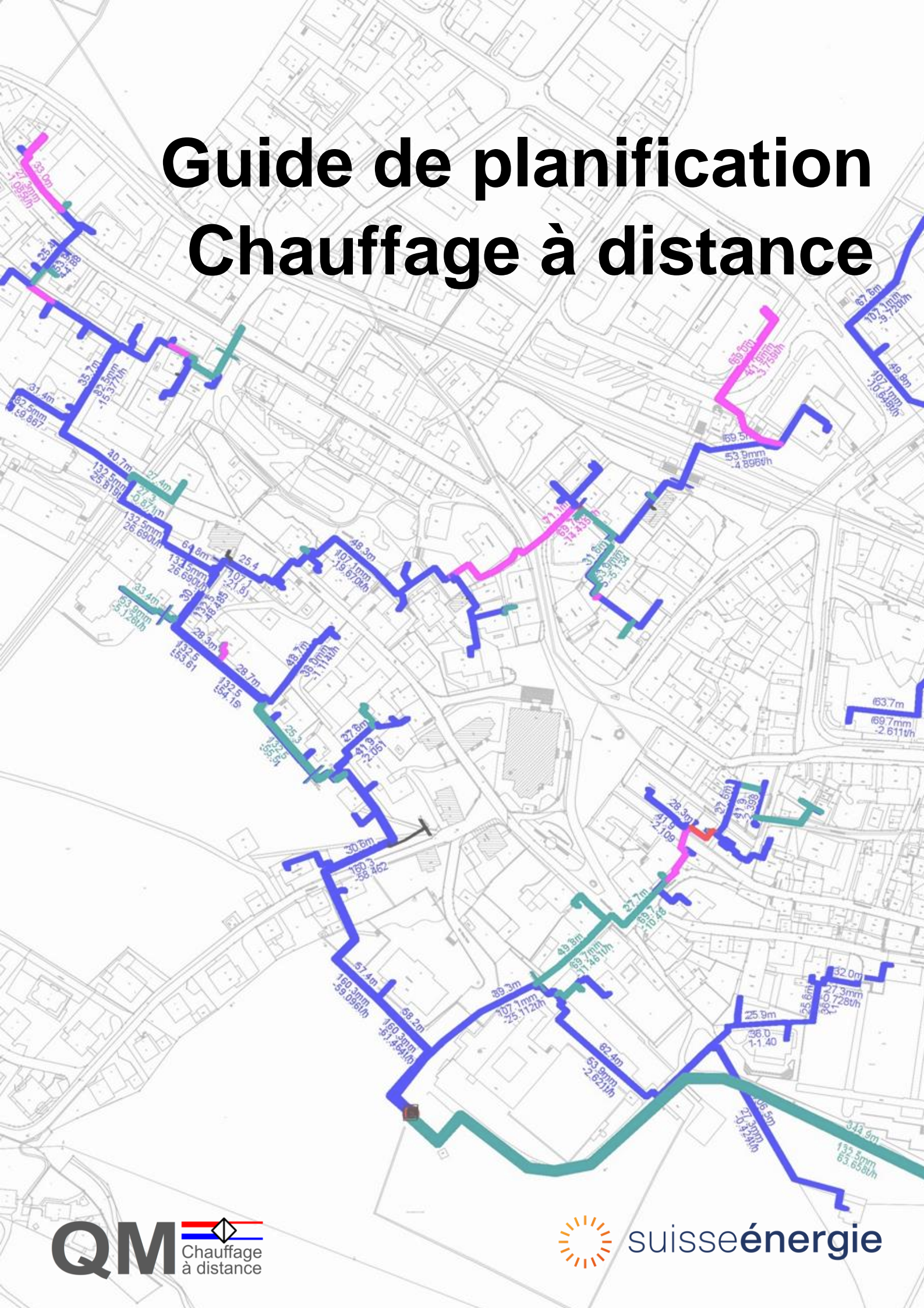


Guide de planification Chauffage à distance



Objectif et motivation

Le chauffage à distance permet d'utiliser les rejets de chaleur ainsi que les énergies renouvelables, d'où son importance croissante. Le **Guide de planification Chauffage à distance** est une introduction aux principes techniques et fonctionnels de la mise en œuvre des réseaux de chauffage à distance, et vise ainsi à contribuer à une mise en œuvre et une exploitation efficace et économique de nouveaux réseaux.

Public cible

- Ingénieurs en chauffage et planificateurs en chauffage
- Ingénieurs en génie civil et spécialistes de la construction de canalisations
- Cadres de sociétés de planification dédiées au chauffage, aux techniques du bâtiment et au génie civil
- Employés de sociétés de chauffage
- Exploitants de réseaux de chauffage à distance.

Champ d'application

Ce guide de planification présente les bases de la planification, de la réalisation et de l'optimisation de la **distribution** et du **transfert de chaleur** des **réseaux de chauffage à distance**. Leur mise en place est limitée aux conditions suivantes:

- le fluide caloporteur est l'eau, sous sa forme liquide;
- l'utilisation est limitée aux cas dans lesquels la chaleur est directement exploitable, avec des températures supérieures à 40°C;
- la distribution de chaleur fonctionne principalement grâce à l'utilisation de tubes pré-isolés en plastique ou métal, qui limitent les températures d'exploitation continue à 120°C, 140°C max.

La configuration du réseau ne dépend pas du type de production de chaleur. Les techniques de production de chaleur sont également présentées et les influences entre production et distribution de chaleur sont mises en évidence, de même que les particularités du bois d'énergie, des rejets de chaleur et de la chaleur environnante. La conception détaillée de la production de chaleur ne fait toutefois pas l'objet du présent guide.

Cette étude a été réalisée pour le compte de SuisseEnergie. Les auteurs sont les seuls responsables de son contenu.

Adresse

SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie (OFEN)
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Adresse postale: 3003 Berne
Infoline: +41 0848 444 444 Energieschweiz.ch/conseil
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Table des matières

Le guide de planification se compose comme suit.

Partie 1 Bases Cette partie traite des conditions-cadres, de la fourniture de chaleur, de sa distribution ainsi que de son transfert, et comporte les informations de base nécessaires à la phase initiale du projet.

Partie 2 Planification et calcul Précise les informations nécessaires à la planification de l'exécution. La partie 2 détaille certains sujets évoqués dans la partie 1.

Partie 3 Optimisation Indique la procédure d'analyse des réseaux de chauffage à distance existants ainsi que la procédure de mise en place de mesures visant à les optimiser.

En complément des trois parties principales, l'**Annexe** contient des graphiques de conception détaillés, des informations relatives aux normes ainsi qu'une bibliographie.

Responsabilité et utilisation

Le contenu du présent guide de planification est basé sur l'expérience des auteurs ainsi que les ouvrages cités dans la bibliographie. Son élaboration a en outre été encadrée par des associations professionnelles et des représentants de la branche. Bien que ces informations aient été rassemblées en toute bonne foi, nous ne saurions être tenus responsables de l'utilisation qui en sera faite. Ce guide de planification servira de base aux formations initiale et continue du domaine, et doit régulièrement être mis à jour. Toute remarque ou suggestion d'amélioration est la bienvenue.

Traduction de la Version 1.2 du "Planungshandbuch Fernwärme" du 26.09.18, ISBN 3-908705-30-4
www.qmfernwaerme.ch

Date de l'édition traduite: 18. Octobre 2018
ISBN 3-908705-35-5
Téléchargement gratuit sur:
www.qmchauffageadistance.ch

Guide de planification Chauffage à distance

Auteurs: Groupe de travail QM Chauffage à distance

Dr Thomas Nussbaumer, Verenum, 8006 Zurich (chef de projet)
Stefan Thalmann, Verenum, 8006 Zurich
Andres Jenni, Ardens GmbH, 4410 Liestal
Joachim Ködel, Gruner Gruneko AG, 4020 Bâle

Donneur d'ordre

Office fédéral de l'énergie

Patronage

ASCAD Association suisse du chauffage à distance
SSIGE Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux
SICC Société suisse des ingénieurs en technique du bâtiment
suissetec Association suisse et liechtensteinoise de la technique du bâtiment

Donneur d'ordre de la traduction

Office fédéral de l'énergie
Association suisse du chauffage à distance

Collaboration

Dr Marc-André Baillifard, heig-vd, 1401 Yverdon-les-bains
Werner Betschart, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw
Walter Böhlen, Association suisse du chauffage à distance ASCAD, 5443 Niederrohrdorf
Marc Burkard, Hoval AG, 8706 Feldmeilen
Marcel Büchler, ERZ Entsorgung + Recycling Zürich, 8050 Zurich
Lukas Bühler, Porta Ingenieure Planer Geometer, Porta AG, 3800 Interlaken
Michael Cueni, Triplex Energieplaner AG, 4450 Sissach
Robert Diana, Association suisse et liechtensteinoise de la technique du bâtiment (suissetec), 8021 Zurich
Dr Ludger Fischer, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw
Reto Gadola, SICC, 6105 Schachen
Manuel Godinat, Thermobois SA, 2900 Porrentruy
Dr Jürgen Good, QM Holzheizwerke®, 8006 Zurich
Aurélien Huck, Triplex Energieplaner AG, 4450 Sissach
Andreas Hurni, Association suisse du chauffage à distance ASCAD, 3001 Berne
Martin Jutzeler, Energie Wasser Bern EWB, 3001 Berne
Gerhard Oppermann, Association suisse du chauffage à distance ASCAD, 4410 Liestal
Urs Peter, isoplus (Schweiz) AG, 8546 Islikon
Josef Rohner, LOGSTOR Schweiz AG, 8105 Regensdorf
Nathalie Spiller, Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux SSIGE, 8027 Zurich
Matthias Sulzer, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw
Andreas Theiler, Triplex Energieplaner AG, 4450 Sissach
Reto von Euw, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw
Thomas Wälti, Merki + Häfeli AG, 5303 Würenlingen
Martial Wicht, Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux SSIGE, 8027 Zurich
Ludovic Yvert, Brugg Rohrsystem AG, 5314 Kleindöttingen

Traduction

iQ Services GmbH, 8707 Uetikon am See

Table des matières

Bases 9

1	Introduction	10
1.1	Evolution du chauffage à distance	10
1.2	Termes et signification du chauffage à distance en Suisse	10
1.3	Niveau de température	11
1.4	Avantages et inconvénients	11
1.5	Efficacité et coûts	12
2	Fourniture de chaleur	16
2.1	Besoin de chaleur des consommateurs individuels	16
2.1.1	Chauffage des locaux	16
2.1.2	Eau chaude et chaleur industrielle	16
2.1.3	Température requise	17
2.2	Besoin de chaleur total	17
2.3	Appels de puissance thermique	18
2.4	Besoins en matière d'anciennes et nouvelles constructions	19
2.5	Conception du générateur de chaleur	20
2.6	Evaluation de la chaleur et de l'électricité	22
2.6.1	Rendement et taux d'utilisation	22
2.6.2	Rendement global	22
2.6.3	Rendement global pondéré	24
2.7	Générateur de chaleur et potentiel de chauffage à distance	26
2.8	Production de chaleur pure (centrales thermiques)	28
2.8.1	Chaudières à bois	28
2.8.2	Rejets de chaleur directement exploitables ..	31
2.8.3	Rejets de chaleur à basse température et chaleur ambiante	31
2.8.3.1	Hausse de la température par pompes à chaleur	31
2.8.3.2	Sources de chaleur des pompes à chaleur	32
2.8.4	Energie solaire thermique	34
2.8.5	Géothermie	36
2.9	Couplage chaleur-force (centrale de cogénération)	37
2.9.1	Aperçu	37
2.9.2	Turbines à vapeur	38
2.9.4	Moteurs à vapeur	39
2.9.5	Cycle organique de Rankine	39
2.9.6	Moteurs à combustion	39
2.9.7	Turbines à gaz à circuit ouvert	39
2.9.8	Couplage chaleur-force et pompe à chaleur ..	40
2.9.9	Processus à gaz à circuit fermé	40
2.9.10	Comparatif des systèmes	40
2.10	Accumulateur d'énergie thermique	42
2.10.1	Propriétés et termes	42
2.10.2	Techniques de stockage	43

2.10.2.1	Accumulateurs de chaleur sensibles	43
2.10.2.2	Accumulateurs de chaleur latente	44
2.10.2.3	Accumulateurs de chaleur thermochimiques	44
2.10.3	Principes de base du stockage de l'énergie ..	44
2.10.3.1	Processus de stockage	44
2.10.3.2	Energie thermique	44
2.10.3.3	Isolation thermique	45
2.10.3.4	Refroidissement progressif	46
2.10.4	Conception de l'accumulateur	47
2.10.5	Intégration et utilisation	50
2.10.5.1	Intégration dans le cadre du chauffage	50
2.10.5.2	Intégration en centrales thermiques	51
3	Liaison entre fourniture et distribution de chaleur	52
3.1	Températures du réseau	52
3.1.1	Température d'amenée	52
3.1.2	Température de retour	52
3.2	Mode opératoire du réseau	53
3.2.1	Fonctionnement continu	53
3.2.2	Fonctionnement continu-constant	53
3.2.3	Fonctionnement constant	54
3.3	Pompes	54
3.3.1	Conceptions	54
3.3.2	Efficacité énergétique	54
3.3.3	Régulation de pompe	55
3.4	Montage des pompes	57
3.4.1	Montage en parallèle	57
3.4.2	Montage en série	57
3.4.3	Redondance	58
3.5	Régulation du réseau	58
3.5.1	Concept de régulation	59
3.5.2	Site de mesure de la régulation de pression différentielle du réseau	59
3.5.3	Réseaux de chauffage avec débit fortement variable et température d'amenée plus élevée	60
3.5.4	Groupes de circuit de chauffage à distance séparés pour exploitation hivernale et exploitation estivale	60
3.6	Pression nominale	61
3.7	Répartition de pression dans le réseau de chauffage à distance	61
3.8	Augmentation de pression et séparation du réseau	64
3.9	Maintien de la pression	64
3.9.1	Systèmes de maintien de la pression	64
3.9.2	Intégration du maintien de la pression	66
3.9.3	Volumes d'expansion et quantité réalimentée	67
4	Distribution de chaleur: principes de base	69
4.1	Evolution	69
4.2	Types de distribution à température décroissante	69
4.2.1	Distribution de vapeur	69

4.2.2	Distribution d'eau surchauffée	70	4.7.2.2	Systèmes de conduites flexibles.....	94
4.2.3	Distribution d'eau chaude	71	4.7.2.3	Procédures d'autorisation	94
4.2.4	Distribution à basse température	71	4.7.3	Déroulement de la construction.....	95
4.3	Composants	72	4.7.3.1	Creusement de tranchées	95
4.3.1	Systèmes de conduites.....	72	4.7.3.2	Pose de canalisations.....	96
4.3.1.1	Tubes pré-isolés en métal.....	72	4.7.3.3	Remblayage des tranchées;.....	97
4.3.1.2	Tubes médians en plastique	73	4.7.3.4	Remise en état	98
4.3.1.3	Tubes médians en métal.....	73	4.8	Qualité de l'eau	99
4.3.1.4	Tubes en plastique renforcé de fibres de verre (tubes en PRV).....	74	4.8.1	Types d'eau	99
4.3.1.5	Tubes pré-isolés avec enveloppe en acier (SMR).....	74	4.8.1.1	Termes en technique du bâtiment	99
4.3.1.6	Modèle à tube double.....	74	4.8.1.2	Termes en technique du chauffage à distance	99
4.3.1.7	Choix du système de conduites	75	4.8.1.3	Catégories de liquides	99
4.3.2	Surveillance des fuites.....	77	4.8.2	Recommandations relatives à la qualité de l'eau en technique du chauffage à distance	100
4.3.2.1	Systèmes de surveillance.....	77	4.8.2.1	Eau chaude jusqu'à 110°C	100
4.3.2.2	Technique de localisation.....	78	4.8.2.2	Eau surchauffée au-delà de 110°C.....	101
4.3.2.3	Documentation et contrôle	79	5	Transfert de chaleur: principes de base.....	102
4.3.3	Robinetterie	79	5.1	Termes.....	102
4.3.3.1	Robinetts-vannes	79	5.1.1	Conduite de raccordement domestique	102
4.3.3.2	Vannes.....	81	5.1.2	Local technique de raccordement domestique	102
4.3.3.3	Robinets	81	5.1.3	Station de transfert de chaleur	103
4.3.3.4	Robinets à papillon.....	81	5.1.4	Chaufferie	103
4.3.3.5	Champs d'application.....	82	5.1.5	Sous-station	103
4.3.3.6	Conditions d'exploitation	83	5.1.6	Station compacte	103
4.3.3.7	Marquage et documentation.....	84	5.1.7	Installation domestique	103
4.4	Structure du réseau	85	5.2	Options de raccordement	104
4.4.1	Subdivision selon le nombre de conduites....	85	5.2.1	Raccordement direct.....	104
4.4.2	Distribution principale	86	5.2.2	Raccordement indirect.....	104
4.4.3	Sous-distribution et raccordements domestiques	86	5.3	Contrat de fourniture de chaleur	105
4.4.4	Développement de la structure du réseau	87	5.3.1	Conditions générales (CG).....	106
4.4.5	Purge et vidange.....	88	5.3.2	Prescriptions techniques de raccordement .	106
4.4.6	Dispositifs de mesure	88	5.3.3	Fiche de tarifs.....	106
4.5	Méthodes de pose	88	Planification et calculs.....	109	
4.5.1	Pose de surface.....	88	6	Déroulement du projet.....	110
4.5.2	Pose en pleine terre dans un caniveau.....	89	6.1	Aperçu.....	110
4.5.3	Pose en pleine terre dans un fossé	89	6.2	Assurance qualité	110
4.5.4	Pose sans tranchée	89	6.3	Différences entre le règlement SIA 108 et le guide de planification chauffage à distance.....	111
4.5.4.1	Processus de compactage du sol	89	6.4	Phase 1: Etude préliminaire.....	113
4.5.4.2	Processus de soutirage du sol	89	6.4.1	Zone d'approvisionnement en chaleur potentielle.....	113
4.5.4.3	Siphon.....	90	6.4.2	Enquête consommateurs clés.....	114
4.6	Situations fréquentes d'installation.....	91	6.4.3	Zone d'approvisionnement en chaleur actualisée.....	115
4.6.1	Surfaces avec revêtement	91	6.4.4	Première observation économique.....	116
4.6.2	Surfaces sans revêtement	91	6.5	Phase 2: Planification préliminaire	119
4.6.3	Installation en bordure de terrain prédéfini ...	91	6.5.1	Concrétisation des consommateurs clés....	119
4.6.4	Terrain privé.....	91	6.5.2	Enquête petits consommateurs.....	119
4.6.5	Consommateurs raccordés ultérieurement... 91		6.5.3	Détermination de la zone d'approvisionnement	119
4.6.6	Prise en compte d'autres réseaux de distribution	91	6.5.4	Deuxième observation économique	119
4.6.6.1	Câbles d'alimentation électrique et de télécommunication	91			
4.6.6.2	Conduites de gaz et d'eau potable	92			
4.6.6.3	Conduites d'eaux usées et d'eaux pluviales	92			
4.7	Génie civil	92			
4.7.1	Généralités	93			
4.7.2	Planification du tracé	93			
4.7.2.1	Systèmes de conduites rigides.....	93			

6.5.5	Acquisition	120	7.4.6	Particularités de conception	145
6.6	Phase 3: Planification, appel d'offres et adjudication	122	7.4.6.1	Problématique de surintensité	145
6.6.1	Conception du réseau de chauffage	122	7.4.6.2	Vitesse de circulation.....	146
6.6.2	Spécification station de transfert.....	122	7.4.6.3	Débit minimal.....	146
6.6.3	Procédure d'autorisation du permis de construire.....	122	7.5	Statique des conduites	146
6.6.4	Préparation de l'appel d'offres	122	7.5.1	Qu'est-ce que la statique des conduites? ...	146
6.6.5	Soumission	123	7.5.1.1	Résistance à la compression et épaisseur de paroi.....	147
6.6.6	Troisième observation économique	123	7.5.1.2	Contrainte de flexion des conduites.....	148
6.6.7	Adjudication	123	7.5.1.3	Dilatation thermique et contrainte thermique	148
6.7	Phase 4: Exécution et réception.....	125	7.5.1.4	Superposition de tensions	149
6.7.1	Plans d'exécution.....	125	7.5.1.5	Vérification statique	149
6.7.2	Exécution.....	125	7.5.2	Technique de pose et conception	150
6.7.3	Mise en service.....	125	7.5.2.1	Compensation de dilatation	150
6.7.4	Documentation.....	125	7.5.2.2	Température de référence relative à la statique des conduites.....	150
6.7.5	Contrôle des coûts.....	126	7.5.3	Conduites posées en pleine terre (tube pré-isolé en métal).....	151
6.7.6	Réception	126	7.5.3.1	Pose à froid méthode 1	152
6.8	Phase 5: Optimisation de l'exploitation	128	7.5.3.2	Pose à froid méthode 2	152
6.8.1	Saisie des données	128	7.5.3.3	Précontrainte thermique	152
6.8.2	Evaluation.....	129	7.5.3.4	Tubes doubles, polytuyaux.....	152
6.8.3	Optimisation.....	129	7.5.4	Tubes posés à l'air libre	152
6.9	Phase 6: Exploitation et gestion	130	7.5.4.1	Support de tube.....	153
6.9.1	Concept d'exploitation.....	130	7.5.4.2	Pose avec précontrainte.....	154
6.9.2	Maintenance	130	7.5.5	Tubes médians en plastique	155
6.9.3	Contrat de maintenance	130			
6.9.4	Assurances	130			
7	Distribution de chaleur – Calculs	132	8	Transfert de chaleur – Technique et hydraulique.....	156
7.1	Rejets de chaleur	132	8.1	Composants et technique d'une sous-station	156
7.1.1	Conduites de surface.....	133	8.1.1	Appels de puissance thermique	156
7.1.2	Conduites posées en pleine terre	134	8.1.2	Matériaux et raccords.....	156
7.1.3	Rejet de chaleur spécifique par mètre de tracé de conduite	136	8.1.3	Isolation thermique.....	156
7.1.4	Rejets de chaleur annuels	136	8.1.4	Compteur d'énergie thermique.....	157
7.1.5	Chute de température en fonction de la distance	137	8.1.4.1	Installation de compteurs d'énergie thermique.....	157
7.2	Perte de pression	138	8.1.4.2	Respect de la stabilité des mesures	158
7.2.1	Conduites droites.....	138	8.1.4.3	Influence sur l'autorité de la vanne	158
7.2.2	Perte de pression des annelés	140	8.1.5	Limitation de pression	159
7.2.3	Perte de pression des installations de conduites	140	8.1.6	Limitation de température	159
7.3	Dimensionnement du diamètre des conduites	140	8.1.7	Dispositifs de réglage.....	162
7.3.1	Recommandations.....	141	8.1.8	Température retour	162
7.3.2	Procédure	141	8.1.9	Echangeur de chaleur	162
7.3.2.1	Préparation.....	141	8.1.10	Mise à la terre	162
7.3.2.2	Conception en quatre étapes	142	8.1.11	Saisie des données.....	162
7.3.3	Méthodes de calcul.....	142	8.1.12	Filtre	162
7.3.3.1	Manuelles.....	142	8.2	Chauffage de l'eau chaude.....	163
7.3.3.2	Programme de calcul	142	8.3	Problématique liée aux légionelles	164
7.4	Conception de la pompe	143	8.4	Hydraulique.....	166
7.4.1	Courbe caractéristique des pompes	143	8.4.1	Concept de base hydraulique	166
7.4.2	Courbe caractéristique des installations	143	8.4.2	Circuits de base	167
7.4.3	Lois de proportionnalité	143	8.4.2.1	Branchement en mélange.....	167
7.4.4	Demande de puissance pompes	143	8.4.2.2	Branchement en injection avec vanne à passage.....	167
7.4.5	Besoins énergétiques pompes.....	144	8.4.2.3	Branchement à étranglement	167
			8.4.3	Vanne de réglage.....	167
			8.4.4	Autorité de la vanne	168

8.4.4.1	Régulateur de pression différentielle automatique	170
8.4.4.2	Vanne de régulation indépendante de la pression différentielle (vanne combi).....	170
8.4.5	Systèmes en cas de réseaux variables	170
8.4.5.1	Équilibrage hydraulique statique	170
8.4.5.2	Équilibrage hydraulique avec régulateur de pression différentielle automatique.....	171
8.4.5.3	Équilibrage hydraulique avec vanne de régulation indépendante de la pression différentielle (vanne combi)	172
8.4.5.4	Comparaison des systèmes par rapport à l'équilibrage hydraulique.....	173
8.5	Solutions standard.....	174
8.5.1	Raccordement direct.....	174
8.5.2	Raccordement indirect.....	175
8.5.3	Chauffage de l'eau chaude.....	177
8.5.4	Pompe à jet.....	179
8.6	Exigence de transfert de chaleur.....	180
8.6.1	Technique du bâtiment	180
8.6.2	Système de chauffage	180
8.6.3	Dispositif de ventilation	181
8.6.4	Chauffage de l'eau chaude et circulation....	181
8.6.5	Technique de régulation	181
9	Rentabilité	182
9.1	Responsabilités	182
9.2	Structure des coûts	182
9.3	Calculs des coûts de revient de la chaleur	184
9.4	Comparaison de variantes	186
9.5	Plan d'affaires, bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel	186

Optimisation..... 189

10	Analyse et optimisation des consommateurs de chaleur.....	190
10.1	Méthode.....	190
10.1.1	Bases.....	190
10.1.2	Consommation supplémentaire	191
10.1.3	Influence sur la température retour.....	191
10.2	Procédure	192
10.2.1	Saisie des données et évaluation	192
10.2.2	Évaluation.....	193
10.2.3	Mise en place et contrôle des résultats.....	194
10.3	Recommandations relatives à l'analyse des consommateurs de chaleur	194

Annexe..... 197

11	Valeurs matérielles de l'eau	198
12	Compléments relatifs à la qualité de l'eau.....	200
12.1	Grandeurs de mesure.....	200
12.2	Procédé de traitement de l'eau.....	201
12.3	Procédé de traitement de l'eau (conditionnement)	202
13	Valeurs caractéristiques systèmes de conduites.....	203
13.1	Puissance de transfert pour différents écarts de température.....	203
13.2	Puissance de transfert en cas de pertes de pression spécifiques différentes	204
13.3	Tableau valeur R pour tubes en acier sans soudure	205
13.4	Dimensions et rejets de chaleur spéc. pour tubes pré-isolés en métal, tubes médians en métal et tubes médians en plastique	209
13.5	Rejets de chaleur spécifiques par mètre de tracé par conduite	213
13.6	Prix indicatifs conduites de chauffage à distance.....	214
14	Questionnaire pour un raccordement à un CAD	216
15	Symboles pour les installations.	219
16	Symboles et indices.....	220
17	Glossaire.....	225
18	Index	230
19	Sources.....	233
19.1	Littérature.....	233
19.2	Normes et directives	235

Bases

1 Introduction

1.1 Evolution du chauffage à distance

Avec une température moyenne annuelle d'environ 8°C et 200 à 300 jours de chauffage par an, le chauffage des bâtiments joue un rôle important dans notre pays. Le chauffage et la mise à disposition d'eau chaude sont indispensables à un bon confort de vie, mais sont également responsables d'une grande partie de notre consommation en énergies fossiles.

