 69
 types de combustible 67
 Chauffage au sol 92
 Chauffage de plafond 92
 Chauffe-eau à accumulation 157
 Chauffe-eau instantané 167
 Circuit de déviation 36
 Circuit de fluide frigorigène 45
 Circuit d'étranglement 36
 Circuit d'injection 36
 Circuit direct 36
 Circuit mélangeur 36
 Circuit primaire 97
 Circuit secondaire 97
 Circularité 14
 Climatatisation douce 23
 Climatiseurs, étiquette-énergie 124
 CO₂
 comme indicateur pour la qualité
 de l'air 20
 concentration dans l'air ambiant 20
 émissions des personnes 20
 Composants RC, caractéristiques de
 performance 143
 Concentration en CO₂
 dans l'air ambiant 128
 Concepts de charge 163
 Confort thermique 16, 18
 évaluation du besoin de
 refroidissement 105

- Consommateur de chaleur 34
- Consommation d'électricité
 - classe d'intensité 191
 - ménage et bureau 191
 - mesure 192
- Conversion d'énergie, étapes 26
- Convertisseurs de fréquence 193
- Corps de chauffe 92
- Couplage chaleur-force 77
 - exemples pratiques 78
- Courbe de chauffe 42
- Courbe de répartition lumineuse 185

- D**
- DALI 200
- DDC-STGB 199
- Débits d'air 128
- Décarbonisation 9, 12
- Dégagement de chaleur par personne 108
- Dégivrage 48
- Détendeur 156
- Déviation interne 37
- Diagramme log p/h 45
- Dimensionnement des pompes 43
- Dispositif anti-retour 156
- Disposition des ventilateurs dans les appareils RLT 145
- Distribution de chaleur
 - hydraulique 36
 - régulation 41
- Distribution de froid 97
- Dix R 14
- DMX 200
- Données des écobilans 10

- E**
- EATR 141
- Eaux souterraines 49
- Echangeurs de chaleur 157
- Echangeurs de chaleur air-eau, circuit hydraulique 135
- Echangeurs de chaleur à plaques 139
- Echangeurs de chaleur rotatifs 139
- Eclairage 177
 - efficacité énergétique 177
 - objectifs contradictoires 177
- Eclairage artificiel
 - méthodes estimatives 181
 - normes 181
 - planification 180
- Eclairage lumineux 182
- Eclairage lumineux nominal
 - PN 181
- Ecobilan 9
- Economie circulaire 13
- Electricité dans les bâtiments 189
- Emission de chaleur
 - disposition 92
 - limites de puissance 92
 - températures aller 92
- Emission de froid dans les locaux 120
- Emissions GES au cours du cycle de vie d'un bâtiment 11
- Energie
 - auxiliaire 25
 - définitions 25
 - finale 25
 - fournie 25
 - grise 10, 25
 - primaire 25
 - produite sur site 26
 - secondaire 26
 - utile 26
 - utilisable 27
- EnOcean 200
- Etrangleur d'équilibrage 37, 157
- Etre humain
 - convection 17
 - dégagement de chaleur 17
 - dégagement de chaleur spécifique 19
 - données biophysologiques 17
 - élimination 17
 - évaporation 17
 - excrétion 17

- F**
- Facteur de pondération 27
- Facteur de réflexion lumineuse 183
- Facteur de transmission totale du vitrage 107
- Fluides frigorigènes 99
 - classification systématique 99
 - effet de serre et caractéristiques TEWI 103
 - Energy Efficiency Ratio 103
 - European Seasonal EER 104
 - interdits 100
 - naturels 100
 - restriction d'utilisation 102
 - stable dans l'air 100
 - statut légal 100, 101
- Flux lumineux 182

Flux thermique dans le bâtiment 23
Formation d'eau de condensation 48
Free Cooling 116
Froid climatique 95
 circuit hydraulique de base 96, 97
 efficacité énergétique 95
 interfaces 97, 98
 optimisation énergétique de
 l'exploitation 117
 précisions pour la planification 96
 récupération de chaleur 116
 sources d'énergie 117
 symboles 96
 termes 95, 99
Froid industriel 114

G

Générateur d'eau chaude, plage de
disponibilité 158
Générateur de chaleur 33

H

Habillement
 clo 17, 18
 facteur d'habillement 17
 type d'habillement 18
Humidification adiabatique de l'air
rejeté 113
Humidité de l'air 17
Humidité de l'air ambiant 21
Humidité relative de l'air intérieur 129

I

Indice PMV 18
Indice PPD 18
Influences thermiques sur une
pièce 108
Installations de chauffage
 composants 33
Installations de conditionnement d'air
avec rotor 148
Installations de froid
 à absorption 111
 à adsorption 112
 à compression 111
 concepts techniques 110
 Desiccative and Evaporative
 Cooling 113
Installations de ventilation
 avec réchauffement d'air (chauffage
 à air chaud) 92
 bidirectionnelle 146, 147, 152

Installations PV 203
Installations RLT, termes 146
Installations solaires thermiques 81
 avec accumulateur de préchauffage
 séparé 86
 avec chauffage au bois,
 accumulateur combiné 89
 avec échangeur de chaleur
 intégrés 84
 avec échangeur de chaleur
 non intégrés 85
 avec pompe à chaleur,
 accumulateur combiné 90
 exemples pratiques 84
 indications de planification 81
 orientation 83
 problématique de surchauffe 85
 type de capteurs 81
 valeurs indicatives pour la
 construction 83
Installations techniques
 et énergie 23
Intensité lumineuse 184

K

KNX 200

L

Lampes
 caractéristiques 186
 efficacité lumineuse 186
 types 185
Légionelles 172
Limite du système 46
Limiteur de température de sécurité 37
LON 200
Lumière artificielle 180
 efficacité énergétique 181
 et domotique 181
Lumière du jour 178
 méthodes estimatives 178
 paramètres déterminants 178
 planification 177
Luminaires 185
 efficacité lumineuse 187
 types 187
Luminance 182

M

- Machine frigorifique
 - comportement en charge
 - partielle 115
 - diagramme pression-enthalpie 104
 - processus cyclique 104
- Maintien de la température du retour de chaudière 38
- M-Bus 200
- met 16, 19
- Modbus 200
- Modèle thermique du local 106
- Modules PV 203
 - esthétique 204
 - systèmes de montage 205

N

- Niveau automation 7
- Niveau gestion 7
- Niveau terrain 7

O

- OACF 141
- ODD 8
- Ondes électromagnétiques 80
- Optimisation énergétique de l'exploitation 119
- Organe de réglage 35, 157

P

- Panneau de refroidissement 123
- Performance Ratio 211
- Périmètre de bilan 27
- Phase de la combustion du bois 69
- Photovoltaïque 203
 - accumulateurs (batteries) 210
 - coffrets de raccordement de générateur 206
 - connecteurs 206
 - consommation propre 212
 - dimensionnement de l'onduleur 207
 - dispositifs de mesure 209
 - dispositifs de protection et fusibles 208
 - dispositifs de sectionnement et de commutation 208
 - exigences générales 203
 - onduleurs 207
 - perte de rendement 207
 - régulateurs de la consommation propre 211
 - rendement énergétique 211

- systèmes de communication 210
- Plafonds à convection 123
- Plafonds refroidissants 121
- Plages de température adaptées pour les habitations et bureaux conditionnés 18
- Polluants 129
- Pompe à chaleur 45
 - air-eau 46
 - avec accumulateur d'énergie 58
 - Coefficient de performance annuel (COPA) 47
 - Coefficient of Performance (COP) 47
 - défaillances 52
 - eau-eau 49
 - exemples pratiques 56
 - fonctionnement bivalent parallèle 65
 - Fraction utile du générateur de chaleur (FUGen) 47
 - Fraction utile du système (FUS) 47
 - indicateur d'efficacité énergétique 45
 - indications de planification 50
 - Indice de performance 47
 - intégration hydraulique 53
 - Limites du système 45
 - modes de fonctionnement 54
 - sans accumulateur d'énergie 56
 - types de sources de chaleur 46
- Pompe de circulation 35, 42, 157
- Poussières fines dans l'air intérieur 21
- Pouvoir calorifique 27
- Pouvoir calorique 27
- Prédimensionnement échangeur de chaleur 162
- Production de froid
 - principes 111
- Production d'eau chaude
 - avec rejets thermiques 169, 170
 - charge par étapes 164
 - charge par stratification 165, 166
 - chauffe-eau instantané «Module d'eau chaude sanitaire» 167
 - concepts de charge 163
 - directe 160
 - échangeurs de chaleur non intégrés 162
 - indications générales 158
 - indirecte 160
 - intégration hydraulique 160
 - par rejets thermiques 169