Le principe du chauffage central était déjà utilisé chez les Grecs au II^e siècle av. J.-C., avec les hypocaustes, et a plus tard été repris par les Romains: il s'agissait d'une distribution de chaleur par le biais d'air chaud circulant dans les systèmes de sol et murs chauffants. Pourtant, en Europe, on a continué à utiliser les cheminées et les foyers ouverts pendant encore de nombreux siècles. Ce n'est qu'à partir du I^{er} siècle apr. J.-C. que les foyers fermés et les poêles en pierre et en argile ont commencé à faire leur apparition. Le XV^e siècle a ensuite connu les poêles en faïence, et le XVIII^e siècle les poêles en fonte, tandis que le système de chauffage central sous sa forme actuelle n'est apparu qu'après la Seconde Guerre mondiale. On utilisait jusqu'alors presque exclusivement des combustibles solides; le mazout n'étant en effet que peu répandu avant la fin des années 1940, et il a encore fallu attendre quelques années avant que le gaz naturel soit réellement exploité.

La première utilisation du chauffage à distance remonte à 1332 à Chaudes-Aigues, en France, quand de l'eau issue de sources chaudes a été utilisée pour chauffer une quarantaine de maisons, dans le Massif central [1]. Le premier réseau de chauffage à distance tel que nous l'entendons aujourd'hui est toutefois celui de Lockport (Etat de New York, Etats-Unis), fonctionnant à la vapeur, qui s'étend sur plusieurs kilomètres [2],[3]. À partir des années 1920, et de plus en plus à partir de 1960, le développement des réseaux de chauffage à distance a finalement commencé, et ce principalement dans les pays nordiques. La Fig. 1.1 est une photographie d'un de ces réseaux dans les années 1980, à Leipzig.

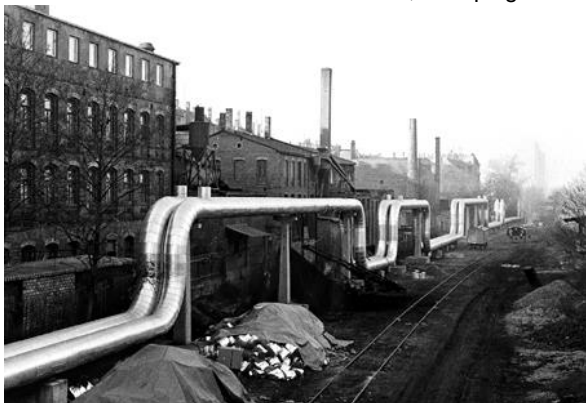


Fig. 1.1 Chauffage à distance, Leipzig (RDA), 1986 [4].

Au Danemark, en Suède, en Finlande, en Islande, en Pologne, en République tchèque et en Autriche, ce sont aujourd'hui plus de 20% des bâtiments résidentiels qui sont raccordés au chauffage à distance [3],[7],[9].

1.2 Termes et signification du chauffage à distance en Suisse

Voici la définition que la Statistique globale suisse de l'énergie donne du chauffage à distance:

«On entend ici par chauffage à distance un système dont le réseau principal de transport et de distribution emprunte le domaine public et où la chaleur est vendue à des tiers» [18].

Les restrictions en matière de vente de chaleur et l'utilisation des terres publiques n'ayant aucun impact sur le plan technique, les informations données par le présent guide s'appliquent également aux réseaux de distribution de chaleur pour lesquels les générateurs et consommateurs de chaleur se trouvent sous un même toit et pour lesquels aucune terre publique n'est exploitée.

Dans le cadre de réseaux plus petits, on parle parfois également de chauffage de proximité. En Allemagne, ce terme fait référence au transfert de chaleur entre bâtiments d'une puissance comprise entre 50 kW et plusieurs mégawatts pour le chauffage et l'eau chaude [10]. Le label Minergie® utilise également le chauffage de proximité lorsque les installations de production de chaleur approvisionnent des bâtiments ou des ensembles de bâtiments sans pour autant qu'une revente à un tiers ne soit nécessaire [11]. Etant donné que la frontière entre chauffage à distance et chauffage de proximité est relativement floue, les chapitres du présent guide n'emploient que le terme de chauffage à distance. Par ailleurs, en Allemagne, seul le terme de chauffage à distance est correct sur les plans technique et juridique: ni la distance ni la taille du réseau de conduites n'est un critère de distinction entre production de chaleur centralisée et chauffage à distance [58]. Les réseaux de chauffage à distance effectifs couvrent ainsi une large plage de puissance de raccordement: de moins de 100 kW à plus de 1 GW.

Les statistiques montrent que le chauffage à distance, avec ses 18'300 TJ/a, représente une proportion d'environ 2.2% de la consommation d'énergie finale suisse, qui s'élève à environ 840'000 TJ/a [18]. Les chiffres du chauffage à distance reposent sur une enquête réalisée depuis 1978 et couvrant uniquement les grands réseaux principalement alimentés par les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM). Les petits réseaux fonctionnant au bois, à l'aide de tout autre type d'énergie renouvelable, de pompes à chaleur, de pétrole ou de gaz naturel ne sont donc pas compris dans la Statistique, raison pour laquelle la part effective du chauffage à distance est en réalité nettement plus importante.

D'après [19], le chauffage à distance pourrait potentiellement, d'ici 2050, couvrir environ 17 TWh/a (soit

61'200 TJ/a) des besoins de chaleur pouvant être couverts par les sources d'énergies renouvelables, ce qui correspond à environ 38% des besoins de chaleur à long terme pour le chauffage des locaux et l'eau chaude en Suisse.

1.3 Niveau de température

La hausse des températures du réseau s'accompagne d'une augmentation des rejets de chaleur du réseau de chauffage à distance. Le dépassement de certaines températures entraîne également une hausse des exigences au niveau des appareils et des conduites. La température d'amenée maximum est donc un critère d'une grande importance pour distinguer les réseaux de chauffage à distance. Tandis que le chauffage des locaux pour les nouvelles constructions peut être utilisé directement à partir d'env. 40°C, une température minimum de 60°C est requise pour l'eau chaude sanitaire préchauffée afin de garantir la sécurité de tous et de protéger des légionelles. C'est donc pour cette raison que l'eau chaude sanitaire d'un réseau de chauffage à distance nécessite des températures d'amenée d'environ 70°C.

Outre les applications d'exploitation directe de la chaleur se développe un intérêt particulier pour la distribution de chaleur, avec des niveaux de température compris entre seulement 6°C et 20°C, par exemple pour servir de ressource aux pompes à chaleur décentralisées. On retrouve en premier lieu l'exploitation des rejets de chaleur et de la chaleur environnante. Les réseaux concernés sont également appelés «réseaux Anergie» et l'on parle également de chauffage à distance à basse température [16]. Afin de réduire les dépenses d'énergie primaire destinées à couvrir les besoins en énergie utile, il est nécessaire de minimiser le taux d'utilisation d'exergie (part d'énergie capable de fonctionner). Dans le cadre de la distribution de chaleur, c'est la réduction du niveau de température qui le permet, ce qui explique également l'emploi du terme «système LowEx» pour le chauffage à distance à basse température [19].

Lorsque la distribution d'eau est utilisée pour évacuer la chaleur chez certains consommateurs, on parle alors de «froid à distance». Le regroupement des consommateurs de chaleur et de froid par le biais de réseaux à usages multiples offre un potentiel supplémentaire d'économie d'énergie primaire. Ces réseaux sont également appelés «réseaux d'échanges énergétiques».

Cependant, la majorité des réseaux de chauffage à distance actuels sont exploités à des températures d'amenée supérieures à 70°C, directement dans le cadre du chauffage, et souvent dans celui de l'approvisionnement en eau chaude sanitaire. Le présent guide de planification présente les techniques applicables pour des plages de température de 40°C à 140°C. La limite supérieure correspond à la température d'exploitation continue de tubes pré-isolés en métal garantie en règle générale par le fabricant. Comme au-delà de 110°C, les exigences de sécurité à respecter sont plus élevées, on

distingue dans le domaine de la distribution de chaleur les termes suivants:

«eau chaude» pour la distribution de chaleur d'une température inférieure à 110°C;

«eau surchauffée» pour de l'eau d'une température supérieure à 110°C.

1.4 Avantages et inconvénients

Le chauffage à distance occupe une place de plus en plus importante, car il offre un grand confort pour le consommateur et permet l'exploitation de différentes sources de chaleur. Les centrales à bois automatiques, les rejets de chaleur des industries ou des UIOM, la chaleur environnante utilisée par les pompes à chaleur ainsi que l'énergie solaire thermique servent la plupart du temps de sources de chaleur pour les températures d'amenée supérieures à 40°C dont il est question dans ce manuel.

Avec une source d'énergie comme le bois, le chauffage à distance permet l'utilisation de grands générateurs de chaleur automatiques. Des installations à la marche automatisée et équipées d'un séparateur de poussières fines efficace permettant d'assurer que le développement de l'énergie du bois n'entraîne pas une augmentation locale du nombre de particules fines polluant l'air, comme c'est le cas avec les petits foyers de combustion utilisés non conformément à l'usage prévu.

Un des autres avantages du chauffage à distance est l'espace gagné dans le bâtiment des consommateurs de chaleur; en effet, aucun réservoir à mazout, cheminée ni foyer n'est nécessaire.

Pour les consommateurs de chauffage à distance, les dépenses d'entretien du générateur de chaleur (livraison de combustible, maintenance et ramonage) ne sont plus non plus à prendre en charge.

Le chauffage à distance présente toutefois aussi des inconvénients, comme le coût de la distribution de chaleur et les pertes supplémentaires. Etant donné qu'un réseau de chauffage à distance requiert des investissements élevés, les charges financières peuvent représenter plus de 50% du coût total [14]. Dans le cas du bois, du mazout ou du gaz naturel, les coûts du combustible pour couvrir les pertes thermiques de distribution représentent également un important facteur de coût, tandis que les coûts d'électricité pour l'énergie de pompage représentent en règle générale une proportion moindre [14].

En ce qui concerne la consommation d'énergie primaire, la production de chaleur centralisée peut, selon les utilisations, présenter d'autres avantages. Ainsi, l'utilisation de rejets de chaleur non réexploitables autrement permet d'économiser des combustibles fossiles dans le cadre des systèmes de chauffage décentralisés. S'il n'y a pas de rejets de chaleur, une centrale de chauffage à distance permet d'obtenir un rendement plus élevé grâce à des générateurs de chaleur plus grands, et de mieux adapter la production aux rapports de charge grâce à

plusieurs générateurs de chaleur. De plus, de nombreuses sources d'énergie peuvent être utilisées et associées. Ainsi, il est possible de combiner couverture de la charge de base renouvelable et chaudière de charge de pointe à combustible fossile. À partir d'une certaine taille, il est également possible d'utiliser, en ce qui concerne la charge de base, le couplage chaleur-force (CCF) pour le bois.

En raison de ces pertes thermiques de distribution, et selon le cadre d'utilisation, les inconvénients en matière de chauffage à distance peuvent être plus nombreux que les avantages. Si on les compare aux systèmes décentralisés de chauffage au gaz, les systèmes de chauffage à distance au gaz naturel sont plus avantageux seulement s'ils sont remplacés par une production d'électricité au bois car les rejets de chaleur servent au chauffage à distance..

1.5 Efficacité et coûts

À une puissance de raccordement et une température d'amenée données dans un réseau, l'efficacité et la rentabilité d'un réseau de chauffage à distance sont fonction des facteurs suivants:

1. Les **rejets de chaleur** du réseau entraînent de nouveaux besoins de chaleur. Dans le cas d'une chaudière, il faut également du combustible. La teneur en énergie correspond alors aux pertes thermiques divisées par le rendement de la chaudière. Il est donc indispensable de tenir compte des rejets de chaleur lors du dimensionnement de la production de chaleur et du réseau. Plus la surface et le diamètre des conduites sont importants, plus les rejets de chaleur augmentent; ces derniers diminuent avec l'amélioration de l'isolation thermique.
2. Une réduction du **diamètre des conduites** entraîne une diminution des charges financières et une baisse du coût du combustible, mais fait augmenter par la même occasion les pertes de charge et la puissance de pompage, ce qui provoque une hausse des coûts d'exploitation en ce qui concerne la consommation électrique.
3. En outre, l'**écart de température** entre l'amenée et le retour a un impact sur la puissance thermique transportable à un certain débit. La formule correspondant à la puissance thermique est la suivante:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T = \dot{V} \rho c_p \Delta T = w A \rho c_p \Delta T$$

- \dot{Q} = puissance thermique en (kW)
- \dot{m} = débit massique en (kg/s)
- \dot{V} = débit en (m³/s)
- w = vitesse d'écoulement en (m/s)
- A = section de la conduite en (m²)
- ρ = densité de l'eau à 60°C (983 kg/m³)
- c_p = capacité thermique de l'eau à 60°C (4'183 kJ/(kg·K))
- ΔT = écart de température = (T_{VL} - T_{RL}) en (K)

La Fig. 1.2 représente le débit nécessaire au transport d'une puissance thermique de 1 MW en fonction de l'écart de température.

Un fort écart de température permet, pour une puissance de raccordement donnée, d'utiliser des conduites plus petites, réduisant ainsi les charges financières et les pertes de chaleur.

Sur un réseau donné, la hausse de l'écart de température permet d'augmenter la puissance de raccordement. À l'inverse, la performance du réseau est diminuée si l'écart de température n'est pas atteint. Il faut donc s'assurer que les stations de transfert de chaleur fonctionnent correctement et que l'écart de température nécessaire est atteint.

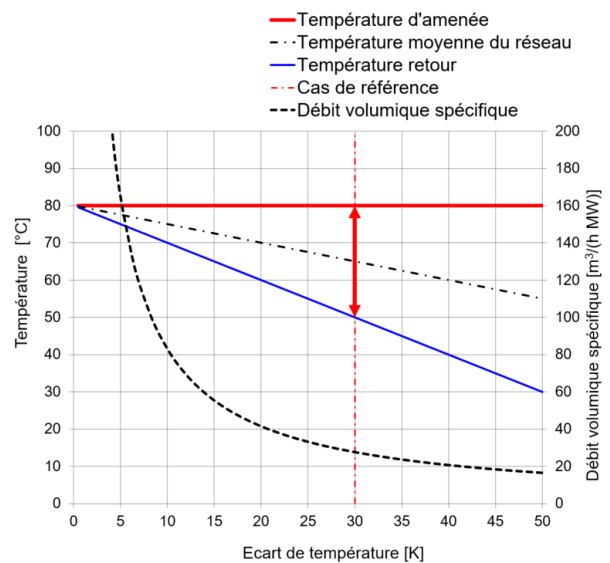


Fig. 1.2 Débit volumique spécifique en fonction de l'écart de températures entre l'amenée et retour (échelle à droite). Le débit spécifique correspond au débit nécessaire dans le cadre d'un réseau de chauffage à distance avec 1 MW à son entrée. Les températures d'amenée et de retour sont également indiquées pour une température d'amenée de 80°C et l'on a pris l'exemple d'un réseau présentant un écart de température de 30 K.

4. Le **niveau de température** du réseau affecte l'efficacité et les coûts de plusieurs façons. D'une part, en augmentant le niveau de température en conservant un écart de température constant, les pertes de chaleur du réseau augmentent et, d'autre part, l'efficacité du générateur de chaleur peut baisser. Cette conséquence indirecte sur la production de chaleur peut être nettement plus importante que la conséquence directe sur les rejets de chaleur; il faut tout particulièrement en tenir compte dans le cadre des utilisations suivantes:
 - a) pompes à chaleur et couplage chaleur-force avec procédé vapeur (turbines à vapeur ou ORC). Dans ce cas-là, la température d'amenée est le facteur essentiel, car l'augmentation de la température utile diminue le coefficient de performance de la pompe à chaleur ou le rendement électrique de la centrale

thermique.

b) chaudières à condensation. Dans ce cas-là, la température de retour est le facteur essentiel, car la récupération de chaleur de la condensation des gaz d'échappement ne peut être efficace que si la température reste nettement inférieure au point de condensation des gaz d'échappement.

- Etant donné que les **stations de transfert de chaleur** et la **consommation de chaleur** influent sur le fonctionnement du réseau et l'efficacité de la production de chaleur par le biais de la température de retour, il est indispensable de tenir également compte du type et du mode de fonctionnement du transfert de chaleur au niveau des consommateurs (c'est-à-dire des sous-stations) pour assurer une exploitation rentable du réseau de chauffage à distance. Les mesures susceptibles d'éviter les conséquences négatives sur le réseau et la production de chaleur consistent en l'intégration, dans les conditions techniques de raccordement ou dans le contrat de fourniture de chaleur, d'exigences relatives à un écart de température minimum ou à une température de retour maximum. La surveillance des températures du réseau permet également de prendre des mesures en cas de non-respect des valeurs calculées à la conception.

La rentabilité d'un réseau de chauffage à distance est donc déterminée par des facteurs divers et variés. Une analyse de l'influence des paramètres de conception sur la rentabilité montre qu'il est capital, afin d'optimiser les coûts de distribution de chaleur pour des températures et des puissances de raccordement données, que les conduites soient conçues en calculant le **plus petit diamètre techniquement admissible** [14]. La Fig. 1.3 représente ainsi l'évolution des coûts de distribution de chaleur en prenant pour hypothèse les points suivants:

- puissance de raccordement de 1 MW;
- longueur du tracé de 1 km;
- réseau fonctionnant toute l'année;
- consommateur de 2'000 heures d'exploitation à pleine charge par an;
- densité de raccordement de 2.0 MWh/(Trm a) à l'entrée du réseau. Un taux de pertes réseau de 10% correspond alors à une sortie de réseau de 1.8 MWh/(Trm a);
- température d'amenée de 80°C;
- écart de température de 30 K;
- annuités de 5.1% par an (30 ans, 3% par an);
- coûts de la chaleur à l'entrée du réseau de 6 ct/kWh;
- vitesse d'écoulement maximum conforme à la fiche technique 67 de l'ÖKL (Fig. 1.4, [120], ce qui correspond dans notre exemple à une perte de charge d'environ 200 Pa/m).

Les coûts de distribution de chaleur sont présentés en fonction du diamètre nominal et indiquent un minimum qui coïncide avec le diamètre nominal minimum admissible. Les coûts de distribution de chaleur minimum s'élevèrent à 2.6 centimes par kilowattheure de chaleur

fournie aux consommateurs. Une conception d'un diamètre nominal supérieur à celui nécessaire augmente le coût de la distribution de chaleur de 9%, et de deux diamètres nominaux, de 30%.

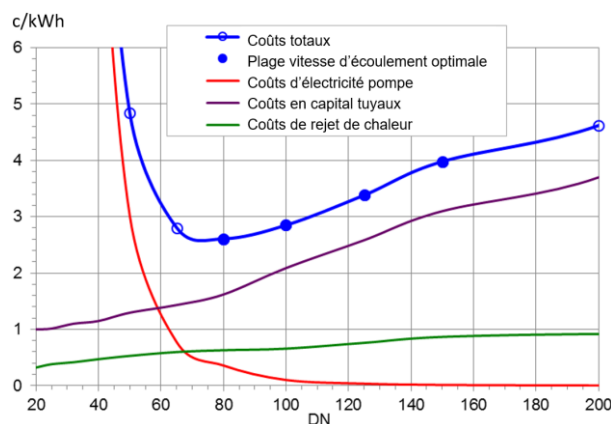


Fig. 1.3 Coûts de distribution de chaleur représentant les coûts totaux, divisés en charges financières et en coûts des rejets de chaleur et de l'électricité, en fonction du diamètre nominal [14]. Les symboles pleins indiquent le diamètre nominal admissible minimum et les trois dimensions supérieures.

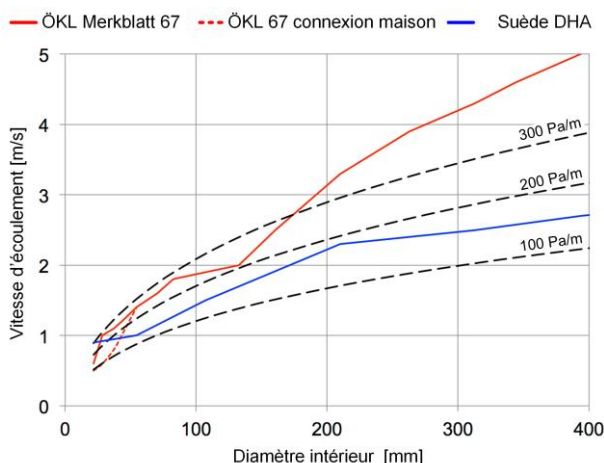


Fig. 1.4 Vitesse d'écoulement en fonction du diamètre de conduite (diamètre intérieur): recommandations en matière de vitesse d'écoulement d'après l'ÖKL (Merkblatt 67) [120] et la Swedish District Heating Association DHA [1]. Sont en outre indiquées les pertes de charge de 100, 200 et 300 Pa/m correspondant aux vitesses d'écoulement calculées [14].

Le plus petit diamètre nominal admissible est en effet déterminé par la vitesse d'écoulement maximum admissible, ce qui garantit un fonctionnement silencieux et sans cavitation (non admissible). La Fig. 1.4 présente les recommandations de l'ÖKL (fiche technique 67) [120] ainsi que de la Swedish District Heating Association DHA [1]. De plus, les vitesses d'écoulement représentées correspondent à une perte de charge de 100, 200 et 300 Pa/m [14]. Une étude pratique menée sur 52 réseaux de chauffage à distance révèle qu'environ

80% des lignes principales et partielles réalisées sont plus grandes qu'elles n'auraient réellement besoin de l'être [16]. Ce surdimensionnement correspond généralement à un, deux, parfois même quatre diamètres nominaux, et entraîne des pertes de chaleur et des coûts nettement supérieurs à ceux d'un réseau équipé de conduites dont le diamètre est le plus faible possible.

Autres facteurs importants: l'écart de température et le niveau de température. Un agrandissement de l'**écart de température** entraîne, pour un même diamètre de conduite, une réduction des pertes thermiques de distribution, comme le montre notre exemple dans la Fig. 1.5.

Comme le montre également la Fig. 1.5, une hausse de l'écart de température permet aussi d'utiliser des conduites de diamètre plus faible, entraînant une nouvelle diminution des pertes de chaleur et, dans le même temps, une nette diminution des investissements. De ce fait, les coûts de distribution de chaleur totaux peuvent être considérablement réduits en augmentant l'écart de température, comme le montre la Fig. 1.6. Enfin, un écart de température important pour une température d'amenée donnée conduit à une température de retour basse, augmentant également l'efficacité de la production de chaleur. Sur les installations déjà existantes aussi, l'écart de température peut être nettement amélioré; en effet, selon une étude pratique, de nombreux réseaux présentent une température de retour élevée [16]. Cela entraîne une hausse de la consommation d'énergie auxiliaire et peut également faire augmenter la consommation du générateur de chaleur.

Des **températures d'amenée** élevées provoquent une hausse des pertes de chaleur, et donc des coûts d'exploitation (Fig. 1.7). Tout en prévoyant un dimensionnement sur la base d'un diamètre minimum et donc optimisé des conduites, il faut toutefois garantir la bonne température du réseau lors de la future exploitation du système. Etant donné qu'un écart de température trop faible a pour conséquence la baisse de la puissance de raccordement, une optimisation côté consommateur de chaleur peut permettre de rehausser la puissance de raccordement d'un réseau existant si besoin est. Souvent, un simple réglage des sous-stations permet une amélioration; dans le cas contraire, il devient impératif de passer par un échangeur de chaleur plus grand.

Autre paramètre qui influe sur les rejets de chaleur et les coûts: l'**épaisseur d'isolation**. L'épaisseur d'isolation a des effets opposés à ceux du diamètre des conduites et de l'écart de température; elle réduit en effet les coûts d'exploitation grâce à une meilleure isolation thermique et augmente les investissements. Comme le montre la Fig. 1.8, la différence de pertes entre l'épaisseur d'isolation 1 (isolation minimum) et l'épaisseur d'isolation 2 (isolation moyenne) est très nette. C'est pour cette raison que l'épaisseur d'isolation 1 est pratiquement exclue pour tous les réseaux de chauffage à distance en Suisse. Dans l'exemple donné plus haut et pour le diamètre minimum, l'épaisseur d'isolation 2 entraîne des pertes d'environ 10.5%. Seule l'épaisseur d'isolation 3 permet d'atteindre la valeur cible de QM Chauffages au bois, à savoir 10% [21]. L'essentiel reste d'utiliser le diamètre le

plus faible possible ou, tout au plus, un diamètre nominal de plus.

Les principaux éléments ayant un impact sur la rentabilité des réseaux de chauffage à distance peuvent donc être résumés comme suit:

1. Les coûts d'investissement, les pertes de réseau et la consommation d'énergie auxiliaire du réseau de chauffage à distance sont déterminés par les paramètres suivants:
 - le **diamètre des conduites** (et donc le dimensionnement du réseau);
 - le **type de conduite** (matériau, réalisation);
 - l'**épaisseur d'isolation thermique**.
2. L'efficacité de la production de chaleur du réseau de chauffage à distance est déterminée par les paramètres suivants:
 - l'**écart de température**;
 - le **niveau de température** des températures d'amenée et de retour.

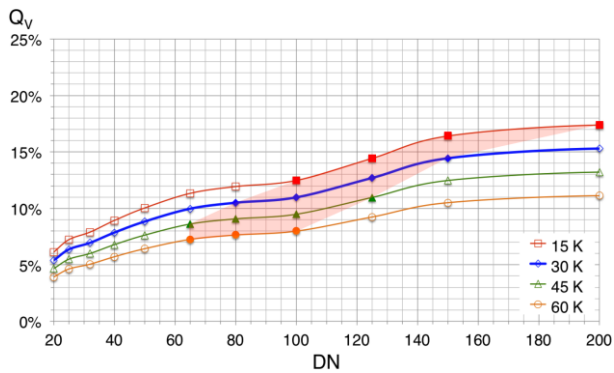


Fig. 1.5 Pertes de distribution de chaleur en fonction du diamètre nominal à différents écarts de température pour le réseau de chauffage à distance de la Fig. 1.3 [14] Zone indiquée: diamètre nominal à vitesse d'écoulement admissible.

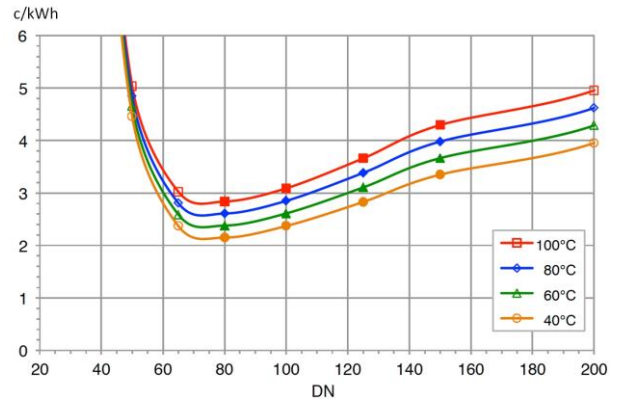


Fig. 1.7 Coûts de distribution de chaleur en fonction du diamètre nominal à différentes températures d'amenée dans le cas d'un écart de température de 30 K [14].

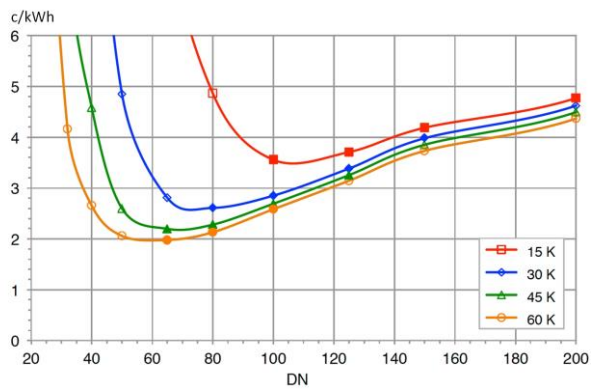


Fig. 1.6 Coûts de distribution de chaleur en fonction du diamètre nominal à différents écarts de température pour une température d'amenée de 80°C pour le réseau de chauffage à distance de la Fig. 1.3 [14].