prédimensionnement,
échangeur à plaques 162
prédimensionnement,
échangeur à tubes lisses 161
Production de froid 97, 109
dimensionnement 46, 109
Production d'humidité par les
personnes 21
Protection anti-givrage 144
Protection contre la surchauffe
estivale 178
Protection contre l'éblouissement 178
Puissance des ventilateurs,
spécifique 136
Puissance d'extraction 51

Q

Qualité de l'air intérieur 128
pollution due aux personnes 20
selon l'utilisation 21

R

Radon 21
Rayonnement solaire à la surface
de la terre 80
Rayonnement solaire, notions 80
Récupération de chaleur
débits d'air 140
taux de fuites 140
Refroidissement 115
Refroidissement nocturne 23
Refroidissement par éléments
de construction 120
Refroidissement par sorption 113
Refroidisseur 97
Refroidissement, besoin de 106
Registre géothermique 50
Regroupement dans le cadre de la
consommation propre (RCP) 213
Régulateur 35, 157
Régulation 41
Régulation de la température, en fonc-
tion des conditions météorologiques 41
Rejets thermiques 27
Relations entre architecture et
technique du bâtiment 6
Rendu de couleur 186
Renouvellement d'air 127
composants 130, 131
échangeur à enthalpie 140
échangeurs de chaleur 139
énergie pour la ventilation 136

fonctions 130
installation à zone unique 149
installation multizone 149
perte de charge 136
prescriptions, normes 127
récupération de chaleur 139
rendement brut de la
température 140
surveillance et sécurité 135
symbols 131
système relié par circuit
intermédiaire 139
taux de fuites 139
termes 130
transfert d'humidité 141
types de perte de charge 138
types d'installation 146
Réseaux thermiques
avec raccordement direct 75
avec raccordement indirect 76
exemples pratiques 75
Respiration 17

S

Satisfaction des utilisateurs 17
SCADA 199
Schéma électrique général 206
SFP
additionnelle 137
externe 137
interne 137
SMI 200
Solaire bas débit 84
Solaire haut débit 84
Sondes 157
Sondes de température extérieure 35
disposition 41, 42
Sondes géothermique 50
Sondes météorologiques 35
Soupape de sécurité 35
Sources de chaleur 46
parts de rayonnement et de
convection 121
Sources d'énergie 27
Spectre de la lumière du jour,
flux de rayonnement 183
Stratégie Climat 8
Stratégie énergétique 8
Surface de chauffe, puissance 92
Système de chauffage au bois 69
Système d'éléments de construction
thermoactifs (ECTA) 92

Systeme d'émission de froid,
comparaison 123
Systeme de ventilation 149

T

Technique d'éclairage, bases 182
Technique d'éclairage, grandeurs 182
Technique du bâtiment 189
 et courant 189
 et durabilité 8
 installations générales 190
 optimisation de la consommation
 électrique 194
Technique frigorifique, tendances 125
Température ambiante opérative 16
Température de couleur 187
TEWI, calcul 103
Thermostat 35
Transfert d'air repris 141
Type d'utilisation des locaux 28
Types d'air selon la norme
SIA 382/1 130
Types de compresseur 111

V

Vanne d'arrêt 156
Vanne de prélèvement 157
Vanne de sécurité 156
Vase d'expansion 35
Ventilation par les fenêtres 105
Ventilation par local 149
Vidange 157
Voile refroidissant 123

W

Watt-Peak 203

Z

ZigBee 200
Zone 27
Z-Wave 200