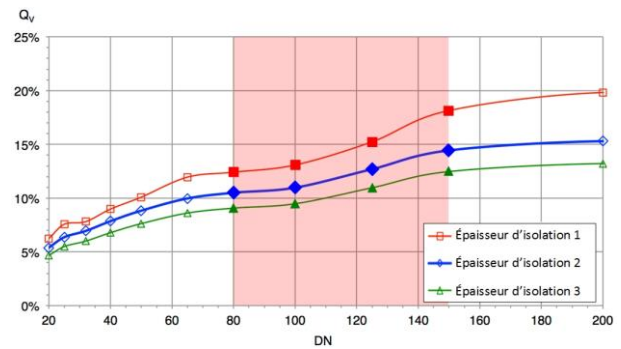


Fig. 1.8 Pertes de distribution de chaleur en fonction du diamètre nominal à différentes épaisseurs d'isolation [14]. Secteur coloré: vitesse d'écoulement admissible.

2 Fourniture de chaleur

Ce chapitre aborde les besoins de chaleur et les appels de puissance thermique dans les grandes lignes, et présente la répartition des courbes annuelles pour la charge de base et la charge de pointe. Il traite également des générateurs de chaleur les plus importants ainsi que de leur influence du fait de l'exploitation du réseau et de l'intégration d'accumulateurs de chaleur. Dans le cadre des besoins de chaleur, on distingue la chaleur industrielle et l'approvisionnement en chaleur des bâtiments. Les besoins de chaleur des bâtiments résidentiels regroupent ainsi la chaleur destinée au chauffage des locaux et celle destinée à la mise à disposition d'eau chaude.

2.1 Besoin de chaleur des consommateurs individuels

2.1.1 Chauffage des locaux

Les **besoins annuels en chaleur pour le chauffage des locaux** des nouvelles constructions sont calculés sur la base de la norme SIA 380/1 [78]. Celle-ci prend en compte les apports de chaleur internes générés par le rayonnement solaire, les personnes, les appareils électriques ainsi que d'autres sources. Pour les bâtiments existants, le calcul est généralement basé sur les consommations d'énergie antérieures, à savoir par exemple sur la consommation de mazout annuelle et le taux d'utilisation annuel du générateur de chaleur existant, en les divisant toutefois selon leur finalité, à savoir chauffage des locaux, eau chaude ou chaleur industrielle. Si aucune donnée fiable relative à la consommation antérieure ou la répartition entre chauffage des locaux, eau chaude et chaleur industrielle n'est disponible, il est par ailleurs possible d'effectuer des estimations ou des mesures.

Les **appels de puissance thermique standards pour le chauffage des locaux** de nouvelles constructions sont calculés selon la norme SIA 384.201 [82] qui, contrairement à la norme SIA 380/1, ne tient pas compte des apports de chaleur, étant donné que leur chronologie est impossible à prévoir et à contrôler. Pour les bâtiments existants, la meilleure méthode d'évaluation des appels de puissance thermique consiste à déterminer la **courbe caractéristique de charge** à l'aide de mesures, ce qui est particulièrement judicieux dans le cas de grands consommateurs et de chaleur industrielle [21]. Prendre ces mesures n'est toutefois réalisable que si l'on dispose d'une installation de production de chaleur fonctionnelle et de suffisamment de temps. En revanche, il n'existe que très peu de calculs fiables concernant les appels de puissance thermique, nombre des données disponibles étant basées sur des méthodes de calcul obsolètes. Manquent toutefois souvent au calcul de nouvelles données des plans détaillés et des informations quant à la structure des cloisons, ainsi que d'autres valeurs caractéristiques. C'est pour cette raison qu'on utilise très fréquemment une estimation des appels de puissance

thermique, basée sur la consommation de chaleur antérieure. On obtient les appels de puissance thermique maximum dans le cadre du chauffage des locaux en divisant les besoins en chaleur pour le chauffage par le nombre d'heures d'exploitation à pleine charge approprié. Le nombre d'heures d'exploitation à pleine charge dépend du climat, de la limite de chauffage, de l'utilisation des bâtiments (habitations ou autre) et des composantes non tributaires des conditions météorologiques.

Les mesures d'économie d'énergie qui se préparent peuvent influencer sur les besoins annuels en chaleur, les appels de puissance thermique et les températures requises, et doivent être prises en compte lors de la conception. Dans le cas des bâtiments, il est essentiel de minimiser la part du chauffage des locaux grâce à une amélioration de la technique du bâtiment, alors que les besoins en eau chaude ne sont pratiquement pas concernés. Ainsi le chauffage de l'eau chaude ne représentait-il dans les années 1970 que près de 10% des besoins de chaleur; il faut pourtant s'attendre à voir passer ce chiffre à 50%, comme l'explique le chapitre 2.4. La remise à neuf de bâtiments existants peut donc entraîner, pendant toute la durée d'exploitation d'un réseau de chauffage à distance, une réduction des besoins en chauffage des locaux et, avec le raccordement de nouvelles constructions, une réduction significative de la part du chauffage des locaux.

2.1.2 Eau chaude et chaleur industrielle

Les **besoins annuels en chaleur pour l'eau chaude** dans le cadre de nouvelles constructions se calculent généralement sur la base de conditions normales d'utilisation définies. Pour les bâtiments existants, le calcul est généralement basé sur la consommation d'énergie antérieure et sur une estimation ou une mesure de la part correspondant à l'eau chaude.

La **valeur moyenne** pour les **appels de puissance thermique pour l'eau chaude** en ce qui concerne les nouvelles constructions et les bâtiments existants correspond au besoin de chaleur pour l'eau chaude divisé par le nombre d'heures de chauffage annuel dans le cas d'une exploitation hivernale, ou divisé par 8760 heures annuelles dans le cas d'une exploitation permanente. La **valeur de pointe** des appels de puissance thermique pour l'eau chaude se calcule à partir de la puissance de raccordement du chauffe-eau. En Suisse, on utilise généralement des accumulateurs pour l'eau chaude sanitaire, et les chauffe-eaux (stations d'eau fraîche) sont rares; dans le cadre des bâtiments résidentiels, il suffit en règle générale de diviser les **besoins annuels en chaleur pour l'eau chaude** par 4000 à 6000 heures d'exploitation à pleine charge. On prend ainsi en compte une charge de pointe des appels de puissance thermique, charge de pointe environ deux fois plus élevée que la valeur moyenne à 8760 heures annuelles à puissance constante. Cela est indispensable, car la charge de pointe des besoins en eau chaude peut augmenter certains jours, étant donné qu'ils peuvent

dépendre notamment du jour de la semaine et de la saison.

Les **appels de puissance thermique moyens relatifs à la chaleur industrielle** s'obtiennent par la division du besoin de chaleur par le nombre d'heures annuelles d'exploitation du consommateur de chaleur industrielle, déterminées en règle générale par un compteur d'heures de marche. Pour la chaleur industrielle aussi, on tient compte d'une charge de pointe plus élevée si besoin est.

2.1.3 Température requise

La **température requise** est le niveau minimum requis de la température d'amenée et dépend de la façon dont le transfert de chaleur a été conçu, du mode de chauffage de l'eau et bien d'autres facteurs. La conception des radiateurs ou d'un système de chauffage par le sol ainsi que d'autres échangeurs de chaleur est très souvent basée sur les instructions du fabricant et est connue dans le cas de nouvelles constructions. Dans le cas de bâtiments existants, il est possible d'estimer la température requise sur la base de la consommation de chaleur actuelle (chauffage par radiateurs ou plancher chauffant, chauffe-eau, etc.). Il est toutefois recommandé d'effectuer des mesures de température chez les consommateurs de chaleur lorsque les températures extérieures sont basses, ainsi qu'une extrapolation des couples de valeurs mesurées (température d'amenée/de retour, température extérieure) aux valeurs calculées à la conception.

2.2 Besoin de chaleur total

Les enjeux listés ci-dessous peuvent prendre beaucoup d'importance lorsqu'il s'agit de déterminer les appels de puissance thermique de l'ensemble de l'installation à partir des données relatives aux consommateurs de chaleur individuels, et il est essentiel d'en tenir compte lors de la conception.

1. Les appels de puissance thermique de l'ensemble de l'installation sont le résultat d'un mélange de valeurs calculées avec une plus ou moins grande marge de sécurité ainsi que des valeurs réelles mesurées, sans marge de sécurité.
2. Les appels de puissance thermique standards pour le chauffage des locaux, conformément à la norme SIA 384.201, ont pour base une température ambiante standard et ne tiennent pas compte des apports de chaleur internes [82], tandis que les courbes caractéristiques de charge calculées par des mesures se basent sur des températures extérieures réelles et comprennent les apports de chaleur.
3. Un nombre d'heures d'exploitation à pleine charge est indispensable pour estimer, à partir des besoins de chaleur des bâtiments existants, les appels de puissance thermique pour le chauffage des locaux. Etant donné que ce nombre dépend de divers facteurs, tels que la courbe annuelle de la température extérieure sur le site d'installation, la température ambiante, la limite de chauffage et l'importance de la composante non tributaire des conditions météorologiques, son estimation reste relativement incertaine.
4. Les performances de chauffage nécessaires pour compenser un système de chauffage par intermittence (p. ex. chauffage des immeubles administratifs le lundi matin après une exploitation réduite durant le week-end) ne sont souvent pas prises en compte.
5. Les courbes caractéristiques de charge déterminées par métrologie peuvent être établies pour différents cas de charge, par régression de moyennes journalières jusqu'à des valeurs moyennes de 1 heure. Il faut cependant garder à l'esprit que les charges de pointe mesurées ne dépendent pas uniquement des consommateurs de chaleur, mais qu'elles sont également influencées par l'inertie du système ou le générateur de chaleur, qui peut éventuellement les limiter.
6. Les bâtiments existants présentent souvent une proportion considérable d'appels de puissance thermique non tributaires des conditions météorologiques et relatifs au chauffage des locaux pouvant atteindre 5 à 10%, en raison p. ex. d'une mauvaise isolation thermique, proportion qui apparaît sur la courbe caractéristique de charge comme un regain de puissance jusqu'à la limite de chauffage. Si les courbes caractéristiques de charge mesurées d'anciens bâtiments peuvent ainsi présenter de très importants appels de puissance thermique tributaires des conditions météorologiques, ce point est presque totalement évincé dans le cas de nouvelles constructions.
7. Comme le mentionne le chapitre 2.1, une bonne conception des appels de puissance thermique en matière d'eau chaude est indispensable, car la charge de pointe due à des besoins non constants sur la durée peut se révéler nettement supérieure à la valeur moyenne déterminée au cours de l'année.

Pour pouvoir déterminer le plus justement possible les chiffres relatifs à l'ensemble de l'installation à partir d'une combinaison de calculs et de valeurs réelles mesurées, il faut tout d'abord se poser les questions suivantes:

1. Comment tenir compte des apports de chaleur dans le cas de nouvelles constructions?
2. Quel est le nombre d'heures d'exploitation à pleine charge approprié qui permet de déterminer les appels de puissance thermique relatifs au chauffage des locaux, sur la base des besoins en chaleur antérieurs des bâtiments existants?
3. Comment tenir compte de la proportion d'appels de puissance thermique non tributaires des conditions météorologiques et relatifs au chauffage des locaux?

2.3 Appels de puissance thermique

Afin de pouvoir estimer (approximativement) la conception de la production de chaleur, on utilise la courbe annuelle des appels de puissance thermique. Celle-ci est basée sur:

1. la **courbe caractéristique de charge de l'ensemble de l'installation**, d'après la Fig. 2.1;
2. la **courbe annuelle de la température extérieure**, d'après la Fig. 2.2.

Les informations contenues dans ces deux graphiques sont réunies sur la Fig. 2.3 avec la **courbe annuelle des appels de puissance thermique**.

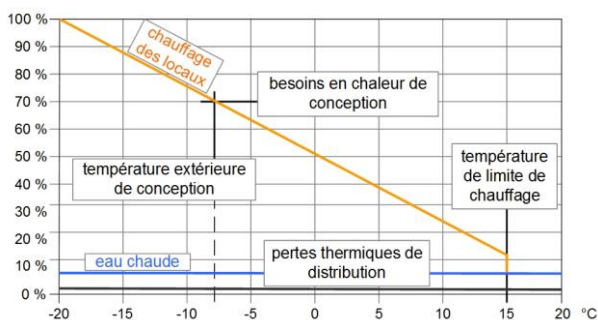


Fig. 2.1 Superposition des courbes caractéristiques de charge relatives aux appels de puissance thermique de l'ensemble de l'installation, en fonction de la température extérieure [21].

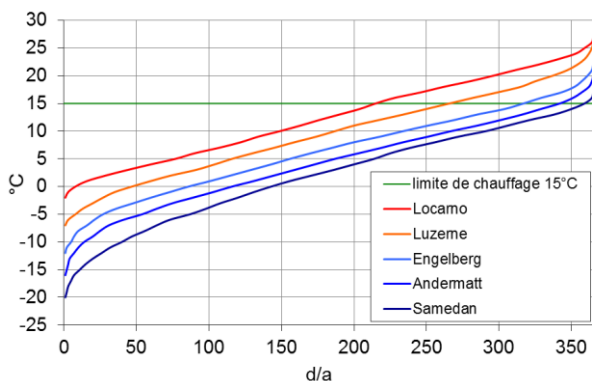


Fig. 2.2 Moyenne journalière des températures extérieures sur 10 ans, de 2002 à 2011, pour différents sites en Suisse [21]. Une limite de chauffage de 15°C est représentée en vert.

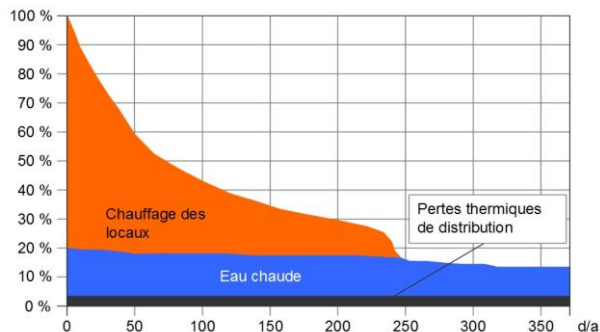


Fig. 2.3 Courbe annuelle caractéristique des appels de puissance thermique.

Cette représentation des appels de puissance thermique sous forme de courbe caractéristique de charge (Fig. 2.1), avec des températures extérieures les plus réalistes possible, est le fruit de mesures réelles prises lors de la rénovation et l'extension de grandes installations techniques du bâtiment. Elle nécessite en effet d'être basée sur des décisions qui n'ont pas été prises au hasard, telles que le choix de la limite de chauffage. L'avantage de ce mode de représentation est que les résultats des calculs concernant la consommation d'énergie antérieure et ceux des mesures peuvent être réunis clairement sur un même graphique.

La courbe caractéristique de charge de l'ensemble de l'installation s'obtient en superposant les courbes caractéristiques de charge individuelles du chauffage des locaux, de l'eau chaude, de la chaleur industrielle et des pertes thermiques de distribution. Elle permet ainsi de déterminer les appels de puissance thermique de l'ensemble de l'installation requis à une température de conception donnée.

La courbe annuelle de la température extérieure représente, sous forme de graphique, la fréquence cumulée de la température extérieure en nombre de jours par an. La Fig. 2.2 permet par exemple de lire que, sur 10 ans, la moyenne journalière de température extérieure à Lucerne est inférieure à 4°C pendant un total de 100 jours. Pour les températures extérieures, c'est la valeur moyenne sur 24 heures qui doit être utilisée, tandis que pour les appels de puissance thermique, cela peut être une moyenne journalière (p. ex. pour les bâtiments résidentiels) ou une valeur de pointe (p. ex. pour une banque).

La courbe annuelle des appels de puissance thermique pour l'ensemble de l'installation est également le résultat d'une superposition de plusieurs courbes annuelles concernant le chauffage des locaux, l'eau chaude, la chaleur industrielle et les pertes thermiques de distribution. La Fig. 2.3 montre par exemple les courbes annuelles du chauffage des locaux, de l'eau chaude et des pertes thermiques de distribution.

Dans notre exemple, les choses sont simplifiées et les rejets de chaleur du réseau sont supposés constants tout au long de l'année, étant donné que l'écart entre les températures d'amenée et de retour ainsi que la température du sol autour de la conduite de chauffage à

distance ne varient que très légèrement au cours de l'année.

La deuxième composante représente les besoins en chaleur pour l'eau chaude, également sur toute l'année; dans notre exemple, on constate une légère baisse des besoins en été. Toutefois, dans un souci de simplicité, les besoins en eau chaude sont généralement supposés constants tout au long de l'année.

La troisième composante représente les besoins en chauffage des locaux, à savoir la part la plus importante de l'ensemble des besoins de chaleur.

2.4 Besoins en matière d'anciennes et nouvelles constructions

Le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire des bâtiments représentent une part importante de la consommation de chaleur sur les réseaux de chauffage à distance. Ces éléments répondent à un standard de construction et sont donc les courbes annuelles des bâtiments résidentiels représentées ci-dessous. Ces dernières correspondent à un standard de construction typique de 1970, en comparaison avec un standard de construction moderne. Le standard moderne est symbolisé par l'année 2020 et correspond environ à un bâtiment conforme au standard Minergie de 2015 ou au modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC), dont l'introduction est prévue pour 2020 [71]. Toute comparaison peut être basée sur les valeurs du Tableau 2.1. Celui-ci présente l'indicateur des appels de puissance thermique en W/m^2 ainsi que l'indice de dépense d'énergie en kWh/m^2a , de même que les heures d'exploitation à pleine charge qui en résultent pour les besoins en chauffage des locaux, les besoins en eau chaude et leur total. Le bâtiment de 1970 présente des appels de puissance thermique en conditions d'application ($-7^\circ C$, Zurich) de $85 W/m^2$, tandis qu'ils ne sont que de $25 W/m^2$ pour le bâtiment de 2020.

En ce qui concerne les courbes annuelles, pour la ville de Zurich, la conception d'après [21] a été basée sur des températures journalières moyennes. La Fig. 2.4 présente ainsi les courbes annuelles correspondant à un bâtiment datant de 1970. Le 1er graphique présente la valeur absolue des appels de puissance thermique en W/m^2 . Prenons l'exemple d'un bâtiment d'une surface de référence énergétique de $1000 m^2$; la valeur numérique correspond ainsi aux appels de puissance thermique en kW. Sur le 2e graphique, on constate que les appels de puissance thermique sont normalisés à 100% afin de permettre la comparaison de l'évolution par rapport aux nouvelles constructions présentées à droite. La Fig. 2.5 montre ainsi le comportement d'un bâtiment résidentiel conforme au standard de 2020.

La comparaison des graphiques montre que l'amélioration du standard de construction permet de faire chuter la limite de chauffage et de raccourcir la période de chauffage d'une cinquantaine de jours. En effet, les

besoins énergétiques en matière de chauffage des locaux et d'eau chaude passent, selon le Tableau 2.1, de $205 kWh/m^2a$ à $40 kWh/m^2a$, soit une diminution de 80% de leur valeur initiale. En revanche, la part de l'eau chaude sur la puissance de raccordement passe de 6% pour les constructions anciennes à 20% pour les nouvelles. La part de l'eau chaude sur la consommation d'énergie passe même d'un peu moins de 10% à 50%, ce qui est également envisagé par d'autres études [43].

Tableau 2.1 Indicateurs de dépense de puissance et d'énergie des bâtiments résidentiels (exemple) avec les standards de 1970 et de 2020 pour le chauffage des locaux (CL) et l'eau chaude (EC) par m^2 de surface de référence énergétique et une conception à $-7^\circ C$ (Zurich).

	Unité	1970	2020
Besoins en chauffage des locaux	W/m^2	80	20
	kWh/m^2a	185	20
Heures d'exploitation à pleine charge CL	h/a	2300	1000
Besoins en eau chaude	W/m^2	5	5
	kWh/m^2a	20	20
Heures d'exploitation à pleine charge EC	h/a	4000	4000
Besoins CL+EC (= 100%)	W/m^2	85	25
	kWh/m^2a	205	40
Heures d'exploitation à pleine charge CL+EC	h/a	2400	1600
Limite de chauffage	$^\circ C$	15	10

Le fait que la part de la charge de base soit beaucoup plus élevée dans une nouvelle construction que dans une ancienne est avantageux pour l'exploitation du réseau de chauffage à distance en été. Toutefois, étant donné que le nombre d'heures d'exploitation à pleine charge pour le chauffage des locaux dans une nouvelle construction baisse d'un peu moins de la moitié par rapport à une ancienne, le chauffage des locaux et l'eau chaude dans une nouvelle construction représentent malgré tout une utilisation moyenne faible, avec 1600 heures d'exploitation à pleine charge par an au lieu de 2400, ce qui n'est pas un avantage pour un réseau de chauffage à distance. Lors de la conception d'un réseau de chauffage à distance, il est donc essentiel de tenir compte du fait que la structure des bâtiments a une influence significative sur les besoins de chaleur, et que ceux-ci peuvent varier suite à la rénovation d'un bâtiment exploitant un réseau de chauffage à distance. Lorsque la production de chaleur diminue, le pourcentage de pertes thermiques de distribution et des charges financières augmente, tandis que la densité de raccordement est réduite. Pour les zones d'approvisionnement accueillant des bâtiments labellisés Minergie, une puissance de raccordement faible n'est pas un avantage pour le chauffage à distance, et la part de l'eau chaude, et donc celle de la charge de base, est nettement plus élevée en été.

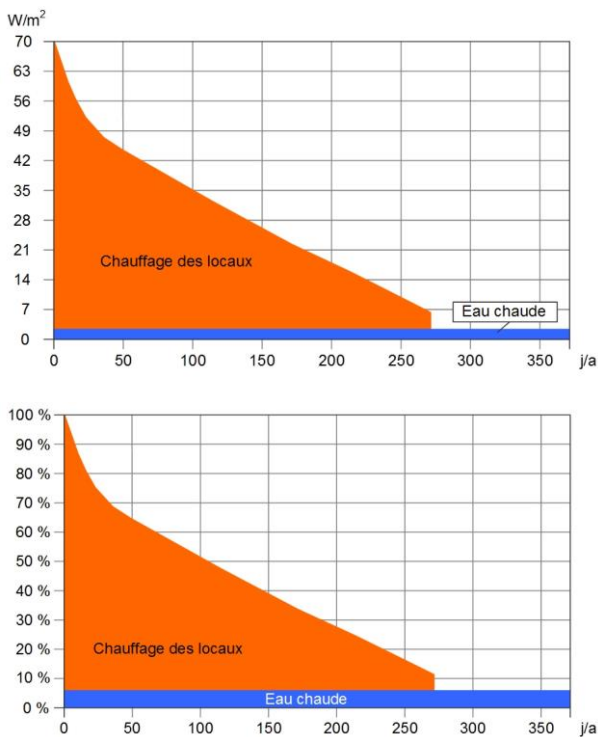


Fig. 2.4 Courbe annuelle des appels de puissance thermique d'un bâtiment résidentiel de 1970 pour l'eau chaude et le chauffage des locaux (conception selon [21] pour Zurich, moyenne journalière de température -7°C).
 1er graphique: appels de puissance thermique en [W/m²].
 2e graphique, en pourcentages, avec 100% = valeur maximum.

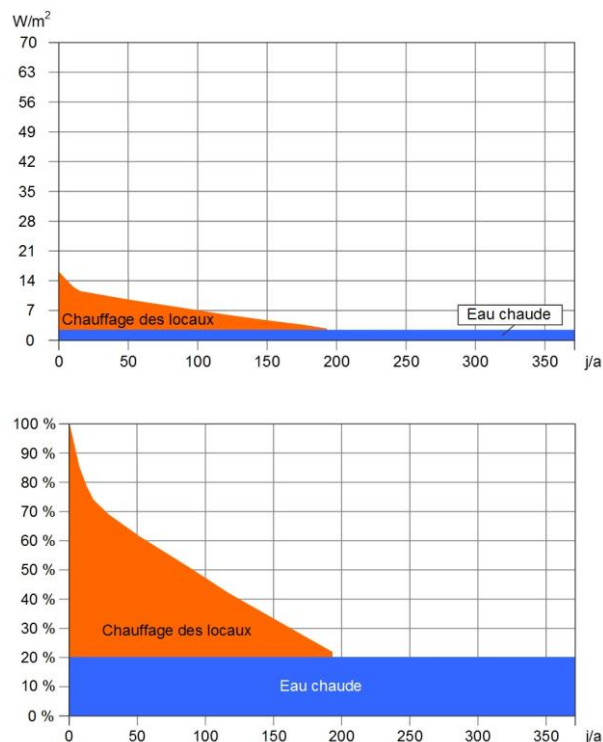


Fig. 2.5 Courbe annuelle des appels de puissance thermique d'un bâtiment résidentiel de 2020 pour l'eau chaude et le chauffage des locaux (conception selon [21] pour Zurich, moyenne journalière de température -7°C).
 1er graphique: appels de puissance thermique en [W/m²].
 2e graphique, en pourcentages, avec 100% = valeur maximum.

2.5 Conception du générateur de chaleur

Il faut déterminer, lors de la conception du générateur de chaleur, si les besoins de chaleur doivent être couverts par un ou par plusieurs générateurs et si la puissance sera répartie entre une ou plusieurs sources d'énergie.

Dans le cas d'un seul générateur de chaleur, celui-ci doit être prévu pour la puissance thermique requise la plus élevée. Cela suppose, pour alimenter les bâtiments, que le générateur de chaleur puisse directement couvrir une plage de charge suffisamment grande, ou indirectement, et ce par l'intégration d'un accumulateur de chaleur. En ce qui concerne l'alimentation d'eau chaude sanitaire en été, la puissance minimum dans le cadre d'anciennes constructions n'est que d'environ 6%, alors qu'elle s'élève tout de même à 20% dans le cas de nouvelles constructions; pour le réseau de chauffage à distance, dans les deux cas, les pertes thermiques de distribution restent ensuite encore à couvrir. La plage de puissance qui en résulte couvre donc souvent un facteur 5, voire

plus, selon le consommateur et le réseau. Afin de couvrir cette plage de puissance, il est bien souvent plus avantageux d'utiliser au moins deux générateurs de chaleur. Dans le cas de systèmes automatiques de chauffage au bois, cela permet d'améliorer la marche de l'installation et de réduire les émissions et les rejets de chaleur de la chaudière, ainsi que les dépenses d'énergie auxiliaire et d'entretien.

Les courbes annuelles superposées correspondant aux besoins de chaleur servent de base à la conception, et sont déterminées par calcul, mesure ou comparaison avec des réseaux de chauffage à distance semblables, comme le décrit le chapitre 2.3. La plage sous la courbe annuelle représente les besoins annuels en chaleur, qui, comme le montre la Fig. 2.6, peuvent être répartis en deux catégories: charge de base et charge de pointe. La charge de base se caractérise par un grand nombre d'heures de marche, et la charge de pointe par les appels de puissance thermique dépassant la charge de base, avec un faible nombre d'heures de marche.

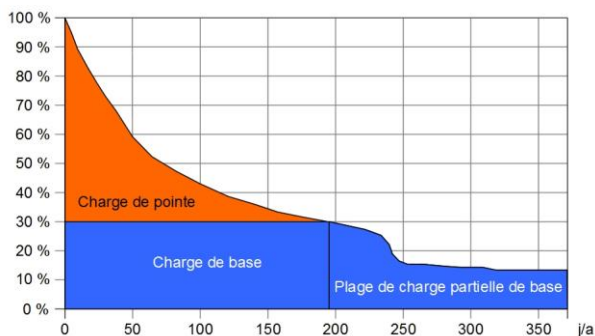


Fig. 2.6 Répartition de la courbe annuelle en charge de base et charge de pointe.

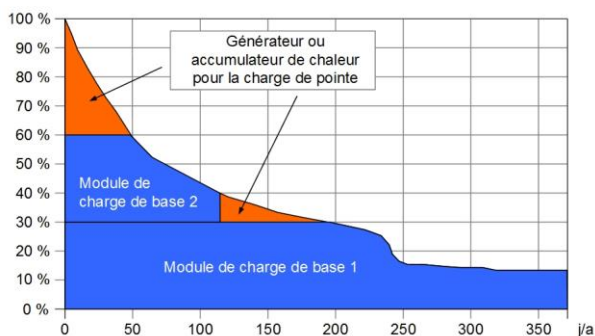


Fig. 2.7 Couverture de la charge de base par plusieurs modules de charge de base.

La part rentable de la puissance de charge de base est souvent comprise entre 10% et 60% de la puissance maximum, ce qui permet en règle générale de couvrir entre 50% et 90% de l'intégralité des besoins annuels en chaleur [43]. La Fig. 2.6 indique une part de 30%, ce qui peut par exemple correspondre à une centrale de couplage chaleur-force (CCF) alimentée au biogaz et pour laquelle l'utilisation estivale ne nécessite qu'une puissance réduite ou qu'une exploitation partielle de la chaleur (dans la mesure où cela est autorisé).

Si, pour des raisons techniques ou économiques, le ou les générateurs de chaleur de charge de base ne peuvent être exploités que de façon limitée en charge partielle, le générateur de chaleur de charge de pointe est alors souvent également utilisé pour couvrir la charge minimum, comme on peut le voir par exemple sur la Fig. 2.7. Cela peut notamment s'avérer utile dans le cadre de systèmes automatiques de chauffage au bois, car un fonctionnement à faible charge peut entraîner une augmentation des émissions du système, notamment en cas d'utilisation de combustibles humides.

Dans le cas d'unités plus grandes, il est également possible d'augmenter la part couverte par la source d'énergie de la charge de base grâce à des systèmes multimodules permettant d'obtenir une redondance supplémentaire (Fig. 2.7).

Autre moyen de plus en plus utilisé: l'intégration d'accumulateurs de chaleur de grandes dimensions. Elle permet en effet un lissage des appels de puissance thermique et s'accompagne ainsi d'une augmentation de la charge de base. En cas de couplage chaleur-force,

l'accumulateur de chaleur permet également une exploitation non continue du courant, augmentant ainsi le rendement de l'alimentation électrique et réduisant également les pointes de courant [43].

Si une source de rejets de chaleur peut être exploitée pour l'approvisionnement en chaleur, les rejets de chaleur seront alors d'abord utilisés dans le but de couvrir la charge de base. Cela concerne également les rejets de chaleur des centrales thermiques (CCF) qui sont en grande partie exploitées grâce à la chaleur (dans la mesure du possible). Si aucun rejet de chaleur ne peut être exploité, on utilise souvent pour la charge de base des technologies à fortes charges financières et à faibles coûts d'exploitation. Cela concerne particulièrement les systèmes automatiques de chauffage au bois, qui présentent des charges financières élevées et des coûts de combustibles relativement faibles. De plus, les installations solaires thermiques présentent elles aussi des charges financières élevées et de faibles coûts d'exploitation. L'utilisation conjointe de chaleur solaire se limite donc généralement à la charge de base et ne peut, dans ce cadre, couvrir qu'une partie du chauffage complémentaire.

Jusqu'à maintenant, on utilisait souvent des chaudières au gaz naturel ou au mazout, pour couvrir la charge de pointe comme pour alimenter les réserves. Pour que le chauffage à distance devienne nettement plus avantageux en termes d'émissions de CO₂ que les systèmes de chauffage décentralisés au mazout ou au gaz, il est indispensable de maintenir la proportion de charge de pointe fossile à un faible niveau, et ce grâce à une conception appropriée. En règle générale, la part des générateurs de chaleur de charge de base peut s'élever à 80% voire 90% des besoins annuels en chaleur.

Pour résumer, les conditions présentées dans le Tableau 2.2 sont ainsi relativement typiques en ce qui concerne l'association de générateurs de chaleur de charge de base et de charge de pointe.

Tableau 2.2 Caractéristiques typiques des générateurs de chaleur de charge de base et de charge de pointe.

Charge de base	Charge de pointe
Exploitation à charge nominale ou partielle dans une plage de charge limitée	Exploitation plus fréquente dans une plage de charge partielle
Utilisation intense ou grand nombre d'heures d'exploitation à pleine charge	Utilisation réduite ou faible nombre d'heures d'exploitation à pleine charge
Alternances de charge lentes et peu nombreuses	Alternances de charge fréquentes et rapides
Peu de cycles de démarrage et d'arrêt	Cycles de démarrage et d'arrêt fréquents

2.6 Evaluation de la chaleur et de l'électricité

2.6.1 Rendement et taux d'utilisation

Le **rendement** d'une installation désigne le rapport entre l'énergie utile et l'énergie fournie. Dans des conditions stationnaires ou pseudo-stationnaires, sans dénatura-tion par effet de stockage, il peut aussi être défini comme le rapport entre la puissance utile momentanée et la puissance fournie momentanée, en kW/kW.

La notion de rendement, dans le présent manuel, est utilisée pour une **valeur** de puissance **momentanée** ou pour une valeur déterminée sur une **courte période d'observation**, en heures. Le rendement mécanique d'un moteur à un point de charge spécifique et le rendement d'une chaudière fonctionnant en continu dans des conditions stationnaires à puissance constante en sont de bons exemples. Un rendement ainsi déterminé s'applique soit à un point de charge soit à un cycle de fonctionnement particulier. Prenons pour exemple de cycle de fonctionnement la combustion d'une chaudière à bois manuelle, qui prend plusieurs heures. Au cours de cette combustion, l'exploitation n'est pas stationnaire, mais les dénaturations dues à l'effet de stockage sont compensées par le retour aux conditions thermiques initiales. En principe, sur un moteur à combustion, on observe également au moins un cycle, et donc au moins quatre sur un moteur à quatre temps. La durée de cycle d'un moteur est toutefois beaucoup plus courte, ce qui explique pourquoi le fonctionnement semble pseudo-stationnaire même avec une résolution temporelle d'une seconde.

Pour les évaluations se faisant sur une période plus longue, on parle alors de taux d'utilisation. Le **taux d'utilisation** est défini comme étant le rapport entre la puissance utile cumulée sur une période d'observation prolongée et la puissance fournie cumulée sur cette période d'observation. La période d'observation choisie est souvent d'un an, et la valeur ainsi déterminée est alors appelée **taux d'utilisation annuel**. Le taux d'utilisation annuel correspond alors au rapport entre les énergies produite et fournie en un an, en (kWh/a)/(kWh/a).

Dans le cas de pompes à chaleur, il faut toutefois distinguer les valeurs momentanées des puissances cumulées sur une période prolongée. Ainsi, le coefficient de performance d'une pompe à chaleur désigne le rapport entre la puissance thermique utile et la puissance électrique fournie, en valeur momentanée, alors que le coefficient de performance annuel décrit le rapport entre la production de chaleur annuelle et la consommation d'électricité annuelle.

Tandis que les données relatives au rendement ne concernent souvent qu'un seul groupe d'éléments, comme un moteur ou une chaudière, les taux d'utilisation sont souvent employés pour une installation complète ou un système intégral. Le terme de taux d'utilisation peut en effet couvrir une plage plus large en ce qui concerne le bilan. Pour garantir la pertinence de l'évaluation, chaque

limite de bilan doit être définie avec précision. Dans le cas d'installations de production d'électricité, cela signifie par exemple de tenir compte de la consommation propre d'électricité. La production d'électricité au niveau du générateur correspond ainsi à la production brute, de laquelle on déduit la consommation propre d'électricité afin d'obtenir la production nette. Les valeurs brute et nette peuvent toutefois être utilisées pour le rendement comme pour le taux d'utilisation.

2.6.2 Rendement global

Le **rendement global** désigne la somme du rendement électrique et du rendement correspondant à l'exploitation de la chaleur. En matière de chauffage à distance, ce sont principalement les installations thermiques à turbines à vapeur ou les ORC qui sont utilisées pour produire de l'électricité. Ces processus de vapeur permettent d'obtenir un rendement électrique maximum lorsque la condensation du fluide se fait à la température la plus basse possible. De plus, les rejets de chaleur peuvent par exemple être dissipés dans l'environnement par le biais d'une tour de refroidissement. En revanche, si les rejets de chaleur sont destinés à être exploités, la condensation doit se faire à une température plus élevée, ce qui réduit le rendement électrique. Afin de pouvoir distinguer les différents types d'utilisation, les rendements en matière de production de chaleur et d'électricité sont représentés dans la Fig. 2.8.

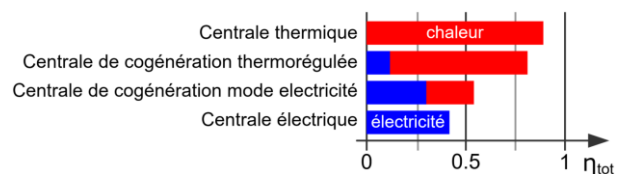


Fig. 2.8 Rendement global et parts de la chaleur (en rouge) et de la production d'électricité (en bleu) pour les centrales thermiques, les centrales de cogénération et les centrales électriques. Le comportement qualitatif est représenté dans ce graphique, correspondant par exemple aux types d'installations suivants (de haut en bas):
 Centrale à bois 0.5 – 10 MW_q
 Centrale de cogénération à bois 0.5 MW_{el},
 Centrale de cogénération à bois 20 MW_{el},
 Centrale à charbon 500 MW_{el}.

Dans une **centrale électrique** classique, les rejets de chaleur ne sont jamais exploités. Le rendement électrique est en effet maximum et correspond aussi au rendement global. Du fait des pertes qu'entraîne la conversion de la chaleur en électricité, le rendement global est inférieur à celui des installations exploitant la chaleur.

Une **centrale de cogénération** est une installation thermique destinée au couplage chaleur-force. Avec les systèmes à vapeur, l'exploitation de la chaleur fait baisser le rendement électrique. Si la centrale de cogénération fonctionne avec **primauté de l'électricité**, une partie de la chaleur est alors exploitée, ce qui entraîne une réduction du rendement électrique, tandis

que le reste est dissipé dans l'environnement sous forme de rejets de chaleur. S'il s'agit d'une exploitation avec **primauté de chaleur (thermorégulée)**, l'intégralité des rejets de chaleur est utilisée et le rendement électrique est d'autant plus réduit. Notons que plus la chaleur est exploitée, plus le rendement global augmente.

Une **centrale thermique** ne produit que de la chaleur, et obtient le rendement global le plus élevé possible.

Pour des valeurs momentanées ou des observations sur de courtes périodes, les conditions de **rendement** d'une centrale de cogénération sont les suivantes:

$$\eta_q = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{Q}_{Br}}$$

$$\eta_{el} = \frac{P}{\dot{Q}_{Br}}$$

$$\eta_{tot} = \frac{\dot{Q}_K + P}{\dot{Q}_{Br}} = \eta_q + \eta_{el}$$

η_q = rendement pour production de chaleur [-]

η_{el} = rendement pour production d'électricité [-]

η_{tot} = rendement global [-]

P = puissance de la production d'électricité [kW]

\dot{Q}_K = puissance de la chaudière exploitable sous forme de chaleur [kW]

\dot{Q}_{Br} = puissance thermique fournie par le combustible [kW]

Pour une centrale électrique classique:

$$\eta_q = 0$$

$$\eta_{tot} = \eta_{el}$$

Pour une centrale thermique:

$$\eta_{el} = 0$$

$$\eta_{tot} = \eta_q$$

Pour une chaudière, le rendement de la production de chaleur équivaut au rendement de chaudière:

$$\eta_q = \eta_K$$

η_K = rendement de chaudière [-]

Pour une chaudière destinée aux processus de vapeur, une partie de la puissance de la chaudière est en revanche exploitée pour produire de l'électricité, avec $\eta_{el} > 0$. Dans ce cas:

$$\eta_q < \eta_K$$

Les mêmes conditions s'appliquent au **taux d'utilisation** pour des évaluations sur des périodes d'observation prolongées. Celles-ci sont décrites par l'exemple du **taux d'utilisation annuel** et identifiées par l'indice a:

$$\eta_{q,a} = \frac{Q_{K,a}}{Q_{Br,a}}$$

$$\eta_{el,a} = \frac{E_{el,a}}{Q_{Br,a}}$$

$$\eta_{tot,a} = \frac{Q_{K,a} + E_{el,a}}{Q_{Br,a}} = \eta_{q,a} + \eta_{el,a}$$

$\eta_{q,a}$ = taux d'utilisation annuel pour production de chaleur [-]

$\eta_{el,a}$ = taux d'utilisation annuel pour production d'électricité [-]

$\eta_{tot,a}$ = taux d'utilisation global annuel [-]

$Q_{K,a}$ = production de chaleur annuelle [kWh/a]

$E_{el,a}$ = production d'électricité annuelle [kWh/a]

$Q_{Br,a}$ = énergie fournie par le combustible par an [kWh/a]

Pour une chaudière, le taux d'utilisation annuel de la chaleur équivaut au taux d'utilisation annuel de la chaudière:

$$\eta_{q,a} = \eta_{K,a}$$

$\eta_{K,a}$ = taux d'utilisation annuel de la chaudière [-]

Afin de pouvoir atteindre une exploitation totale élevée du combustible, deux types d'application sont possibles:

- soit l'on recherche un rendement électrique élevé et l'on n'exploite alors pas la chaleur, ou uniquement partiellement; ce type de centrale peut fonctionner avec primauté de l'électricité et également contribuer à l'alimentation électrique lorsque les besoins de chaleur baissent. Un bon exemple est celui des centrales à cycle combiné au gaz naturel, qui atteignent un rendement électrique d'environ 60% à des puissances de plus de 500 MW_{el};
- soit l'on utilise des installations à faible rendement électrique et l'on exploite l'intégralité de ses rejets de chaleur; il s'agit-là principalement de centrales avec primauté de chaleur (thermorégulée), conçues pour répondre aux besoins de chaleur de charge de base dans les centrales de cogénération. En Suisse, la plage de puissance de ces centrales est très généralement inférieure à 10 MW_{el}. Les centrales de cogénération à bois avec turbines à vapeur de même que les ORC en sont de bons exemples.

2.6.3 Rendement global pondéré

L'électricité présentant des valeurs plus élevées que la chaleur, un **facteur de pondération pour l'électricité** a été introduit afin de permettre la comparaison entre la production de chaleur et la production d'électricité, et le **rendement global pondéré** d'une centrale de cogénération a été défini comme suit:

$$\eta_{tot,gew} = \frac{\dot{Q}_K + f_{el} \cdot P}{\dot{Q}_{Br}} = \eta_q + f_{el} \cdot \eta_{el}$$

$\eta_{tot,gew}$ = rendement global pondéré [-]

f_{el} = facteur de pondération pour l'électricité [-]

On peut ainsi déduire le **taux d'utilisation global pondéré**. Celui-ci est indiqué par l'indice a, qui correspond au taux d'utilisation global pondéré sur un an. Les modèles conçus peuvent toutefois s'appliquer à d'autres périodes d'observation, raison pour laquelle nous utiliserons ici le terme de taux d'utilisation global pondéré, afin de simplifier. Ainsi, nous avons:

$$\eta_{tot,a,gew} = \frac{Q_{K,a} + f_{el} \cdot E_{el,a}}{Q_{Br,a}} = \eta_{q,a} + f_{el} \cdot \eta_{el,a}$$

$\eta_{tot,a,gew}$ = taux d'utilisation global pondéré [-]

Pour $f_{el} = 1$, nous avons: $\eta_{tot,gew} = \eta_{tot}$ et $\eta_{tot,a,gew} = \eta_{tot,a}$

La pondération de l'électricité est efficace dès lors que l'on utilise une valeur de f_{el} supérieure à 1. Le rendement global pondéré peut alors également atteindre des valeurs supérieures à 1 et ne doit pas être comparé à des valeurs non pondérées.

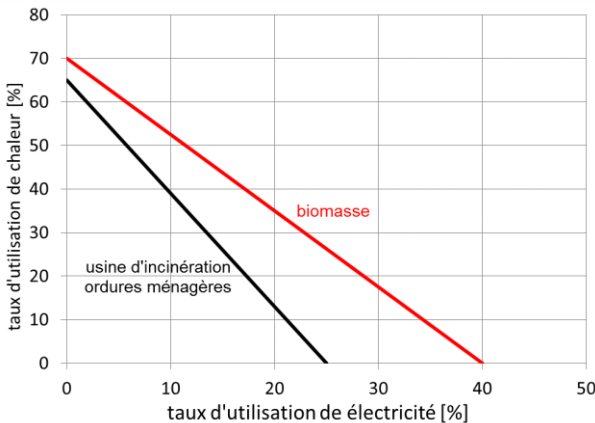


Fig. 2.9 Exigence minimum requise par l'Ordonnance sur l'énergie pour les processus de vapeur (OEnE Appendice 1.5, al. 3.3 (UIOM) et al. 6.3, let. a (biomasse)[75]) dans le cadre de la rétribution à prix coûtant du courant injecté pour l'électricité issue de la biomasse (Fig. 2.9, Article 7a LEnE, biomasse Annexe. 1.5 OEnE). La période d'observation est d'un an et permet d'évaluer la production brute d'électricité.

La pondération de l'électricité est également efficace avec les exigences minimales en matière de **rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC)** des installations thermiques [75]. La Fig. 2.9 indique ainsi l'exigence minimum requise par l'Ordonnance sur l'énergie

(OEnE) [76], dans le cadre de la RPC, pour les processus de vapeur alimentés par biomasse ou installés dans des usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) [76]. Pour les centrales exploitant la biomasse, les exigences sont en effet nettement plus élevées que dans le cadre des UIOM.

Il est indiqué dans les [76] que les taux d'utilisation doivent être évalués sur une période d'un an et que l'intégralité de la production d'électricité doit être évaluée sans déduction de la consommation propre. Les exigences en matière de RPC correspondent donc au taux d'utilisation global pondéré de la production d'électricité brute sur un an.

L'exigence de l'OEnE pour la **biomasse** est la suivante:

$$\eta_{tot,a,gew} = (\eta_{q,a} + f_{el} \cdot \eta_{el,a}) \geq 70\%$$

avec $f_{el} = 70\%/40\% = 1.75$.

Pour les **UIOM**:

$$\eta_{tot,a,gew} = (\eta_{q,a} + f_{el} \cdot \eta_{el,a}) \geq 65\%$$

avec $f_{el} = 65\%/25\% = 2.60$.

L'OEnE introduit alors une pondération de l'électricité, avec un facteur de 1.75 ou de 2.60.

La Fig. 2.10 montre l'impact du rendement électrique et du facteur de pondération sur le taux d'utilisation global pondéré pour une centrale thermique, une centrale de cogénération et une centrale électrique. Pour le facteur de pondération, on suppose pour la biomasse une valeur de base conforme à l'OEnE, 1.75, ainsi que le double de cette valeur, 3.5. Les valeurs aux taux d'utilisation réalisables sur installation réelle sont indiquées en gras, et couvrent des taux d'utilisation électrique de 10% à 40% pour la centrale de cogénération et de 30% à 60% pour la centrale électrique. On suppose que la centrale de cogénération fonctionne avec primauté de chaleur.

Le graphique montre qu'avec un facteur de pondération de 3.5 pour l'électricité, une centrale de cogénération et une centrale électrique atteignent un taux d'utilisation global pondéré supérieur à celui d'une centrale thermique. Avec un facteur de pondération de 1.75, les centrales thermiques et les centrales de cogénération atteignent des valeurs globales similaires, tandis qu'une centrale électrique n'atteint des valeurs identiques voire supérieures qu'à partir d'un rendement électrique de 50%.

Le facteur de pondération pour l'électricité peut également être utilisé pour évaluer les consommateurs et ainsi être comparé au coefficient de performance ou au coefficient de performance annuel (COP annuel) d'une pompe à chaleur, ou être interprété comme tel. Pour d'autres applications que celles d'une pompe à chaleur, telles que la consommation de courant d'un système de récupération de chaleur, la pondération peut généralement être interprétée comme un facteur d'amplification électrothermique (AET).

Pour le **coefficient de performance** ϵ (COP), s'appliquent à une pompe à chaleur:

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{P_{el}} = \frac{\dot{Q}_{Zu} + P_{el}}{P_{el}} = 1 + \frac{\dot{Q}_{Zu}}{P_{el}}$$

\dot{Q}_{Nutz} = puissance thermique utile [kW]

\dot{Q}_{Zu} = puissance thermique fournie [kW]

P_{el} = puissance électrique fournie [kW]

Le coefficient de performance théorique entre deux niveaux de température est appelé **coefficient de performance de Carnot** ϵ_C , car ce processus correspond à un cycle de Carnot de droite à gauche. La Fig. 2.16 montre l'impact des températures sur le coefficient de performance de Carnot. Il s'applique :

$$\epsilon_C = \frac{T}{T - T_U}$$

T = température supérieure (chaleur utile) [K]

T_U = température inférieure (chaleur fournie) [K]

Le rapport entre les coefficients de performance réel et théorique est appelé niveau de qualité η_{WP} et atteint des valeurs typiques de $\eta_{WP} = \epsilon/\epsilon_C = 0.4 - 0.55$.

Pour le **coefficient de performance annuel (COP annuel / JAZ)**, on retrouve:

$$JAZ = \frac{Q_{Nutz}}{E_{el}} = \frac{Q_{Zu} + E_{el}}{E_{el}}$$

Q_{Nutz} = chaleur utile produite par an [kWh/a]

Q_{Zu} = chaleur fournie par an [kWh/a]

E_{el} = consommation électrique annuelle [kWh/a]

A titre de comparaison avec un cas de référence utilisant des systèmes de chauffage à combustible et décentralisés, on peut envisager un scénario dans lequel une centrale de cogénération serait alimentée par le combustible déjà utilisé par des systèmes de chauffage. La chaleur peut alors être utilisée dans le cadre du chauffage à distance par exemple, tandis que l'électricité sert à alimenter des pompes à chaleur décentralisées, qui utilisent la chaleur environnante comme source de chaleur et qui l'élèvent au niveau de la température utile. Le flux énergétique de ce scénario est représenté dans un diagramme de Sankey, sur la Fig. 2.11. Pour la centrale de cogénération, on suppose un taux d'utilisation de 60% pour la chaleur et de 20% pour l'électricité, ce qui correspond à un taux d'utilisation global de 80%. Si l'on suppose un coefficient de performance annuel de 3.5 pour les pompes à chaleur et que celui-ci est interprété comme un facteur de pondération pour l'électricité, on obtient un rendement global pondéré de 130%. La différence entre le rendement global pondéré de 130% et le rendement global de 80% correspond à la puissance de 50% fournie par la chaleur environnante, puissance qui n'est pas comptée comme une charge.

Le même combustible peut donc être utilisé pour produire 1.625 fois la chaleur utile (130%/80%). Cette même chaleur utile peut aussi être générée par 61.5% du combustible (1/1.625), permettant ainsi de réaliser

une économie d'énergie primaire de 38.5%. L'exemple présenté sur la Fig. 2.11 est également pris comme exemple sur la Fig. 2.10.

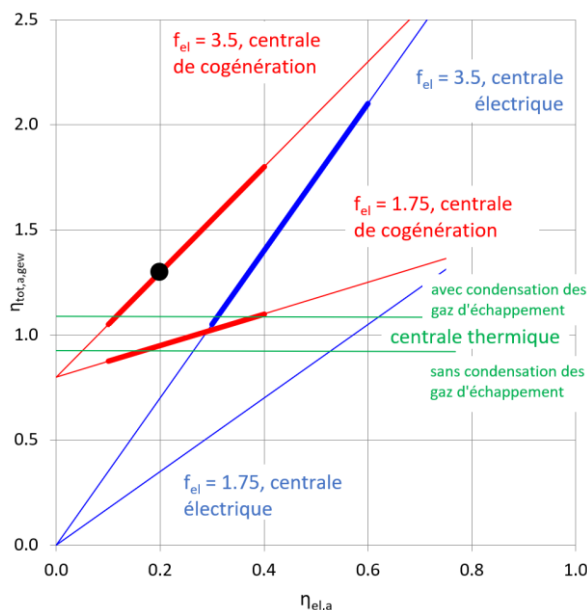


Fig. 2.10 Taux d'utilisation global pondéré pour $f_{el} = 1.75$ et $f_{el} = 3.5$ pour quatre scénarios: 1. centrale thermique avec et sans condensation ; 2. centrale de cogénération fonctionnant avec primauté de chaleur, avec $\eta_{tot} = 0.8$; 3. centrale électrique (sans exploitation des rejets de chaleur). Le point noir correspond à la Fig. 2.11.

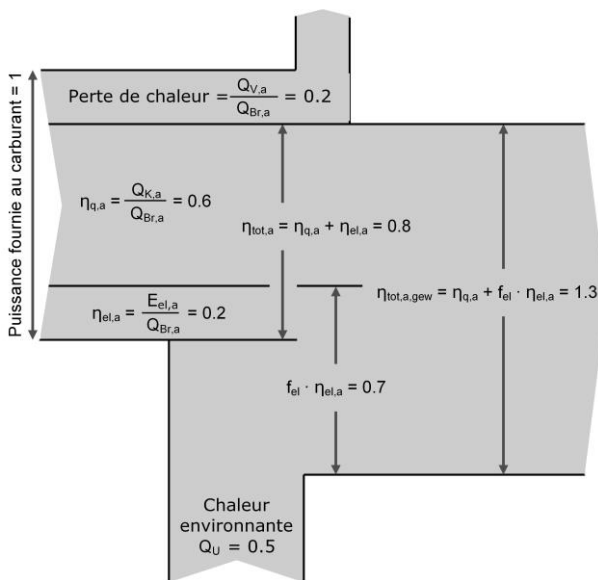


Fig. 2.11 Diagramme de Sankey pour le scénario d'une centrale de cogénération dont la production d'électricité est utilisée pour faire fonctionner des pompes à chaleur. Hypothèses: centrale de cogénération: $\eta_{el,a} = 20\%$, $\eta_{q,a} = 60\%$. Pondération pour l'électricité: $f_{el} = \text{COP annuel} = 3.5$. Dans cet exemple, on obtient un taux d'utilisation global pondéré de 130%, représenté par un point sur la Fig. 2.10.

2.7 Générateur de chaleur et potentiel de chauffage à distance

Les centrales de production de chaleur sont appelées **centrales thermiques**, ou **centrale de chauffage à distance** dans le cas d'un réseau de chauffage à distance. Lorsque la centrale produit à la fois de l'électricité et de la chaleur utile, on appelle cela une **centrale de cogénération**. Les sources de chaleur servant au chauffage à distance sont généralement les processus et sources d'énergie ci-dessous.

- Chaudières automatiques à bois d'énergie: copeaux de bois bruts, résidus de bois, vieux bois et granulés de bois. Ces chaudières à bois permettent, au sein d'un réseau de chauffage à distance, de couvrir la charge de base ou l'ensemble des besoins de chaleur.
- Les chaudières au gaz naturel ou au mazout sont souvent utilisées afin de couvrir la charge de pointe; quant aux nouveaux réseaux de chauffage à distance, l'alimentation en combustibles purement fossiles n'est pas autorisée.
- Les rejets de chaleur d'un niveau de température supérieur à 70°C directement exploitable, issus de processus industriels, peuvent en théorie être exploités dans le cadre du chauffage à distance, mais d'autres applications sont en règle générale plus avantageuses, telles que leur intégration aux processus internes.
- Rejets de chaleur de centrales de couplage chaleur-force si supérieurs à 70°C. Les turbines à vapeur des UIOM, les centrales de cogénération à bois, les ORC à bois et les centrales de couplage chaleur-force (CCF) alimentées au gaz naturel ou au biogaz en sont de bons exemples. Etant donné que les charges financières des centrales thermiques sont importantes, il est indispensable que le nombre d'heures d'exploitation à pleine charge soit élevé. Les centrales thermiques disposent souvent d'une chaudière de charge de pointe, tandis que les rejets de chaleur utilisés pour le chauffage à distance permettent de couvrir la charge de base.
- Pompes à chaleur pour l'exploitation de la chaleur environnante des rejets de chaleur à basse température. La chaleur environnante est par exemple extraite de l'air, ou au moyen de sondes géothermiques. Les rejets de chaleur à basse température sont notamment générés par les eaux usées, qui peuvent être utilisées comme source de chaleur dans les bâtiments individuels, ou de manière centralisée via les canalisations. L'eau purifiée issue des stations d'épuration des eaux usées (STEP) possède également un fort potentiel en ce qui concerne les rejets de chaleur à basse température.
- On utilise également des installations solaires thermiques comme chauffage complémentaire sur les réseaux de chauffage à distance. En règle générale, on intègre un accumulateur de chaleur dimensionné pour la journée, et l'installation solaire est conçue pour répondre aux besoins en eau chaude en été (pour des raisons économiques). Cela permet ainsi d'atteindre un taux de couverture solaire inférieur à 10% de la production totale de chaleur pour les bâtiments résidentiels existants, mais il serait possible d'atteindre des valeurs nettement plus élevées dans le cadre de nouvelles constructions. L'intégration d'installations solaires thermiques dans les centrales de chauffage à distance n'est encore que peu répandue en Suisse, car les coûts de production de chaleur restent jusqu'à présent souvent plus élevés que les coûts marginaux des autres formes de production de chaleur.
- Dans les régions pourvues de couches rocheuses chaudes à une faible profondeur, il est également envisageable, en théorie, d'avoir directement recours à la géothermie pour le chauffage à distance. En Suisse, il n'existe toutefois que très peu de couches rocheuses de ce type, ce qui explique pourquoi la géothermie à faible profondeur s'est jusqu'à présent limitée en grande partie à la mise à disposition de rejets de chaleur à basse température pour les pompes à chaleur. En revanche, si on utilise la géothermie profonde et des niveaux de température plus élevés, la production d'électricité par un processus thermique figure au premier plan et permet d'exploiter les rejets de chaleur dans le cadre du couplage du chauffage à distance.

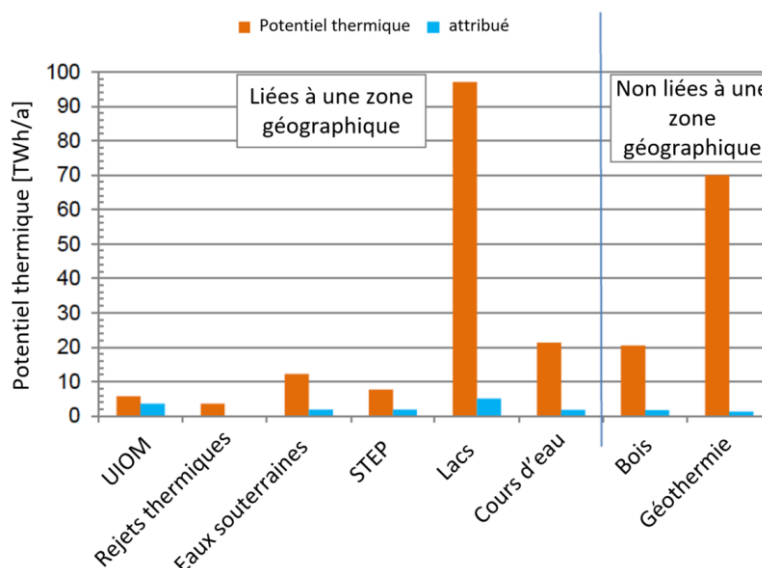


Fig. 2.12 Potentiel de chaleur de différentes sources (en orange), et potentiel «attribué» pouvant être réparti en 2050 aux besoins existants via le chauffage à distance pour 4.5 ct/kWh max. [19].

Le potentiel des sources de chaleur les plus importantes pour les réseaux de chauffage à distance a été développé en Suisse en 2014 et une répartition géographique en clusters de 100 mètres par 100 mètres (hectares) a été mise en place. Le potentiel que les rejets de chaleur des UIOM, les rejets de chaleur industriels, les eaux souterraines, les rejets de chaleur des STEP, les lacs, les cours d'eau, le bois d'énergie et la géothermie représentent a été pris en note. Le potentiel de chaleur est représenté en orange sur la Fig. 2.12. Celle-ci ne comprend pas le potentiel de l'énergie solaire thermique, de même qu'elle ne tient pas compte de la source de chaleur que représente l'air ambiant, étant donné que ces deux éléments présentent principalement un intérêt pour les pompes à chaleur décentralisées.

En supposant que la consommation de chaleur des bâtiments et celle des industries diminuent respectivement de 50% et de 20% d'ici à 2050, le potentiel de couverture des besoins restants a été estimé sur la base de la situation géographique et est ainsi nommé potentiel «attribué» au chauffage à distance. Cela n'est valable qu'en partant de l'hypothèse selon laquelle la distribution de chaleur entraîne des coûts de 4.5 ct/kWh max., ce que l'on peut considérer comme intéressant sur le plan économique. Sur la Fig. 2.12 sont représentés, en bleu, ces potentiels attribués, qui sont également détaillés dans le Tableau 2.3.

L'enquête révèle que l'eau des lacs et la géothermie représentent, et de loin, le potentiel global le plus important. Parmi les différents potentiels attribués, c'est l'eau des lacs qui est la plus intéressante, avec 29%, suivie des UIOM, avec 21%. À l'exception des rejets de chaleur industriels, dont la valeur affiche zéro en raison d'une base d'attribution insuffisante, toutes les sources d'énergie présentent un potentiel de 10 à 11% du potentiel de chauffage à distance.

Tableau 2.3 Répartition des sources de chaleur attribuées, avec distinction entre exploitation directe et exploitation par pompes à chaleur (PAC), chiffres tirés de [19]. *La valeur correspondant aux rejets de chaleur est nulle, car elle ne peut être basée sur aucune donnée d'attribution géographique.

Exploitation	Source	Source de chaleur	TWh/a	%
Directe	Bois	Bois	1.7	10
	Rejets de chaleur	Ordures (UIOM)	3.6	21
		Rejets de chaleur* (industrie)	0	0
PAC	Rejets de chaleur	STEP	1.9	11
	Environnement	Lacs	5.1	29
		Cours d'eau	1.8	10
		Nappes Eaux phréatiques;	1.9	11
		Géothermie	1.7	10
Total			17.0	100
Total exploitation directe			5.3	31
Total exploitation par pompes à chaleur			11.7	69
Total eau chaude et chauffage des locaux en 2050			45	100
Potentiel de chauffage à distance attribué			17	38

Le potentiel de chauffage à distance attribué total est de 17 TWh/a pour des besoins calculés de 45 TWh/a pour l'année 2050, permettant ainsi de couvrir jusqu'à 38% de l'ensemble des besoins de chaleur concernant le chauffage des locaux et l'eau chaude. Sur ce potentiel attribué, 69% correspondent aux sources d'énergie à basse température exploitées au moyen de pompes à chaleur, dans le cadre du chauffage à distance. Il faut cependant noter qu'exploiter ce potentiel nécessite d'augmenter la production d'électricité en conséquence.

2.8 Production de chaleur pure (centrales thermiques)

2.8.1 Chaudières à bois

Si jusqu'il y a quelques années, des chaudières à combustibles encore purement fossiles étaient parfois utilisées pour le chauffage à distance, les engagements environnementaux l'interdisent désormais aux nouvelles installations. On utilise souvent des chaudières à biomasse pour remplacer les foyers à combustibles fossiles actuels et construire de nouveaux réseaux de chauffage à distance. Jusqu'à présent, on employait principalement du bois d'énergie, car s'approvisionner en bois est relativement simple et que celui-ci présente les meilleures propriétés de combustible parmi les différents types issus de la biomasse. Toutefois, comme le bois d'énergie ne peut remplacer qu'une partie de la production de chaleur fossile, une fois le potentiel épuisé, l'intérêt pour d'autres combustibles issus de la biomasse se développera (tels que les résidus issus de l'agriculture ou de la transformation des aliments).

Les techniques et les chaînes de distribution en matière de **bois d'énergie** sont bien établies aujourd'hui; on utilise avant tout dans le cadre du chauffage à distance des copeaux de bois bruts, des résidus de bois et du vieux bois, mais également des granulés de bois [24]. Cependant, les différents types exigent parfois des techniques bien différentes en matière de stockage, de transport et de combustion, et doivent également répondre à des exigences juridiques et de construction différentes. La législation régit tout particulièrement les émissions polluantes des gaz d'échappement, avec l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) [25], et l'élimination des cendres [26], avec l'Ordonnance sur les déchets.

Aujourd'hui, l'ensemble des types de bois d'énergie représentent près de 37'200 TJ/a, soit environ 4.1% de la consommation d'énergie totale suisse. La consommation de bois d'énergie peut encore être augmentée d'environ 50%, ce qui permettrait au bois de couvrir environ 6% de la consommation actuelle, voire de la couvrir d'autant plus si la consommation future devait baisser.

Il ne faut pas oublier, lors de la conception de l'installation, que dans le cas de **copeaux de bois bruts** en provenance directe de la forêt, leur forte teneur en eau doit être prise en compte. L'exploitation de copeaux de bois bruts humides nécessite un foyer adapté et n'est possible qu'à partir d'un certain volume. Cela limite également la possibilité d'une alternance de charge rapide et d'un fonctionnement en charge partielle. Les foyers adaptés aux copeaux de bois humides conviennent donc surtout pour couvrir la charge de base. En cas de stockage de copeaux de bois humides, du dioxyde de carbone (CO₂) peut se former du fait de la fermentation. Celui-ci descend en raison de la densité plus élevée de l'air; des mesures de protection des personnes s'avèrent donc indispensables (aération par

exemple). Les restrictions évoquées pour les copeaux de bois bruts s'appliquent également aux résidus de bois humides, tels que les écorces dans les scieries. De plus, l'écorce présente toutefois une teneur en cendres plus élevée et ses morceaux sont plus longs, ce qui établit d'autres exigences en matière de systèmes de transport et de combustion.

Les **résidus de bois** issus de la deuxième transformation de l'industrie du bois (tels que la menuiserie, la charpenterie, l'ameublement et la fabrication de cuisines) peuvent contenir des additifs tels que de la colle ou de la peinture, en fonction de l'utilisation qui en a été faite. Par ailleurs, la taille des résidus peut varier, passant du copeau fin au morceau grossier, élément qui doit également être pris en compte. Sont également particulièrement délicates la manipulation et la combustion de combustibles sous forme de poussière, qui présentent des risques d'explosion et de blessure corporelle et requièrent des systèmes de combustion spécifiques. La préparation de pellets ou un briquetage sur site se révèle souvent indispensable avant de pouvoir utiliser des poussières combustibles.

Le **vieux bois** provient de vieux meubles, de matériaux d'emballage et de bâtiments démolis dont l'origine et la composition sont généralement inconnues, ce qui explique pourquoi on considère généralement qu'il est contaminé par des métaux lourds et d'autres substances étrangères. L'exploitation du vieux bois n'est donc autorisée que dans les installations certifiées conformes à l'OPair, qui répondent à des exigences accrues en matière d'épuration des gaz d'échappement et de marche de l'installation.

Bien que pour ce faire, il existe des installations sophistiquées, et ce pour tous les types de bois d'énergie, il faut tenir compte de leurs spécificités en matière de stockage, de technique de combustion et de marche, comme cela est précisé dans la publication QM Chauffages au bois [21]. L'idéal est donc souvent d'utiliser un foyer à poussée inférieure pour les combustibles à faible teneur en cendres et à teneur modérée en eau, tandis qu'en cas de forte teneur en cendres et/ou en eau, on utilise généralement un foyer à grille d'avancement, conformément à Fig. 2.13.

Les foyers à poussée inférieure sont généralement utilisés pour des plages de puissance allant jusqu'à 1 MW environ, et les foyers à grille jusqu'à 20 MW maximum. Pour les puissances dépassant les 10 MW, il est également possible d'avoir recours à des foyers à lit fluidisé, qui permettent de rehausser quelque peu le rendement et de réduire les émissions de gaz brut, en augmentant légèrement la consommation d'énergie auxiliaire.

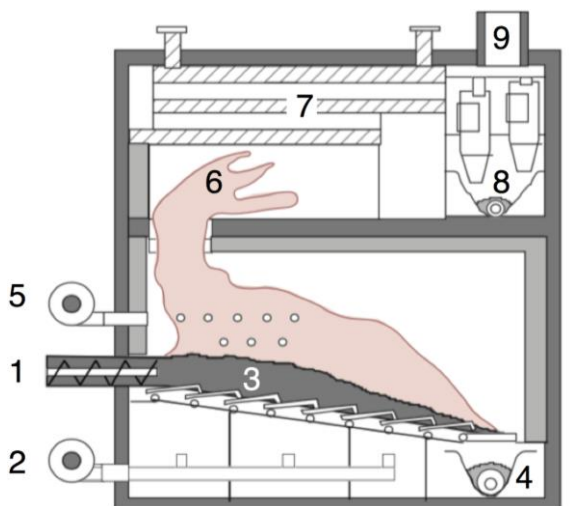


Fig. 2.13 Principe d'un foyer à grille d'avancement pour les copeaux de bois bruts et autres types de bois d'énergie [27]. 1 approvisionnement en combustible, 2 air primaire, 3 grille d'avancement avec lit de combustible, 4 extraction des cendres, 5 air secondaire, 6 chambres de postcombustion, 7 chaudière, 8 multicyclones en guise de préséparateur pour grosses poussières, 9 gaz d'échappement.

Afin de respecter les valeurs limites d'émission de poussières fines, les systèmes automatiques de chauffage au bois sont équipés de séparateurs de poussières. Dans le cas de combustibles humides, on utilise généralement des séparateurs électriques, et pour les combustibles secs, des filtres en tissu.

Comme on peut le voir sur la Fig. 2.15, une centrale à bois est composée d'un stock de combustible, d'une chaufferie ainsi que de dispositifs techniques, et demande donc beaucoup de place. Elle s'accompagne également de charges financières élevées; dans le cas de systèmes automatiques de chauffage au bois, pour des raisons économiques, on cherche donc à exploiter à pleine charge les heures de fonctionnement dédiées à couvrir la charge de base.

Les charges financières spécifiques aux centrales à bois présentent d'importantes économies d'échelle, surtout avec des puissances de moins de 1 MW voire 2 MW, comme le montre la Fig. 2.14. L'un des facteurs de coût les plus importants est celui du stockage du combustible. En règle générale, les entrepôts se révèlent être la solution la moins chère; toutefois, dans le cas des nouvelles constructions, il peut également être avantageux d'intégrer des silos enterrés qui ne font que légèrement augmenter les coûts, tandis qu'en ajouter plus tard revient très cher. En raison de la place que demande le stockage du combustible, il est très important que son approvisionnement soit sûr tout au long de l'année, permettant ainsi d'imaginer et de concevoir la capacité de stockage nécessaire pour quelques jours durant la période la plus froide. L'approvisionnement en bois d'énergie des centrales thermiques doit impérativement s'accompagner d'une bonne élimination des cendres, qui sont généralement récupérées par le fournisseur de bois d'énergie puis éliminées convenablement.

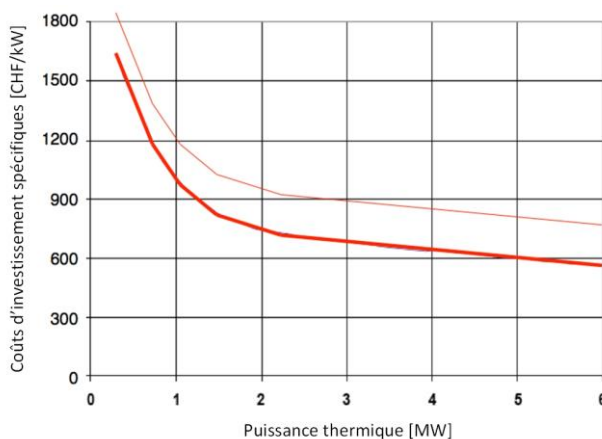


Fig. 2.14 Coûts d'investissement spécifiques pour les centrales à bois automatiques (dont stockage du combustible et chaufferie) en fonction de la puissance thermique. Les valeurs basses sont valables dans des conditions structurelles favorables, pour le stockage du combustible et la chaufferie.

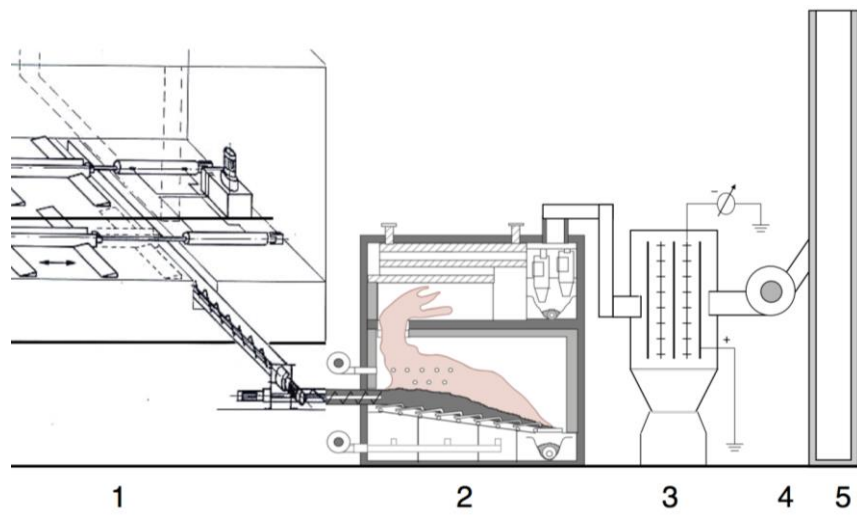


Fig. 2.15 Centrales à bois avec chauffage automatique: 1 stockage de combustible avec extraction, 2 chaudière, 3 séparateur de poussières fines (séparateur électrique dans cet exemple), 4 ventilateur d'extraction pour gaz d'échappement, 5 cheminée [27].

Tableau 2.4 Pouvoir calorifique et densité d'énergie pour le stockage de différents combustibles. Pour les copeaux de bois, on suppose une teneur en eau typique (masse d'eau par masse de bois humide) de 30%. La densité de stockage représente la masse par volume de stockage, correspondant pour les copeaux de bois à la densité apparente. La densité d'énergie correspond à la teneur en énergie par volume de stockage.

Combustible		Teneur en eau % poids	Pouvoir calorifique kWh/kg	Densité de stockage kg/m ³	Densité d'énergie kWh/m ³	Volumes de stockage (mazout = 1)
Copeaux de bois	Epicéa	30%	3.5	200	700	13
	Hêtre	30%	3.3	270	900	11
Granulés de bois		10%	4.9	650	3200	3
Mazout		0%	11.8	850	10'000	1

Une des alternatives aux copeaux de bois dans le cadre de la production de chaleur est celle des **granulés de bois**. Comme le montre le comparatif (Tableau 2.4), les granulés de bois ne nécessitent qu'un quart de l'espace nécessaire au stockage des copeaux de bois. Bien que l'encombrement reste plus important qu'avec le mazout, il est souvent plus intéressant si l'on doit changer de système de chauffage d'opter pour un système à granulés de bois plutôt que pour un système à copeaux de bois. En ce qui concerne le stockage, il faut toutefois noter que les granulés de bois dégagent du monoxyde de carbone (CO), ce qui peut présenter un risque de suffocation dans les entrepôts d'une certaine taille. Il est donc indispensable de prévoir une bonne ventilation des grands entrepôts et de les surveiller. On note également d'autres différences par rapport aux copeaux de bois bruts. Etant donné que les granulés de bois présentent un faible taux d'humidité et des propriétés homogènes, ils conviennent également aux petits foyers de combustion. Leur coût de fabrication les rend cependant plus coûteux que les copeaux de bois bruts, ce qui justifie généralement que d'autres types de bois d'énergie soient utilisés pour couvrir la charge de base dans les centrales de chauffage à distance. Afin de remplacer

complètement les ressources énergétiques fossiles, il pourrait être envisagé, à l'avenir, de remplacer les chaudières à mazout ou à gaz par des chaudières à granulés, pour l'été et pour la charge de pointe.

Etant donné que des copeaux de bois humides peuvent ne pas garantir de bonnes conditions d'exploitation s'ils sont utilisés dans de petits foyers de combustion et qu'ils ne peuvent pas non plus être utilisés pour la saison d'été dans les grandes installations (ou alors de façon limitée), il existe depuis quelques années des copeaux de bois à faible taux d'humidité et à faible teneur en cendres. Ces copeaux de bois sont obtenus par séchage technique et tamisage des particules fines; ils sont appelés «**plaquettes de qualité**». QM Chauffages au bois distingue ainsi dans sa FAQ 36 plaquettes de qualité fines et plaquettes de qualité grossières, cette catégorie n'étant recommandée que pour les installations dont la puissance est supérieure à 100 kW [28].

Puisque le bois exploité de façon durable en Suisse ne permet une augmentation de l'exploitation du bois d'énergie que de 50% à 100%, il est important de s'intéresser de plus en plus aux **autres biocombustibles**. Il est par exemple possible de se tourner vers

les résidus **issus de l'agriculture ou de la transformation des aliments**, tels que la paille et les résidus céréaliers. Ces éléments présentent une teneur élevée en cendres de même qu'en azote, en soufre, en potassium, en chlore et autres composants. Conséquences: grands volumes de cendres, encrassement accru et formation de dépôt, émissions de poussières et d'oxydes d'azote plus importantes. Leur utilisation en tant que combustible impose donc des exigences plus élevées en matière de technique de combustion et de marche de l'installation. En outre, peuvent également être exploités les résidus tels que les farines animales et les boues d'épuration séchées, pour lesquels la priorité lors du recyclage porte sur l'hygiène et la sécurité. Si ce genre de produits est en effet amené à être utilisé à l'avenir dans le cadre de la production d'énergie, la construction et l'exploitation des installations qui y sont adaptées doivent toutefois satisfaire à des exigences élevées et sont très souvent limitées au secteur de l'industrie alimentaire ou à celui de l'élimination des déchets.

La **biomasse humide**, telle que le lisier issu de l'agriculture, les boues d'épuration et les déchets de cuisine solides, n'est pas adaptée à une exploitation directe en chaudière. Cependant, ces résidus peuvent être réutilisés comme substrat pour la **méthanisation**. On utilise des installations de méthanisation décentralisées dans les exploitations agricoles, installations qui sont en règle générale relativement imposantes pour des raisons de coût. On utilise également des installations de méthanisation centralisées plus grandes, souvent conçues à des fins de co-fermentation de résidus liquides (tels que les boues d'épuration et le lisier) et de résidus solides (issus de la restauration et des ménages). Les gaz de fermentation, le biogaz et les gaz d'épuration provenant des installations de méthanisation sont généralement composés d'environ 60% à 70% de méthane et de 25% à 40% de dioxyde de carbone, et contiennent également des composés soufrés et azotés qui sont en règle générale séparés avant exploitation. Du fait de leur composition, les gaz de fermentation ont un pouvoir calorifique équivalent à environ deux tiers de celui du gaz naturel. Les gaz de fermentation peuvent ainsi être utilisés dans des centrales de couplage chaleur-force (CCF) avec moteur à gaz, ou bien traités afin d'alimenter le réseau de gaz naturel. Toutefois, dans ce dernier cas, contrairement à une utilisation dans un moteur, le dioxyde de carbone doit lui aussi être séparé dans un épurateur de gaz. En cas d'exploitation en CCF, il est possible d'utiliser les rejets de chaleur dans le cadre du chauffage à distance, les rejets de chaleur de la CCF étant généralement utilisés pour couvrir la charge de base.

2.8.2 Rejets de chaleur directement exploitables

Les rejets de chaleur industriels dont la température excède les 70°C doivent en priorité être utilisés ou recyclés en interne et ne peuvent être mis à la disposition du chauffage à distance que si aucun autre type

d'exploitation opérationnelle ne convient. Les conditions impératives sont alors les suivantes: dépenses d'exploitation des rejets de chaleur rentabilisables, lieu et moment de production appropriés et disponibilité dans un avenir prévisible. L'approvisionnement en chaleur doit souvent par ailleurs être assuré par un générateur de chaleur classique. Il faut également tenir compte du fait que toute amélioration ou tout changement dans la production est susceptible de réduire la production de rejets de chaleur. À cela s'ajoute le fait que les durées d'amortissement prévues dans le cadre de la production industrielle sont beaucoup plus courtes que celles des réseaux de chauffage à distance, ce qui rend la coordination des investissements difficile. Toutes ces raisons expliquent pourquoi l'exploitation directe du chauffage à distance à partir des rejets de chaleur industriels reste relativement rare. Cependant, si de grands volumes de rejets de chaleur sont disponibles à une température supérieure à 300°C, une production d'électricité avec couplage chaleur-force peut se révéler adaptée. Ce point est abordé au chapitre 2.9.

2.8.3 Rejets de chaleur à basse température et chaleur ambiante

2.8.3.1 Hausse de la température par pompes à chaleur

Le principe des pompes à chaleur est d'utiliser une chaleur à basse température et de lui faire atteindre un niveau de température exploitable. Cette opération s'effectue dans des pompes à chaleur à compression par l'apport d'énergie mécanique, ou dans des pompes à chaleur à absorption et adsorption par l'apport de chaleur à haute température. Le rapport entre la chaleur utile et l'énergie haute qualité fournie (souvent de l'électricité) est défini au chapitre 2.6.3 comme le coefficient de performance ϵ , et comme le coefficient de performance annuel (COP annuel) s'il est observé sur une période d'un an.

Le coefficient de performance grimpe à l'infini lorsque l'écart entre la température de la source de chaleur (température inférieure T_u) et celle de la chaleur produite (température supérieure T) est proche de zéro. Lorsque l'écart entre ces températures devient très important, le coefficient de performance approche la valeur 1 et la pompe à chaleur électrique devient finalement un système de chauffage électrique. Les pompes à chaleur ne sont en effet intéressantes que si l'écart de température entre la source de chaleur et la chaleur utile est dérisoire. La Fig. 2.16 présente le coefficient de performance de Carnot en fonction de la température de la source.

On suppose donc qu'une température basse suffit à la chaleur utile, ou que la pompe à chaleur n'intervient qu'à des fins de préchauffage (pour relever la température de retour p. ex.), et que le chauffage complémentaire est assuré par un deuxième générateur de chaleur. En outre, la production de chaleur peut être conçue pour deux niveaux de température. Dans le cadre de l'alimentation des bâtiments, la pompe à chaleur peut par exemple préparer une température de 35°C pour le chauffage des

locaux et une température de 60°C pour l'eau chaude. Sans chauffage complémentaire, les pompes à chaleur ne conviennent généralement aux réseaux de chauffage à distance qu'à des températures d'amenée de 70°C maximum. Comme le montre le Tableau 2.5, une température à la source de 10°C et un niveau de qualité de 0.5 correspondent à un coefficient de performance de 2.9. L'utilisation de la pompe à chaleur à des fins de préchauffage à 50°C donne un coefficient de performance de 4.0, et à 35°C de 6.2.

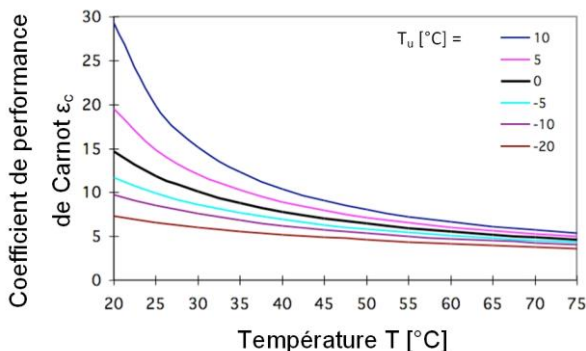


Fig. 2.16 Coefficient de performance de Carnot en fonction de la température T à différents niveaux de température inférieure (température de source) T_u .

Tableau 2.5 Coefficient de performance réel d'une pompe à chaleur d'un niveau de qualité de 0.5 à différentes températures pour la chaleur fournie T_u et la chaleur utile T.

$T_u =$		0°C	10°C	20°C
T =	35°C	4.4	6.2	10.3
	50°C	3.2	4.0	5.4
	70°C	2.5	2.9	3.4
	90°C	2.0	2.3	2.6

Sur le principe, il est tout à fait envisageable de séparer fourniture de chauffage des locaux et fourniture d'eau chaude dans un réseau de chauffage à distance. Cela nécessiterait toutefois d'exploiter un second réseau ou d'employer un système à triple conduite, ce qui s'accompagnerait d'une hausse des charges d'exploitation, ainsi que des coûts d'investissement dans le deuxième cas.

Dans le cadre d'applications décentralisées, on utilise principalement des pompes à chaleur à compression, équipées d'un compresseur entraînement électrique. Si la puissance excède 300 kW, un entraînement mécanique direct peut également convenir, p. ex. avec un moteur à gaz.

La structure d'une pompe à chaleur est identique à celle d'une machine frigorifique, l'extraction de chaleur à la température inférieure permettant de préparer le froid. Pour des besoins simultanés en chaleur et en froid, comme dans le cas de l'association d'une piscine couverte et d'une patinoire, le froid comme la chaleur peuvent être exploités, permettant ainsi de réduire considérablement la consommation électrique du système de compression par rapport à deux installations

indépendantes. La production de chaleur des machines frigorifiques permet alors une récupération directe des rejets de chaleur. Si le site de production de froid n'a aucun besoin de chaleur en simultané, les machines frigorifiques peuvent servir de sources de rejets de chaleur au profit du chauffage à distance.

L'utilisation d'installations d'absorption devient par exemple intéressante lorsque de grandes quantités de rejets de chaleur à une température suffisante sont disponibles et qu'on constate des besoins en froid simultanés correspondants. Le coût de l'appareillage limite néanmoins de telles applications à des unités plus imposantes. Si le chauffage à distance était plus abordable et utilisable à des températures plus élevées, la production de froid décentralisée serait également envisageable au moyen d'installations d'absorption.

2.8.3.2 Sources de chaleur des pompes à chaleur

La production de chaleur centralisée au sein de réseaux de chauffage à distance employant des pompes à chaleur exploite principalement les sources de chaleur listées ci-dessous.

- **Air ambiant.** Les pompes à chaleur décentralisées sont souvent conçues en sorte que leur source de chaleur soit l'air ambiant, car ce système peut fonctionner presque partout et le coût de forage d'une sonde est relativement élevé. Durant la saison hivernale, l'air ambiant présente cependant à la fois les températures les plus basses et les besoins en chauffage les plus importants, ce qui limite le coefficient de performance en hiver. C'est donc pour cette raison que l'association d'une pompe à chaleur et d'un deuxième générateur de chaleur s'avère intéressante. Par ailleurs, le préchauffage de l'air peut permettre d'améliorer l'efficacité d'une pompe à chaleur à air (p. ex. dans le cas de capteurs géothermiques). Dans le cas de centrales de chauffage à distance, les sources de chaleur les plus employées sont la géothermie, les eaux et les rejets de chaleur.
- **Géothermie à faible profondeur.** À partir d'une profondeur de 10 m, la température du sol est quasiment constante toute l'année et tourne autour de 11°C, gagnant 1°C tous les 30 m. L'exploitation des sols passe par l'utilisation de **sondes géothermiques** fonctionnant avec de la saumure. En Suisse, les profondeurs de forage se situent généralement entre 100 m et 300 m, et les températures de source entre 12°C et 15°C, ce qui garantit en hiver des coefficients de performance plus élevés qu'avec l'air ambiant. L'exploitation durable sur le long terme de la chaleur issue de sondes géothermiques dépend de nombreux facteurs, tels que la profondeur du forage, la couche rocheuse, la longueur des sondes et leur densité. Pour les grandes unités notamment, il est recommandé d'avoir recours à un champ de sondes, également dans le cadre de l'évacuation de l'excédent de chaleur des bâtiments et des installations solaires en été. Les sols peuvent ainsi se régénérer et le champ de sondes peut servir d'accumulateur saisonnier. À un certain niveau typique de tempé-

rature des sondes, un refroidissement des bâtiments est possible sans climatisation, grâce à des composants actifs. À cela peut également s'ajouter l'emploi d'installations solaires hybrides équipées de systèmes photovoltaïques à refroidissement actif. Autre alternative: les capteurs solaires non vitrés qui, en été, peuvent servir au refroidissement naturel des bâtiments (*freecooling*) la nuit et, la journée, permettent d'évacuer l'excédent de chaleur vers le champ de sondes. Outre les sondes géothermiques, des capteurs géothermiques peuvent aussi être posés, à une profondeur de 1.5 m. Ils sont toutefois peu utilisés, dans la mesure où ils nécessitent de grandes surfaces et qu'ils ne permettent pas d'atteindre des températures aussi élevées que les sondes géothermiques.

- **Eaux.** Sur la base des niveaux de température, il est intéressant d'exploiter les eaux souterraines ainsi que de l'eau des lacs et des fleuves. Alors que l'exploitation des eaux souterraines requiert un puits de captage et un puits d'injection, deux conduites suffisent pour exploiter l'eau des lacs. L'exploitation des eaux souterraines peut être considérée comme un cas particulier du domaine de la géothermie et c'est donc cette appellation de «géothermie» qui sera utilisée dans la suite de ce texte. De nombreuses villes et agglomérations étant situées à proximité de cours d'eau, les lacs et les fleuves offrent un potentiel extraordinaire pour les pompes à chaleur. Les applications correspondantes sont d'ailleurs souvent soutenues par les pouvoirs publics. L'utilisation des eaux naturelles doit en revanche respecter les directives relatives à la protection des eaux et de la nature. De plus, l'eau n'est autorisée à être refroidie que de 3 K maximum, valeur de référence de l'Office fédéral de l'environnement. En hiver, l'eau des lacs présente typiquement des températures supérieures à 5°C dès 10 m de profondeur, et supérieures à 10°C (parfois jusqu'à 15°C) à partir de 20 m. Même en exploitant cette température et en la faisant baisser de 3 K, elle permet encore de bons coefficients de performance. Etant donné que la température de l'eau, à partir de 20 m de profondeur, reste majoritairement inférieure à 18°C même en été, les eaux des lacs peuvent elles aussi être exploitées à des fins de refroidissement naturel des bâtiments. Les effets sur la température de l'eau restent toutefois très réduits, ce faible refroidissement dans le cas du chauffage à distance contrecarrant le réchauffement indésirable que provoque le changement climatique.
- **Eaux usées.** Les eaux usées issues des habitations, des établissements publics et des industries affichent une température de 20°C à 25°C et sont ainsi bien plus chaudes que l'eau potable fournie et ses 8°C à 12°C [29]. Les rejets de chaleur de ces eaux usées peuvent être récupérés de différentes façons. En principe, il est possible de les récupérer afin de réchauffer directement l'eau fraîche fournie au consommateur et ainsi réduire la consommation d'eau chaude décentralisée. Les installations le permettant se présentent par exemple sous la forme de receveurs de douche à échangeur de chaleur intégré, et les eaux usées encore non diluées présentent une température supérieure à 30°C. Les durées d'exploitation de ces installations individuelles en bâtiment résidentiel étant relativement

courtes, on peut envisager comme alternative la récupération de la chaleur d'un mélange des eaux usées de plusieurs consommateurs. A des températures comprises entre 20°C et 25°C, les rejets de chaleur se prêtent particulièrement bien aux pompes à chaleur. Une telle application pourrait se faire en interne via les échangeurs de chaleur d'immeubles individuels, comme le montre la Fig. 2.17, cela n'étant toutefois envisageable que pour de grosses unités, à partir de 150 kW environ.

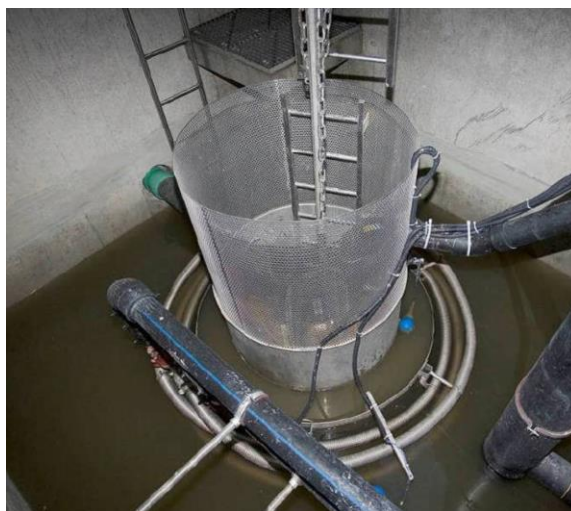


Fig. 2.17 Récupération de chaleur à partir des eaux usées dans une installation interne [30].

Dans le cas de canalisations d'un débit journalier d'au moins 10 litres par seconde, correspondant à environ 5000 habitants, il est également possible d'exploiter le mélange des eaux circulant dans les canalisations d'eaux usées. La Fig. 2.18 montre en effet l'exploitation d'un échangeur de chaleur intégré à une canalisation. Autre option: l'installation d'un puits séparé.

Tandis que les applications décentralisées réduisent les besoins de chaque bâtiment, récupérer de la chaleur à partir des canalisations d'eaux usées peut également permettre d'approvisionner les réseaux de chauffage à distance. Il ne faut toutefois pas oublier que la récupération de chaleur décentralisée réduit le potentiel de chaleur de ces canalisations d'eaux usées et nécessite donc une certaine coordination.

- **Stations d'épuration des eaux usées (STEP).** Les stations d'épuration offrent la possibilité d'exploiter la chaleur des eaux usées. En effet, il peut se révéler particulièrement intéressant d'utiliser l'eau traitée en sortie de STEP. Par des températures de l'eau hivernales typiques, à savoir supérieures à 8°C, un refroidissement d'au moins 4 K est généralement possible. Le potentiel correspond alors à une puissance thermique d'environ 800 MW [30]. Comme les STEP génèrent des gaz d'épuration souvent exploités en centrale de couplage chaleur-force (CCF) à des fins de production d'électricité, les rejets de chaleur de moteurs peuvent être associés à la chaleur des eaux usées utilisée par une pompe à chaleur dans le but d'alimenter les réseaux de chauffage à distance.

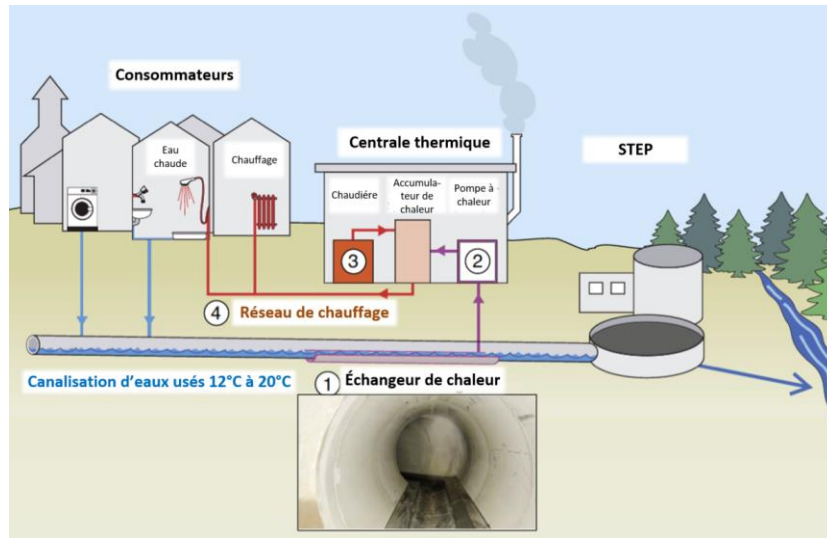


Fig. 2.18 Exploitation des rejets de chaleur des canalisations d'eaux usées [31]. 1 échangeur de chaleur, 2 pompe à chaleur, 3 chaudière destinée à la charge de pointe, 4 distribution de chaleur via le réseau de chauffage à distance.

2.8.4 Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique se sert du rayonnement solaire, qui par un ciel dégagé au soleil de midi offre environ 1000 watts de puissance par mètre carré sur une surface plane. Ces 1000 W/m² garantis par l'exposition au soleil servent également de valeur de référence lorsque l'on parle de la puissance des installations solaires. La valeur effective moyenne annuelle en Suisse s'élève à environ 125 W/m², soit 1/8 de l'ensoleillement constaté un jour de ciel dégagé à midi. Le rayonnement moyen au niveau d'un capteur horizontal correspond ainsi à 1/8 x 24 h soit 3 h par jour, ou 1/8 x 8760 h/a soit 1100 heures d'exploitation à pleine charge par an, ce qui équivaut à 1100 kWh par mètre carré et par an. Puisque l'Europe se situe au nord du tropique du Cancer, l'angle formé par le soleil et la surface de la Terre est inférieur à 90° même le jour le plus long de l'année et avec un rayonnement maximum; le soleil passe ensuite au sud. De ce fait, les capteurs fixes atteignent leur rendement annuel maximum en étant inclinés à environ 42° et orientés vers le sud. Etant donné que le rendement hivernal reste déterminant pour l'énergie solaire thermique et que l'angle formé par le rayonnement du soleil et la surface de la Terre est très faible, le rendement hivernal maximum peut être atteint avec une inclinaison d'environ 60°. Autre solution intéressante: la pose sur une paroi verticale orientée plein sud; en effet, son rendement hivernal n'est que très légèrement inférieur à celui offert par une inclinaison à 60°. Afin de prolonger la durée de l'exposition, une disposition partagée est-ouest et très peu inclinée est en revanche idéale. Cette solution est surtout utilisée pour le photovoltaïque. Quoiqu'il en soit, ces systèmes n'offrent un rendement qu'en journée et nécessitent donc que les installations solaires soient équipées d'un accumulateur de chaleur pour toute utilisation courante dans un bâtiment.

Puisqu'une partie du rayonnement solaire est réfléchi (résultant en pertes optiques) et parce que l'augmentation de la température s'accompagne d'une augmentation des pertes thermiques dans l'environnement, les installations solaires atteignent des rendements typiques de 60% pour la préparation d'eau chaude, comme l'illustre la **courbe caractéristique du capteur plan** de la Fig. 2.19, capteur qui fonctionne à une température ambiante de 5°C et par une exposition à 1000 W/m². En cas de faible ensoleillement, la température de stagnation (que l'on obtient lorsque le capteur n'est pas exposé) chute, de même que le rendement.

Le taux d'utilisation évalué sur un an comprend les pertes supplémentaires dues au stockage et à l'intégration du système et atteint des valeurs typiques de 50%, dans la mesure où l'installation a été conçue pour un taux de couverture solaire d'environ 50%, comme le montre la Fig. 2.20. Ce type d'installation permet, sur le Plateau suisse, d'atteindre un rendement de 550 kWh par an et par mètre carré de surface absorbante. Il est également possible d'atteindre des rendements légèrement plus élevés par mètre carré de surface absorbante à l'aide de capteurs à tubes sous vide, qui garantissent par ailleurs des températures plus élevées grâce à une meilleure isolation thermique.

Dans les bâtiments résidentiels, les installations solaires sont souvent conçues de sorte à pouvoir assurer, partiellement ou intégralement, la préparation d'eau chaude pendant environ trois à quatre mois d'été. Il suffit en effet de capteurs relativement petits (surface de 1 m² à 1.5 m² par personne), comme l'illustre l'exemple de la Fig. 2.20. Le rendement durant les mois d'hiver ne dépassant pas 25% des besoins, ainsi un chauffage complémentaire se révèle nécessaire; au cours de l'année, le taux de couverture solaire pour l'eau chaude atteint les 50% à 60%.

Le taux de couverture peut être amélioré en augmentant la surface des capteurs. Toutefois, cela provoque des pertes plus importantes du fait de la hausse des températures et, en été, des excédents de chaleur non récupérables, ce qui explique que le taux d'utilisation du système et le rendement solaire par mètre carré de capteur chutent. En revanche, il est possible d'obtenir des taux d'utilisation du système et des rendements

jusqu'à 700 kWh par mètre carré et par an lorsque la chaleur solaire n'est utilisée qu'à des fins de préchauffage, à un taux de couverture de 5% à 30%, comme le montre la Fig. 2.21. L'énergie solaire thermique est donc également intéressante sur le plan économique si elle est intégrée à des réseaux de chauffage à distance, principalement à des fins de préchauffage, ou afin de couvrir les besoins en eau chaude en été.

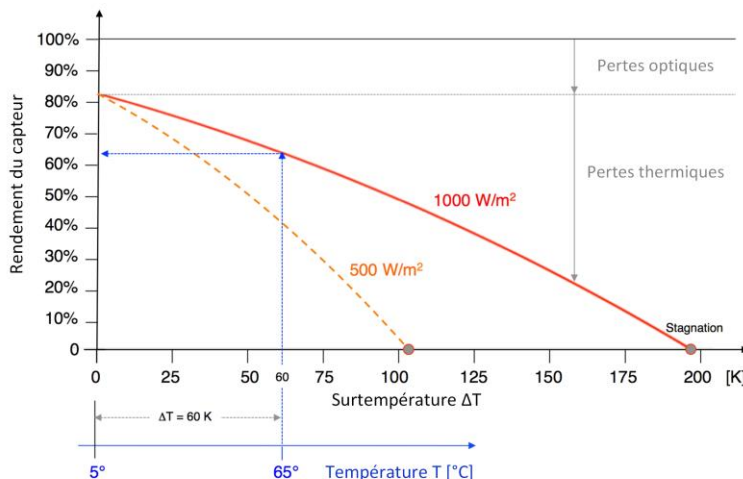


Fig. 2.19 Rendement d'un capteur plan vitré en fonction de la surtempérature (= courbe caractéristique du capteur) (écart entre la température du capteur et la température ambiante).



Fig. 2.20 Taux de couverture solaire mensuel utilisé pour la mise à disposition d'eau chaude grâce à une installation conçue pour les besoins en été, pour un ménage de 4 personnes et avec une surface de capteurs de 4 m².

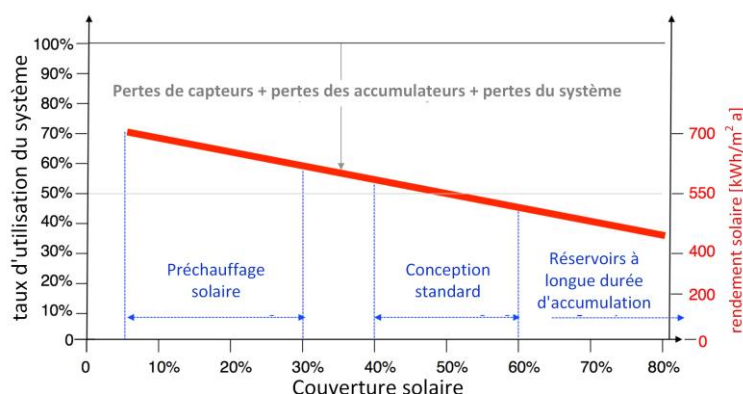


Fig. 2.21 Efficacité du système (à gauche) et rendement solaire (à droite) en fonction du taux de couverture solaire.

Si le stockage de courte durée de la chaleur suffit au préchauffage par l'énergie solaire, il s'avère toutefois nécessaire d'augmenter la capacité de l'accumulateur de chaleur pour pouvoir relever le taux de couverture solaire, ce que permettent les sondes géothermiques. On peut ainsi avoir recours aux solutions ci-dessous

dans le cadre du chauffage à distance faisant appel à l'énergie solaire.

1. Chauffage à distance par l'énergie solaire thermique avec réservoir à courte durée d'accumulation: ce concept permet d'utiliser la chaleur solaire à des fins

de préchauffage (garantissant un rendement solaire élevé) tout en stockant l'excédent de chaleur dans un réservoir à courte durée d'accumulation. Etant donné que fort ensoleillement et besoins en chauffage des locaux sont plus ou moins opposés sur le plan des saisons, ce principe n'est en mesure de couvrir qu'une faible proportion des besoins annuels, à savoir typiquement entre 5% et 12% sur les réseaux actuels. Cependant, comme la part que représente l'eau chaude sur le total des besoins annuels est amenée à passer de 10% pour les anciennes constructions à env. 50% pour les nouvelles, il est envisageable qu'à l'avenir, la part de la chaleur solaire puisse s'élever à au moins 25% même avec des réservoirs à courte durée d'accumulation.

2. L'intégration de la chaleur solaire au réseau par le biais d'accumulateurs de chaleur saisonniers peut se faire de différentes façons. D'une part, la chaleur solaire peut être utilisée à des niveaux de température faibles et garantir ainsi un rendement élevé, afin de régénérer, en été, les couches rocheuses situées autour des sondes géothermiques et servant de source de chaleur en hiver. L'approvisionnement en chaleur est assuré par des pompes à chaleur qui, grâce à leur température de source élevée, atteignent d'importants coefficients de performance annuels. Puisque de basses températures suffisent à la régénération des couches rocheuses, on utilise également des capteurs non vitrés pour de telles applications. Ceux-ci n'atteignent des rendements élevés qu'à de faibles surtempératures, et la température de stagnation est beaucoup plus basse que dans un capteur vitré (représenté sur la Fig. 2.19) du fait de l'importance accrue des rejets de chaleur. Les capteurs non vitrés peuvent aussi être utilisés la nuit, pour le refroidissement naturel. D'autre part, il est également possible d'utiliser des réservoirs à longue durée d'accumulation à des niveaux de température plus élevés; le consommateur est alors alimenté en eau à la température d'amenée requise via le réservoir après réchauffage, par exemple à l'aide d'une chaudière à bois. Des taux de couverture solaire de 40% seraient alors possibles.
3. Outre les installations solaires dans les centrales thermiques, il est également envisageable que les futurs réseaux de chauffage à distance intègrent des installations solaires thermiques décentralisées, par exemple en augmentant la température de retour.

Les coûts d'investissement spécifiques des installations solaires thermiques sont élevés, mais diminuent selon la taille de l'installation. Ce n'est que dans le cadre de grandes unités (immeubles p. ex.) que les coûts de revient de la chaleur passent largement en dessous de 20 ct/kWh et, dans d'excellentes conditions, en dessous de 10 ct/kWh, comme le montre la Fig. 2.22.

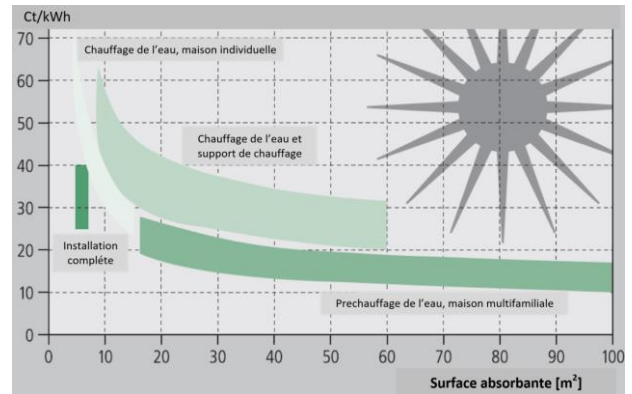


Fig. 2.22 Coûts de revient de la chaleur en ayant recours à l'énergie solaire thermique pour l'eau chaude et le chauffage [32].

2.8.5 Géothermie

On distingue dans le domaine de la géothermie la géothermie à faible profondeur et la géothermie profonde.

Rentrent dans la catégorie de la géothermie à faible profondeur (en règle générale jusqu'à 400 m de profondeur) les sondes et capteurs géothermiques, ainsi que l'eau souterraine et l'eau de puits, principalement utilisées pour les pompes comme source de chaleur.

L'exploitation des eaux souterraines au profit d'un réseau de chauffage à distance n'est intéressante qu'à partir de 100 kW. Mais les sondes géothermiques représentent elles aussi un fort potentiel. La Fig. 2.23 présente la disposition d'un champ de 10 sondes géothermiques destiné à chauffer un immeuble.

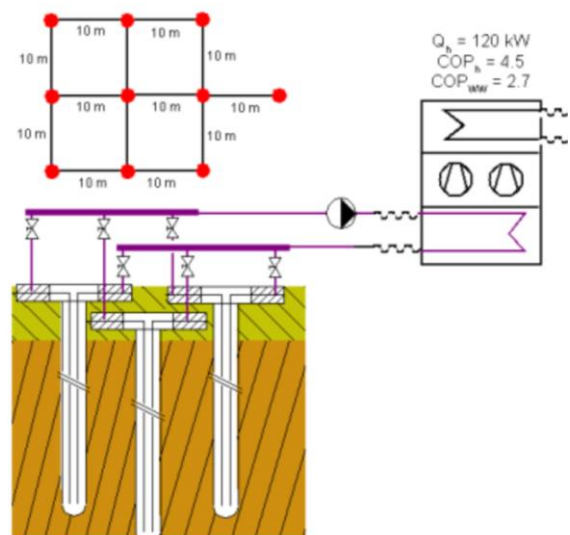


Fig. 2.23 Exemple d'un champ de 10 sondes géothermiques d'une profondeur de forage de 210 m afin d'apporter à un immeuble une puissance de chauffage de 120 kW ainsi qu'un COP de 4.5 pour le chauffage des locaux et de 2.7 pour l'eau chaude [33].

Etant donné que la température du sol baisse du fait de l'extraction de la chaleur et que les sondes d'un tel champ ont toutes un impact les unes sur les autres, le

caractère non stationnaire du procédé d'extraction de chaleur doit être pris en compte lors de la conception. Afin de réduire la baisse de température, les champs de sondes peuvent être régénérés grâce au refroidissement actif des bâtiments et à l'énergie solaire thermique.

Il existe des programmes de calcul de ce comportement non stationnaire, qui sont destinés à la conception des champs de sondes géothermiques et qui permettent également l'intégration du refroidissement actif et de la régénération solaire [33]. La Fig. 2.24 illustre un exemple de calcul du comportement de la température d'une sonde sur 50 ans.

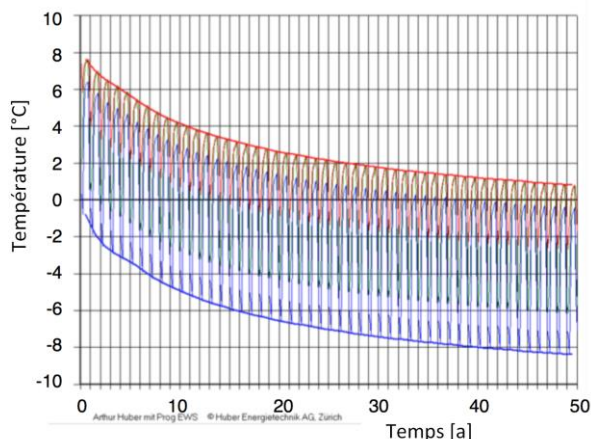


Fig. 2.24 Baisse de la température d'un champ de sondes sur 50 ans [33]. En rouge, le maximum mensuel de la température d'amenée de la sonde, et en bleu, le minimum.

Les capteurs géothermiques ne sont généralement utilisés que pour des puissances d'environ 10 kW dans des bâtiments individuels, car ils requièrent une surface considérable (environ 25 m² par kW); ils restent donc relativement rares.

Dans le domaine de la géothermie profonde, on distingue les procédés Hot-Dry-Rock (HDR), les sondes géothermiques profondes et la géothermie hydrothermale. Le procédé HDR consiste à exploiter la chaleur du sol contenue dans la roche chaude sèche en comprimant des couches rocheuses à une profondeur de plusieurs kilomètres et en y injectant de l'eau par le biais d'un puits d'injection. Les fissures de la roche s'agrandissent et de nouvelles se créent parfois. L'eau y circule ensuite et se réchauffe, pour enfin remonter à la surface via un deuxième forage (forage de production). Cette eau peut alors être utilisée à des fins de production d'électricité dans des ORC ou des turbines à vapeur. La chaleur peut également être directement utilisée dans le cadre du chauffage à distance, mais exploiter les rejets de chaleur générés par la production d'électricité reste généralement plus avantageux. Toutefois, le procédé HDR n'est intéressant que dans les régions dans lesquelles la hausse de la température dans la roche dépasse les 50°C par kilomètre de profondeur. Cependant, soit les tentatives d'exploitation de la géothermie profonde réalisées jusqu'à présent en Suisse ont provoqué de

brusques séismes, soit elles n'ont pas répondu aux attentes en matière de rendement; sur le plan commercial, cette technologie reste donc insignifiante à l'heure actuelle.

2.9 Couplage chaleur-force (centrale de cogénération)

2.9.1 Aperçu

On appelle centrale de cogénération une centrale énergétique dont le processus thermique génère une force et par laquelle les rejets de chaleur en résultant sont transformés en chaleur utile. Ce principe est appelé couplage chaleur-force (CCF). Cette force est principalement utilisée pour produire de l'électricité, comme le montre la Fig. 2.25 avec l'exemple du moteur à combustion qui recycle les rejets de chaleur.

Etant donné que les coûts d'investissement des centrales thermiques sont élevés, ces centrales sont généralement doublées d'une chaudière destinée à couvrir la charge de pointe. Lorsqu'une seule centrale thermique à montage bloc est mise en place, la conception se base alors sur environ 30% des appels de puissance thermique maximum requis par exemple, si bien qu'il faut utiliser une chaudière de charge de pointe pour répondre aux besoins qui vont au-delà du point de bivalence, comme le montre la Fig. 2.26.

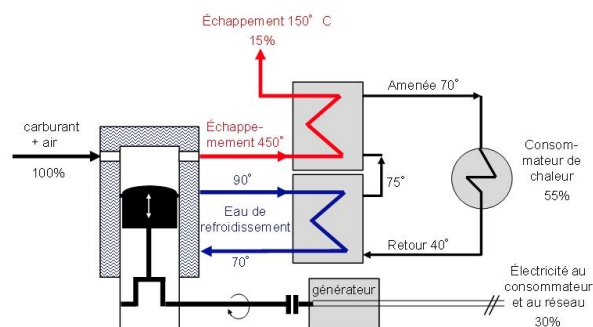


Fig. 2.25 Principe du couplage chaleur-force dans l'exemple d'un moteur à combustion.

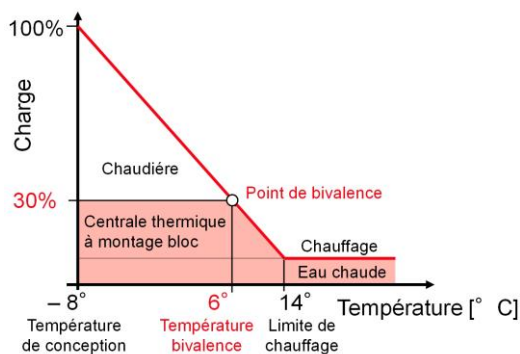


Fig. 2.26 Conception d'une centrale de couplage chaleur-force (CCF).

2.9.2 Turbines à vapeur

Le fluide utilisé par les circuits fermés à évaporation et condensation des turbines à vapeur est l'eau, comme le montre le cycle de Rankine de la Fig. 2.27. Lorsque des turbines à vapeur sont mises en place dans le cadre d'un couplage chaleur-force, elles peuvent avoir été conçues comme des **turbines à contre-pression**, qui permettent d'exploiter l'intégralité des rejets de chaleur, ou comme **turbines à soutirage et condensation**, qui permettent de réguler l'exploitation des rejets de chaleur. À l'inverse, une **turbine à condensation** ne produit que de l'électricité, et l'ensemble des rejets de chaleur est dissipé dans l'environnement, comme dans les centrales nucléaires.

Le rendement électrique net des turbines à vapeur dans la plage de puissance de centrales thermiques à bois typiques ou d'UIOM (1 MW_{el} à 50 MW_{el}) varie de 10% à 25% environ. Ce faible rendement électrique rend l'exploitation thermique judicieuse. Dans la plage de puissance des centrales électriques au charbon d'une puissance pouvant dépasser 1 GW_{el}, il est possible d'atteindre des rendements électriques d'au moins 45% sans soutirage de chaleur. Toutefois, pour de telles applications, seule une exploitation partielle de la chaleur se révèle possible. Il ne faut pas oublier que le processus d'extraction de chaleur réduit le rendement électrique des centrales à vapeur, car la chaleur utile requise demande une température supérieure à la température ambiante.

Bien que les systèmes à vapeur puissent également être exploités en charge partielle, la plage de réglage reste plus mince qu'avec un véritable générateur de chaleur. Il faut de plus éviter les changements de charge rapides; le fonctionnement en charge partielle entraîne, en dessous d'un certain niveau de puissance, une baisse significative du rendement. Si un système à vapeur remplace le générateur de chaleur d'une centrale de chauffage à distance, il est alors généralement destiné à la charge de base et doublé d'une chaudière de charge de pointe. En plus de rendements électriques restreints, la contribution des systèmes à vapeur et l'utilisation du couplage chaleur-force se limitent au cadre de la production d'électricité.

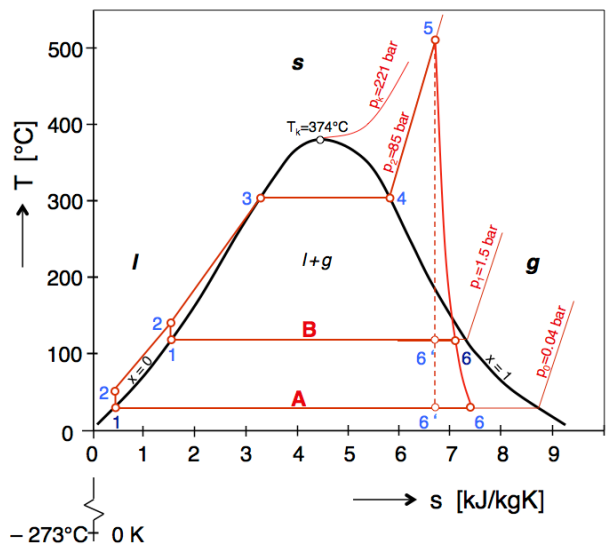
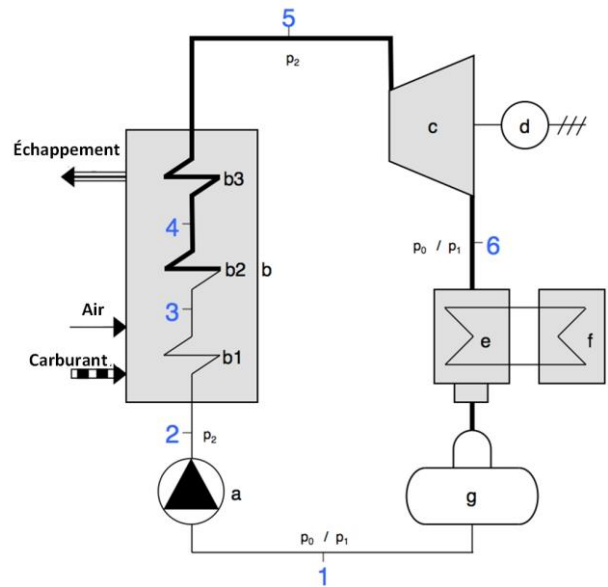


Fig. 2.27 Structure d'une centrale électrique à turbine à vapeur (1^{er} schéma) et cycle de Rankine en diagramme T-S (2^e schéma). 1-2 augmentation de la pression de l'eau par la pompe d'alimentation a, 2-3 chauffage de l'eau jusqu'à atteindre la température d'évaporation dans la chaudière b, 3-4 évaporation à température constante dans la partie évaporateur, 4-5 surchauffe de la vapeur dans le surchauffeur, 5-6' conversion du travail mécanique par expansion de la vapeur sans friction dans la turbine c, 5-6 conversion du travail mécanique avec une turbine inadaptée, 6-1 condensation de la vapeur dans le condensateur e et émission de chaleur au niveau de l'appareil de refroidissement f puis retour vers le réservoir de stockage g.

2.9.4 Moteurs à vapeur

Pour de faibles puissances (1 MW_{el} max.), il est également possible d'avoir recours à des **moteurs à vapeur**, selon ce même principe du cycle de Rankine; des moteurs à vapeur à piston et des moteurs à vapeur à vis sont disponibles. Le rendement électrique net se situe entre 10% et 12%, raison pour laquelle l'exploitation de la chaleur s'avère indispensable.

2.9.5 Cycle organique de Rankine

Outre les turbines à vapeur fonctionnant à l'eau, d'autres procédés destinés aux puissances faibles et moyennes (2 MW_{el} max.) emploient aussi des fluides organiques dont les températures d'ébullition sont plus basses. Un tel procédé est alors appelé **cycle organique de Rankine (COR)**. Ce principe présente l'avantage, pour les applications au bois d'énergie, de pouvoir intégrer entre le générateur de chaleur et le générateur de vapeur un circuit secondaire traversé par une huile caloporteuse, ce qui simplifie la marche de l'installation. La consommation d'énergie auxiliaire étant relativement élevée, le rendement électrique net fluctue entre 10% et 15% environ. De plus, les températures des gaz d'échappement en sortie de la chaudière à huile thermique sont plus hautes qu'en sortie d'une chaudière à eau, ce qui explique qu'on procède en règle générale à une nouvelle extraction de chaleur à partir des gaz d'échappement.

2.9.6 Moteurs à combustion

Pour les applications stationnaires à faibles plages de puissance, on utilise surtout des moteurs à combustion à gaz. Ces derniers fonctionnent comme des moteurs à allumage commandé, ou au biogaz et au gaz de bois pour de plus petites applications, parfois aussi comme des moteurs à injection pilote, avec un carburant liquide en guise d'aide à l'allumage.

La chaleur générée en cours de fonctionnement par les gaz d'échappement (environ 60% des rejets de chaleur) comme par l'eau de refroidissement et l'huile de graissage (environ 40%) peut être exploitée dans le cadre de l'approvisionnement en chaleur, comme le montre la Fig. 2.25. L'eau de refroidissement et l'huile de graissage présentent généralement des températures de 80°C à 90°C, voire supérieures à 100°C dans le cas de moteurs refroidis à chaud. Le niveau de température des gaz d'échappement est nettement plus élevé (plus de 350°C) et dépend du type de moteur.

L'utilisation d'un moteur à des fins de couplage chaleur-force est également appelée centrale thermique à montage bloc. Le combustible utilisé peut être le biogaz issu d'installations de méthanisation et, dans certains cas, le gaz produit par une installation de gazéification du bois. Dans les deux cas, une épuration des gaz s'avère nécessaire afin de protéger le moteur de l'encrassement et, par la même occasion, de réduire les émissions polluantes. Alors que les installations de méthanisation se révèlent très fiables, l'exploitation d'installations de gazéification du bois et l'épuration des gaz que ces dernières requièrent sont complexes et nécessitent un suivi intensif des installations. Dans

certain cas, on met également en place des centrales thermiques à montage bloc fonctionnant au gaz naturel pour remplacer les générateurs de chaleur pour charge de base, ce qui permet ainsi de garantir une exploitation fiable; toutefois, pour pouvoir produire en grande partie un chauffage à distance exempt de CO₂, seule une faible proportion de gaz naturel est autorisée.

Les moteurs au gaz atteignent typiquement des rendements d'env. 25% pour les puissances inférieures à 50 kW_{el} et d'env. 35% à partir de 100 kW_{el}, voire plus de 40% au-delà de 1 MW_{el}. Avec une exploitation au gaz de bois, le calcul du rendement global nécessite de tenir compte du rendement de la gazéification du bois, qui s'élève à env. 75%. On obtient alors des rendements nets de 15% à 25%, typique pour les centrales thermiques à montage bloc au gaz de bois. Il en va de même pour le biogaz; bien que le processus de fermentation ne permette d'atteindre qu'un rendement nettement plus faible, il reste en règle générale la solution la plus utilisée dans le domaine du traitement des résidus organiques.

Pour augmenter le rendement électrique, il est possible, principalement à l'aide d'ORC, d'exploiter la chaleur des gaz d'échappement dans un processus combiné destiné à produire de l'électricité dans un processus thermique situé en aval. Les moteurs à systèmes ORC intégrés ne sont à l'heure actuelle pas disponibles de série. Néanmoins, afin de répondre aux exigences toujours plus strictes en matière de consommation de carburant (notamment s'agissant du trafic lourd de marchandises), des modules ORC pour moteurs diesel de série, destinés à l'exploitation des rejets de chaleur, sont en cours de développement. On peut imaginer que lorsque ces appareils de série seront disponibles, les modules ORC destinés aux rejets de chaleur des centrales thermiques à montage bloc seront moins chers.

2.9.7 Turbines à gaz à circuit ouvert

Pour des puissances plus importantes, on peut appliquer aux **turbines à gaz** à circuit ouvert le même principe que celui appliqué aux moteurs. Contrairement aux moteurs, les rejets de chaleur sont presque uniquement générés par les gaz d'échappement, à des températures de 400°C à 600°C. Bien que ces rejets de chaleur puissent en principe être exploités au profit du chauffage à distance, il est plus judicieux de les utiliser pour alimenter un processus de vapeur situé en aval. Dans la mesure où les puissances sont suffisamment élevées, on emploie alors une turbine à vapeur; ce principe est alors appelé centrale à gaz à cycle combiné (CCC) ou plus simplement **centrale à cycle combiné**. Les centrales à cycle combiné au gaz naturel présentent une puissance globale typique de 600 MW_{el} et atteignent des rendements électriques d'env. 60%. Normalement, les centrales à cycle combiné permettent elles aussi d'exploiter leurs propres rejets de chaleur, mais leur rendement électrique élevé fait passer cette possibilité au second plan.

En outre, les turbines à gaz peuvent également être utilisées dans la plage de puissance des moteurs à gaz,

comme centrales thermiques à montage bloc fonctionnant au biogaz par exemple. Le principal avantage que cela représente est la baisse des coûts de maintenance et d'entretien. En revanche, les petites turbines à gaz (appelées aussi microturbines à gaz) apportent un rendement nettement inférieur à celui des moteurs à gaz; c'est la raison pour laquelle ces derniers restent plus avantageux sur le plan énergétique.

2.9.8 Couplage chaleur-force et pompe à chaleur

Si les petites pompes à chaleur fonctionnent généralement à l'électricité, pour les puissances plus élevées, on peut également avoir recours à entraînement mécanique, avec un moteur à combustion. Les rejets de chaleur permettent d'exploiter des températures élevées et moyennes, tandis que la puissance mécanique sert à entraîner la pompe à chaleur, qui produit quant à elle une chaleur utile d'un niveau de température bien plus bas. Les installations basées sur ce principe sont en effet intéressantes si par exemple les rejets de chaleur d'une centrale thermique à montage bloc au biogaz ne permettent pas un approvisionnement en chaleur suffisant, ou si les besoins simultanés en froid peuvent être couverts par le circuit froid de la pompe à chaleur.

2.9.9 Processus à gaz à circuit fermé

Avec un moteur à combustion et une turbine à gaz à circuit ouvert, le combustible est brûlé directement dans le moteur; celle-ci entre donc en contact avec les éventuelles impuretés portées par le combustible. A l'inverse, c'est par un transfert de chaleur que la centrale à vapeur est approvisionnée, la source thermique étant un combustible ou une autre source, comme la géothermie ou l'énergie solaire thermique. Les substances néfastes pour le moteur comme le chlore dans les déchets urbains, le potassium dans le bois ou le soufre dans le biogaz ne risquent ainsi pas d'endommager une turbine à vapeur par exemple. En revanche, lorsqu'un combustible est produit à partir de biomasse ou de déchets, ses substances néfastes doivent être éliminées avant d'être mises en contact avec le moteur à combustion, en utilisant un procédé complexe d'épuration des gaz. Par

conséquent, on a toujours favorisé les centrales à vapeur plutôt que les centrales électriques à bois, alors que les premières, dans le cas de faibles puissances, entraînent des coûts d'investissement spécifiques très élevés pour de faibles rendements. C'est ce qui explique l'intérêt que présentent d'autres procédés qui utilisent également un système de combustion externe avec transfert de chaleur, mais qui sont moins complexes. On retrouve à cet effet les moteurs Stirling et les turbines à gaz à circuit fermé (donc à combustion externe). La conception mécanique de ces moteurs est la même que celle des moteurs à combustion interne classiques et des turbines à gaz à circuit ouvert, si ce n'est que le fluide utilisé est un gaz comme l'air ou l'hélium, qui circule dans le circuit et qui est chauffé en externe. Les moteurs Stirling s'utilisent pour les faibles puissances (de moins de 1 kW à 100 kW) et atteignent dans cette catégorie de puissance des rendements plus élevés que les processus à circuit fermé. Les turbines à gaz à circuit fermé s'utilisent à partir de quelques kW, et ce jusqu'à plus de 100 kW. Pour chacune de ces deux techniques, de nombreux systèmes ont été développés pour des applications dont le combustible est la biomasse, ou qui fonctionnent à l'énergie solaire concentrée, comme c'est déjà le cas sur certaines installations pilotes. Ces installations demandent des coûts d'investissement spécifiques très élevés et restent donc très peu utilisées sur le plan commercial.

2.9.10 Comparatif des systèmes

Comme le montre la Fig. 2.28, les techniques de couplage chaleur-force couvrent une plage s'étalant de quelques kW seulement à plus de 1 GW de puissance électrique. Les rendements nets réalisables varient de moins de 10% à 60%. En ce qui concerne les procédés reconnus des centrales à vapeur, les rendements électriques sont très sensibles aux économies d'échelle et sont compris entre 10% (voire un peu moins) pour les puissances supérieures à 10 kW d'une part, et env. 45% d'autre part. D'autres techniques telles que la gazéification du bois et les moteurs Stirling permettent d'obtenir des rendements plus élevés sur des plages de puissance faibles et moyennes.

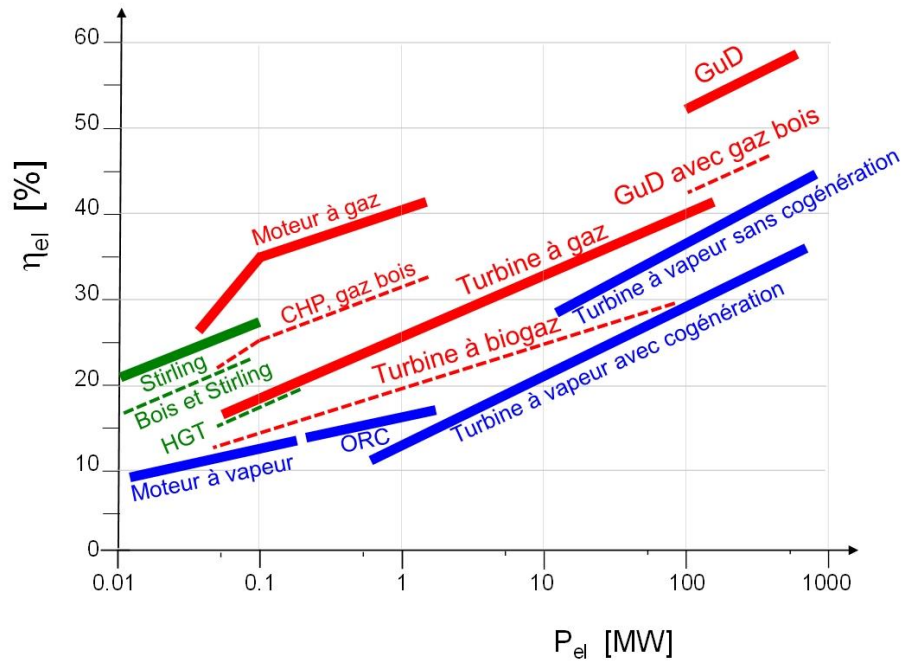


Fig. 2.28 Rendements nets de différentes techniques de production d'électricité en fonction de la puissance électrique. GuD = centrale à gaz à cycle combiné, HGT = turbine à gaz chaud (avec combustion du bois).

2.10 Accumulateur d'énergie thermique

La mission principale d'un accumulateur d'énergie thermique est de découpler dans le temps production de chaleur et émission de chaleur, afin par exemple que les pics et les chutes de consommation se compensent. En fonction des dimensions de l'accumulateur d'énergie, il est possible de raccourcir ou d'allonger la période de transition. En cas de couplage chaleur-force, cela permet une exploitation de l'installation plus flexible et, très souvent, une diminution de la production de chaleur.

Utiliser des accumulateurs d'énergie thermique offre en effet, selon le système, un potentiel d'optimisation considérable de la marche de l'installation en ce qui concerne les coûts et la consommation d'énergie primaire. Les points qui suivent sont consacrés au stockage de l'énergie thermique, de ses principes de base à l'intégration et l'utilisation de l'accumulateur en passant par sa conception. Ces informations reposent en grande partie sur les sources [34] et [35].

2.10.1 Propriétés et termes

On distingue les différents types d'accumulateurs d'énergie thermique par leurs domaines d'application et leurs propriétés.

- **Niveau de température:** la température à laquelle un accumulateur de chaleur se charge et se décharge est le facteur qui déterminera dans quelle mesure il pourra être utilisé. Pour une utilisation dans le cadre du chauffage à distance, la plage de température se situe généralement entre 25°C pour les systèmes de chauffage de surface, tels que les planchers chauffants, et 90°C pour le chauffage par radiateurs. Pour le chauffage de l'eau chaude, et pour des raisons d'hygiène, il est par moments indispensable que les températures dépassent les 60°C. Pour les réseaux de chauffage à distance de grande ampleur et très étendus, les températures d'amenée doivent être supérieures à 100°C. Pour les processus industriels, tels que la mise à disposition de vapeur, il est également impératif que les températures dépassent les 100°C (parfois jusqu'à 250°C). On utilise par exemple des accumulateurs à de fortes températures (comprises entre 300°C et 600°C) dans le cas de centrales solaires thermiques. Les accumulateurs de froid destinés au refroidissement et à la climatisation exigent une plage de température de 5°C à 18°C. Pour les processus industriels de refroidissement nécessitant une température de 0°C comme dans le domaine de l'agroalimentaire, on utilise très souvent des accumulateurs de glace, alors que dans les réseaux de refroidissement industriel, il est tout à fait courant d'utiliser des accumulateurs pouvant descendre jusqu'à -20°C.
- **Localisation:**
 - l'endroit auquel interviendra le stockage de l'énergie dans le système est un critère important, qui permet de définir l'accumulateur d'énergie. On distingue en effet les accumulateurs d'énergie **centralisé** et **décentralisé**. On appelle communément accumulateur d'énergie centralisé un accumulateur de chaleur installé sur le lieu de la production de chaleur, et accumulateur d'énergie décentralisé un accumulateur de chaleur installé chez le consommateur de chaleur.
 - La plupart des accumulateurs d'énergie thermique sont **stationnaires**, pour les accumulateurs de chaleur centralisés comme pour ceux décentralisés; il existe également des accumulateurs de chaleur **mobiles**, qui ne transportent pas de chaleur et ne l'apportent pas aux consommateurs de chaleur. Le point clé est la densité de l'accumulateur d'énergie, et les systèmes mobiles installés sont la plupart du temps des accumulateurs de chaleur latente ou des accumulateurs thermochimiques, mais cela n'est le cas que dans quelques installations pilotes.
- **Capacité de stockage et puissance thermique:**
 - accumulateurs à **forte capacité de stockage** ou à forte densité d'énergie, pratiques lorsque l'espace disponible est limité ou lorsque de grandes quantités d'énergie ont besoin d'être stockées;
 - accumulateurs à **puissance thermique élevée** utilisés dans des domaines tels que l'approvisionnement en eau chaude et le chauffage à distance; cela est tout à fait faisable avec des accumulateurs d'eau chaude particulièrement sensibles, dans lesquels l'eau chaude requise sert en même temps de fluide caloporteur.
- **Durée de stockage:** un élément essentiel pour tous les accumulateurs d'énergie est la durée de la période à couvrir entre le moment où ils se chargent et le moment où ils se déchargent. Les **réservoirs à courte durée d'accumulation** s'utilisent plusieurs heures, voire pendant quelques jours, tandis que les **réservoirs à longue durée d'accumulation** peuvent stocker de l'énergie pendant plusieurs semaines, voire pendant une année. Généralement, les réservoirs à longue durée d'accumulation doivent pouvoir stocker d'importantes quantités d'énergie thermique à une puissance de charge et de décharge relativement faible, tandis que les réservoirs à courte durée d'accumulation ont une puissance thermique élevée et peuvent stocker des quantités de chaleur plus faibles.
- **Capacité de stockage:** On appelle capacité de stockage la quantité d'énergie qu'un accumulateur est capable de mettre à la disposition du consommateur dans des conditions de fonctionnement données. Sur le plan exergetique, la capacité de stockage dépend énormément de la température ambiante. Si la capacité de stockage est estimée selon les éléments techniquement exploitables, elle dépend alors de la variation de température effective à l'intérieur du réservoir (cf. chapitre 2.10.3.1). Lorsqu'un seul fluide caloporteur est chauffé, cette capacité est alors directement proportionnelle à l'écart de température. Si la hausse de la température occasionne un changement de phase du fluide, l'enthalpie de fusion ou d'évaporation contribue également à l'augmentation de la capacité de stockage. La capacité de stockage est donnée en valeurs absolues et se mesure en J ou en kWh, ainsi qu'en quantité spécifique, par exemple en volume, en kWh/m³. Pour une vision plus économique de la

chose, la capacité de stockage doit être rapportée au coût de l'accumulateur.

- Puissance de charge et de décharge** La capacité de charge et de décharge désigne la vitesse à laquelle un accumulateur peut absorber puis restituer une puissance thermique déterminée. Elle est essentielle pour pouvoir adapter au mieux le réservoir au profil de charge et de décharge que le type d'application requière. Contrairement à la capacité de stockage, la puissance n'est pas influencée par l'effet de stockage physique. Outre l'écart de température, le débit massique ou le transfert de chaleur jouent par exemple un rôle beaucoup plus important. Le dimensionnement des sections de conduites d'amenée et de retour ou la technique de conception d'un échangeur de chaleur ou d'un réacteur aux surfaces de transfert spécifiques, par exemple, sont en effet très importants. Dans des conditions conformes aux conditions d'application, la capacité d'un réservoir est considérée comme correspondant à capacité nominale. La puissance réelle dépend des véritables paramètres de processus. La puissance peut être donnée en valeurs absolues en W, ou bien en W/m^3 ou en W/kg sur la base du volume ou de la masse du réservoir. Afin d'évaluer la rentabilité d'un réservoir, la puissance doit également être mise en relation avec les coûts. Il est également très courant de calculer le rapport entre capacité (en kWh) et puissance (en kW), notamment pour les accumulateurs de chaleur latente. Ce ratio donne la durée, en heures, nécessaire à la charge ou à la décharge du réservoir, qui peut être différente pour ces deux opérations.
- Taux d'utilisation:** le taux d'utilisation désigne le rapport entre l'énergie utile garantie par la décharge

et l'énergie absorbée par l'accumulateur pendant la charge. La chaleur utile est inférieure à la chaleur fournie du fait des pertes thermiques des accumulateurs. De même, l'exergie accumulée diminue au fur et à mesure que la température baisse. Le taux d'utilisation ne se mesure pas physiquement et est généralement indiqué en pourcentage. Lire aussi le chapitre 2.6.1 pour en savoir plus sur le terme taux d'utilisation.

- Cycles de stockage:** on appelle la période située entre la charge et la décharge du réservoir la durée de stockage (ou période de stockage) (Fig. 2.29). L'addition des durées de charge, de stockage et de décharge (plus éventuellement du temps d'arrêt une fois le réservoir déchargé) constitue un cycle de stockage. Le détail des cycles de stockage dépend des profils temporels de la source de chaleur et du consommateur, mais aussi de la capacité de stockage et des puissances de charge et de décharge possibles. Dans le cas d'un accumulateur d'énergie thermique, ces durées peuvent varier de quelques minutes à une année. Si un ou plusieurs processus irréversibles affectant la capacité de stockage se déroulent lors d'un cycle, le nombre de cycles de stockage réalisables devient alors plus limité. La stabilité des accumulateurs d'énergie thermique est déterminée par leur degré de dégradation au cours d'un certain nombre de cycles. Si un système de stockage permet de nombreux cycles en un an, sa rentabilité n'en est que meilleure. Il convertit ainsi une grande quantité d'énergie, met souvent à disposition l'énergie accumulée et est par conséquent plus vite amorti.

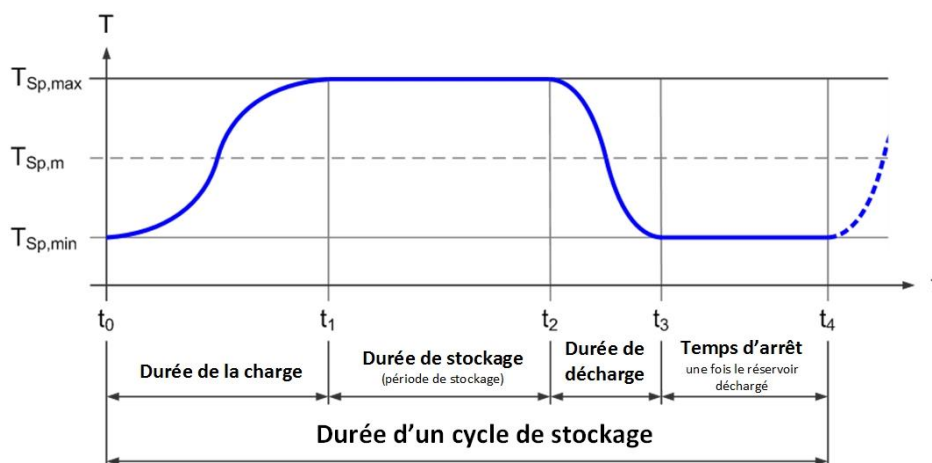


Fig. 2.29 Température du réservoir en fonction de la durée, avec termes définissant les différents cycles de stockage.

2.10.2 Techniques de stockage

L'énergie thermique peut se diviser en différentes techniques de stockage. Dans le cadre de réseaux de chauffage à distance, on utilise principalement le stockage de chaleur sensible, car cette technologie est la plus développée et se révèle relativement peu coûteuse. Pour être exhaustif, notons que des accumulateurs de chaleur latente ou des accumulateurs thermochimiques ont également été mis en place, mais qu'ils

ne sont pratiquement pas utilisés pour les réseaux de chauffage à distance.

2.10.2.1 Accumulateurs de chaleur sensibles

Avec un accumulateur de chaleur sensible, le fluide caloporteur est chauffé ou refroidi sans changer de phase. La quantité d'énergie stockée dépend de la capacité thermique spécifique de la substance en $kJ/(kg \cdot K)$. La plupart du temps, on utilise de l'eau, du fait

de sa capacité thermique spécifique élevée qui la rend écologique, économique, stable sur le plan thermique, et disponible pratiquement partout.

Les réservoirs non pressurisés dont le fluide est l'eau peuvent être utilisés à des températures comprises entre 0°C et 100°C. Au-delà de 100°C, ils sont soumis à une certaine pression. Pour la chaleur industrielle, les températures typiques peuvent s'élever jusqu'à environ 200°C. Au-delà de 100°C, la pression de vapeur grimpe, appliquant alors au réservoir des exigences de pression élevées et entraînant une hausse des coûts.

En raison de leur température d'ébullition plus importante, les accumulateurs de chaleur à l'huile thermique peuvent également fonctionner à des températures plus élevées en fonction du type d'huile thermique (parfois jusqu'à 400°C). La conductivité thermique de cette huile est nettement plus faible que celle de l'eau, de même que sa capacité thermique, qui est environ deux fois plus petite. Combiner huile thermique et couche rocheuse à haute capacité thermique permet d'améliorer la capacité de stockage et de réduire la quantité d'huile nécessaire, celle-ci se révélant relativement coûteuse. Cette association est similaire à celle d'un accumulateur de chaleur à eau/gravier pour les utilisations à basse température. Pour les températures élevées, on utilise également des accumulateurs de chaleur à matières solides (béton, céramique spéciale); pour les températures négatives, on utilise des mélanges eau-glycol.

Selon la hausse de température et les températures de charge et de décharge conditionnées par l'usage qui en est fait, les accumulateurs de chaleur latente et les accumulateurs thermochimiques présentent en règle générale des densités d'énergie plus élevées que celles des accumulateurs de chaleur sensibles. L'utilisation d'accumulateurs de chaleur latente se révèle pertinente dans le cas d'une hausse de température d'env. 20 K max. (p. ex. accumulateur de glace). Avec une hausse de plus de 50 K, un accumulateur de chaleur sensible à eau présente déjà une densité d'énergie plus élevée. De plus, les accumulateurs de chaleur sensibles possèdent une technologie sophistiquée et sont nettement plus économiques.

Dans le cas d'accumulateurs d'énergie sensibles, l'écart entre la température du fluide caloporteur et la température ambiante est relativement élevé, d'où l'importance de l'isolation thermique, afin de réduire l'autodécharge au cours de la période de stockage.

2.10.2.2 Accumulateurs de chaleur latente

Un accumulateur de chaleur latente stocke l'énergie nécessaire à un changement de phase en plus de la chaleur sensible. En pratique, il s'agit généralement d'un passage des phases solide à liquide. La variation de volume est généralement inférieure à 10% et est tout à fait gérable sur le plan technique. Par ailleurs, l'enthalpie du changement de phase est suffisamment élevée.

Les accumulateurs de chaleur latente présentent plusieurs avantages par rapport aux accumulateurs de chaleur sensibles. Ils permettent en effet de stocker

beaucoup plus d'énergie thermique dans le cas de faibles différences de température. Leur densité d'énergie est donc plus élevée pour de telles applications et, grâce à leur grande capacité de stockage, ils peuvent être beaucoup plus compacts. La température lors de la charge et la décharge reste également très longtemps constante, ce qui permet par exemple l'emploi de matériaux à changement de phase (MCP) intégrés à la structure du bâtiment.

Pour le transport d'énergie thermique, les coulis à changement de phase (PCS, *Phase Change Slurries*), parfois appelés slurry, sont la solution idéale. Ces coulis présentent l'avantage de toujours pouvoir être pompés et ce, peu importe l'état de la matière. Ils sont par exemple utilisés pour la climatisation des bâtiments ou dans les installations industrielles.

L'inconvénient toutefois est que leur coût reste relativement élevé et que cette technologie n'a pas encore été adaptée au domaine du chauffage à distance.

2.10.2.3 Accumulateurs de chaleur thermochimiques

On entend par stockage d'énergie thermochimique les réactions chimiques réversibles dont les produits de réaction peuvent être séparés et stockés de façon prolongée. Cette séparation n'entraîne pas de pertes de stockage et ce n'est qu'après décharge que la réaction exothermique restitue l'énergie accumulée. Les accumulateurs d'énergie thermochimique permettent de très hautes densités d'énergie, mais ne sont en pratique que très peu utilisés actuellement car cette technologie n'en est encore qu'au stade de la recherche fondamentale.

2.10.3 Principes de base du stockage de l'énergie

2.10.3.1 Processus de stockage

Les accumulateurs d'énergie thermique accroissent leur teneur en énergie grâce à une alimentation énergétique ou à l'apport d'une source d'énergie (charge), stockent cette énergie pendant une certaine durée (stockage), si possible sans pertes, puis libèrent à nouveau cette énergie ou source d'énergie lorsque le besoin se manifeste (décharge). Lors de la décharge, la teneur en énergie du réservoir diminue (Fig. 2.30).

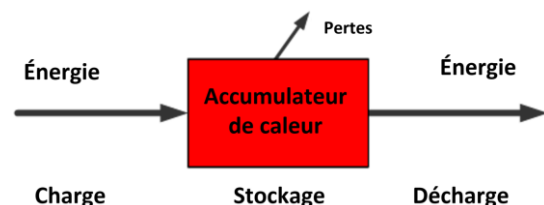


Fig. 2.30 Processus de stockage d'énergie thermique. Charge – Stockage – Décharge

2.10.3.2 Energie thermique

Le terme d'accumulateur d'énergie n'est, dans les faits, pas correct sur le plan physique. En effet, cette énergie

ne peut pas être consommée, mais convertie; elle n'est donc à proprement parler pas stockée. L'accumulateur possède plutôt la capacité thermodynamique de transmettre une certaine quantité de chaleur ou de froid à un autre fluide caloporteur. Le terme **exergie** désigne par conséquent la part d'énergie pouvant être convertie sans restriction en d'autres formes d'énergie, dans les conditions ambiantes normales. Plus l'écart entre la température du réservoir de stockage et la température ambiante se creuse, plus la teneur en exergie et la valeur de la chaleur augmentent. Le terme **anergie**, quant à lui, désigne la part d'énergie dissipée dans l'environnement et donc non récupérable. Dans le cas d'un processus de charge, de stockage et de décharge d'un accumulateur d'énergie thermique présentant des pertes, la teneur en anergie augmente et la teneur en exergie baisse (Fig. 2.31). Le résultat de la somme des teneurs en anergie et en exergie reste constant.

L'équation suivante correspond au calcul de la teneur en exergie.

$$E_{ex} = Q \frac{T_{Sp} - T_U}{T_{Sp}} = Q \left(1 - \frac{T_U}{T_{Sp}} \right)$$

E_{ex} = Teneur en exergie dans le réservoir [kWh]

Q = Teneur en énergie dans le réservoir [kWh]

T_{Sp} = Température de stockage [K]

T_U = Température ambiante [K]

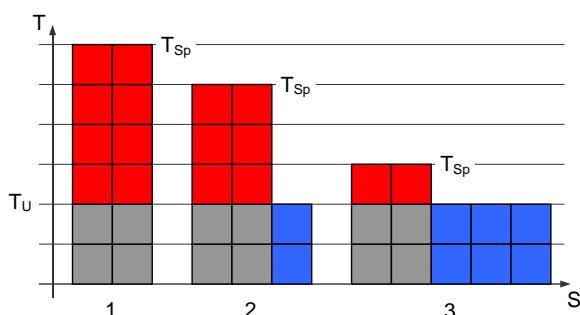


Fig. 2.31 Teneur en énergie de l'accumulateur de chaleur (diagramme T-S d'après [34]). La teneur en exergie (en rouge) dans le réservoir est convertie en anergie (en bleu) au cours du stockage et de la décharge. L'énergie résultant de la somme de ces deux éléments reste constante.

- 1) Réservoir chargé
- 2) Stockage dont pertes de chaleur
- 3) Emission de chaleur (décharge).

On constate que la teneur en exergie dépend de la quantité de chaleur Q , de la température de stockage T_{Sp} et de la température ambiante T_U . La fraction entre parenthèses $(1 - T_U/T_{Sp})$ correspond au rendement thermodynamique (Carnot), c'est-à-dire à la capacité de travail maximum que contient la chaleur.

À peu de choses près, seuls les accumulateurs de chaleur sensibles peuvent être mis en place dans le domaine du chauffage à distance. On entend par chaleur sensible (dans le contexte de la teneur en énergie du réservoir ou de la quantité de chaleur qu'il contient)

l'absorption ou la restitution de chaleur, qui entraînent toutes deux un changement sensible de la température. Le fluide caloporteur utilisé est chauffé ou refroidi. La corrélation entre la quantité de chaleur Q retenue par l'accumulateur et la variation de température ΔT est la suivante:

$$Q = m c_p \Delta T$$

Q = Quantité de chaleur [kWh]

m = Masse du fluide caloporteur contenu dans le réservoir [kg]

c_p = Capacité thermique spécifique du fluide caloporteur [J/(kg·K)]

ΔT = Variation de température du réservoir [K]

La quantité de chaleur Q dépend, au-delà de la variation de température ΔT et de la masse m , de la capacité thermique spécifique c_p du fluide caloporteur. Une capacité thermique spécifique de l'accumulateur de chaleur élevée est une bonne chose, car ce dernier a alors besoin de moins de fluide caloporteur pour stocker une même quantité d'énergie, permettant une réduction de la taille du réservoir. De tous les fluides caloporteurs auxquels il est possible d'avoir recours, l'eau est, avec env. 4.2 kJ/(kg·K), le fluide qui présente la plus grande capacité thermique spécifique par masse. Même en termes de volume, l'eau possède la valeur la plus élevée, à savoir plus élevée que celle des métaux ou des matériaux naturels tels que la pierre. Le réservoir à lit de gravier dont il est parfois question présente une capacité thermique cumulée également inférieure à celle d'un accumulateur à eau.

2.10.3.3 Isolation thermique

L'isolation thermique des accumulateurs de chaleur sensibles joue un rôle capital dans la réduction des pertes thermiques. La corrélation entre l'écart entre les températures et les **pertes thermiques** d'un réservoir est la suivante:

$$\dot{Q}_V = U A (T_{Sp} - T_U)$$

\dot{Q}_V = Pertes de chaleur du réservoir [W]

U = Coefficient de transmission thermique [W/(m²·K)]

A = Surface du réservoir [m²]

T_{Sp} = Température de stockage [°C]

T_U = Température ambiante [°C]

Le paramètre essentiel en matière d'isolation thermique, outre la surface A du réservoir, la température de stockage T_S et la température ambiante T_U , est le coefficient de transmission thermique U . La valeur U se mesure en W/(m²·K) et indique quelle puissance par Kelvin d'écart de température est transmise par un mètre carré de surface. Le coefficient de transmission thermique doit être calculé au cas par cas selon la forme du réservoir de stockage (sphérique, cylindrique, etc.). Avec une paroi plane à n couches, il peut se calculer comme suit:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

U	= coefficient de transmission thermique [W/(m ² ·K)]
s	= épaisseur de la couche d'isolation [m]
α	= coefficient de transfert de chaleur [W/(m ² ·K)]
λ	= conductivité thermique [W/(m·K)]
i	= interne (réservoir)
a	= externe (environnement)

Le coefficient de transmission thermique dépend donc de la conductivité thermique λ et de l'épaisseur de la couche s_i des matériaux d'isolation, ainsi que des coefficients de transfert de chaleur α interne et externe. α représente donc le facteur de proportionnalité correspondant à l'intensité du transfert de chaleur à une interface. Le coefficient de transfert de chaleur n'est pas une constante: il dépend de la vitesse d'écoulement, du type de fluide caloporteur, des comportements géométriques et de la qualité des surfaces.

La structure à pores fins des **matériaux d'isolation** courants (tels que les mousses poreuses ou les isolants fibreux) supprime la convection de l'air. Le matériau d'isolation en lui-même doit donc en principe être un mauvais conducteur thermique. Les matériaux d'isolation sont proposés soit sous forme de plaques, soit sous forme de poudre déversable, permettant de s'adapter parfaitement à toutes les géométries. Les matériaux d'isolation non tissés flexibles (tels que la laine de verre ou la laine minérale) sont également répandus, mais ont l'inconvénient d'absorber et de stocker l'humidité. Les matériaux d'isolation généralement vendus dans le commerce présentent une conductivité thermique de 0.025 à 0.07 W/(m·K).

Outre le choix du matériau d'isolation, d'autres aspects doivent également être pris en compte afin de garantir une bonne isolation thermique.

- La diffusion de vapeur d'eau (ou les petites fuites) humidifie les couches isolantes, qui n'assurent plus correctement leur fonction.
- Le matériau d'isolation peut être altéré par l'exposition au soleil et la contrainte thermique.
- Les plaques d'isolation peuvent générer, en cas de mauvaise installation ou de dilatation thermique pendant le fonctionnement, des entrefers irréversibles et, par conséquent, la convection ainsi que des effets de cheminée.
- Le déversement de poudres peut provoquer le tassement du matériau, n'isolant alors plus la partie supérieure du réservoir, dans laquelle la température de l'air est pourtant la plus élevée, et provoquant ainsi d'importantes pertes thermiques.
- Il ne faut cependant pas négliger l'isolation de la partie inférieure du réservoir; en effet, lorsque la température de retour est élevée et que le réservoir est chargé, les pertes ponctuelles peuvent se révéler importantes.

- Les nombreux raccords et/ou les raccords mal isolés ainsi que la jupe d'acier nécessaire à la pose peuvent entraîner des pertes thermiques pouvant représenter jusqu'à la moitié de l'ensemble des pertes de l'isolant mural.
- La convection naturelle intraconduite (circulation monotube) doit également être évitée, de préférence à l'aide de thermosiphons ou en posant des freins anticonvection.

Faire le vide garantit également une très bonne isolation (même principe que la bouteille isotherme à double paroi); le vide remplace alors le matériau d'isolation. Toutefois, du fait de la taille des accumulateurs de chaleur utilisés dans le domaine du chauffage à distance, ce type d'isolation n'est généralement pas employé.

2.10.3.4 Refroidissement progressif

Le refroidissement d'un réservoir sensible est représenté par la fonction exponentielle de l'équation suivante:

$$\Delta T(t) = \Delta T_0 \cdot e^{-\frac{A \cdot U}{V \cdot \rho \cdot c_p} t}$$

ΔT(t)	= Ecart de température à un instant t [K]
ΔT ₀	= Ecart de température initiale [K]
A	= Surface du réservoir [m ²]
V	= Volume du réservoir [m ³]
U	= Coefficient de transmission thermique [W/(m ² ·K)]
ρ	= Densité du fluide caloporteur [kg/m ³]
c _p	= Capacité thermique spécifique du fluide caloporteur [J/(kg·K)]
t	= Période d'observation [s]

ΔT(t) représente l'écart entre la température du réservoir et la température ambiante à un instant t, et ΔT₀ l'écart de température initial. On constate que le coefficient de transmission thermique n'est pas le seul facteur permettant de rallonger le plus possible les durées de refroidissement pendant le stockage; le rapport surface/volume du réservoir ainsi que la densité ρ et la capacité thermique spécifique c_p du fluide caloporteur sont également importants.

La Fig. 2.32 présente l'exemple du refroidissement d'un réservoir de stockage utilisé pour des appels de puissance thermique de 1'000 kW. Un réservoir chargé et un écart de température de 30 K permettent de couvrir les appels de puissance thermique pendant une heure si le volume du réservoir est de 29 m³. En imaginant que le réservoir est cylindrique et que le rapport hauteur/diamètre s'élève à près de 7.3 (cf. exemple page suivante notamment: diamètre: 1.1 m; hauteur: 8 m), le rapport surface/volume est alors de 2.10. Supposons que le réservoir chargé présente une température de 80°C et que la température ambiante moyenne s'élève à 10°C, le coefficient de transmission thermique moyen de l'enveloppe du réservoir est alors de 0.2 W/(m²·K).

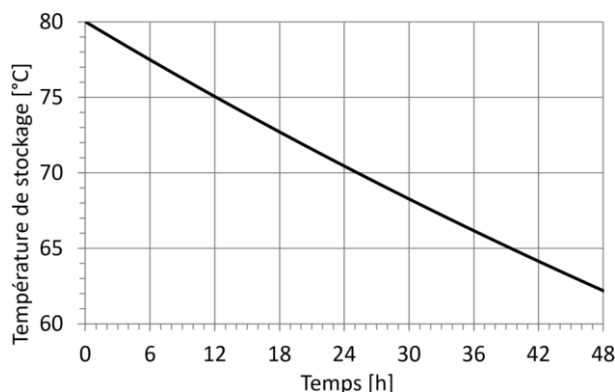


Fig. 2.32 Refroidissement de la température du réservoir en fonction du temps. Dimensionnement du réservoir adapté à une demande de puissance de 1'000 kW, compensation pour une heure à un écart de température de 30 K. Température du réservoir et température ambiante initiales respectivement de 80°C et 10°C.

2.10.4 Conception de l'accumulateur

Il existe de nombreux modèles d'accumulateurs d'énergie thermique. Le type de fabrication dépend de la technique de stockage employée et des exigences découlant de l'utilisation à laquelle l'accumulateur se destine. Dans le domaine du chauffage à distance et des accumulateurs de chaleur sensibles qui y sont employés, le **modèle** le plus simple est celui que l'on appelle à **charge directe**: le liquide contenu dans l'accumulateur de chaleur est également le fluide caloporteur, il n'y a en effet aucune séparation hydraulique. L'accumulateur ne contient qu'un seul composant sur le plan chimique, composant dont la température varie mais qui ne change pas d'état physique. L'avantage de la charge directe est la simplicité de conception du modèle et, sauf ajouts pour optimisation du flux d'amenée, l'absence d'équipements internes. Le réservoir est ainsi exclusivement rempli de fluide de stockage actif. En cas de **charge indirecte**, la chaleur est transmise au fluide caloporteur par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Ce modèle de conception est mis en place lorsque l'approvisionnement en chaleur nécessite différents liquides (p. ex. eau glycolée/eau) et/ou différentes pressions de système entre le réseau et l'accumulateur. Autre avantage: celui de la protection contre la corrosion, l'encrassement et les pertes de fluide de stockage, étant donné que le réservoir ne présente aucune connexion avec son environnement, puisqu'il s'agit d'un circuit fermé. Toutefois, l'inconvénient reste les pertes énergétiques relativement élevées au niveau de l'échangeur de chaleur.

Selon l'équation de base de la puissance thermique, la **capacité de charge et de décharge** d'un accumulateur à charge directe ou indirecte dépend principalement, outre l'écart de température, du débit massique maximum du fluide caloporteur:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T = \dot{V} \rho c_p \Delta T = w A \rho c_p \Delta T$$

La vitesse d'écoulement maximum dans l'accumulateur a donc un impact direct sur le **diamètre** d'un réservoir cylindrique (Fig. 2.33). Afin de maintenir le phénomène de stratification de température dans l'accumulateur, la capacité de charge et de décharge utile est limitée, à titre de référence, par une vitesse d'écoulement maximum comprise entre 6 m/h (0.0017 m/s) et 10 m/h (0.0028 m/s) dans le réservoir.

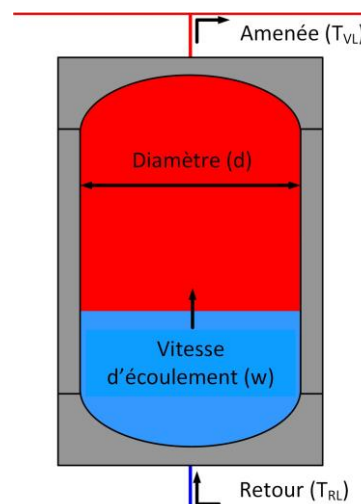


Fig. 2.33 Représentation de la vitesse d'écoulement et du diamètre d'un accumulateur d'énergie à charge directe avec stratification idéale de la température (en rouge = haute température; en bleu = basse température).

Selon le dimensionnement du réservoir et l'écart entre les températures d'amenée et de retour, les capacités de charge et de décharge atteintes peuvent être élevées. Sur la base de l'équation de la puissance thermique, on obtient, pour le diamètre d'une conduite ou d'un accumulateur cylindrique, la corrélation suivante avec $A = d^2 \pi/4$:

$$d = \sqrt{\frac{\dot{Q} \cdot 4}{w \Delta T \rho c_p \pi}} \approx 0.0176 \sqrt{\frac{\dot{Q}}{w \Delta T}}$$

d = Diamètre intérieur du réservoir (m)

\dot{Q} = Puissance de charge ou de décharge du réservoir (kW)

w = Vitesse d'écoulement du réservoir (m/s); entre 0.0017 m/s (6 m/h) et 0.0028 m/s (10 m/h)

ρ = Densité de l'eau (kg/m³)
simplification pour eau à 60°C (983 kg/m³)

c_p = Capacité thermique de l'eau (kJ/(kg·K))
simplification pour eau à 60°C (4.183 kJ/(kg·K))

ΔT = Ecart de température entre amenée et retour (K)

Exemple de calcul: Pour une capacité de charge et d'extraction de 1'000 kW, d'une vitesse d'écoulement maximum de 0.0022 m/s (8.0 m/h) et d'un écart de température de 30 K, le diamètre de l'accumulateur doit être d'env. 2.2 m (Fig. 2.34). Afin de disposer de cette capacité pendant une heure, l'accumulateur cylindrique

doit mesurer au moins 8 mètres de haut. Le volume est par conséquent d'env. 29 m³.

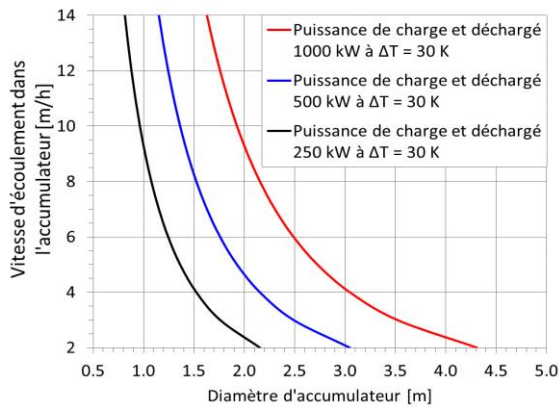


Fig. 2.34 Comparaison, sur la base de l'équation susmentionnée, du diamètre du réservoir en fonction de la vitesse d'écoulement, à une puissance de charge et de décharge de 250 kW, 500 kW et 1000 kW, pour un écart de température de 30 K.

La compensation thermique des températures des zones chaude et froide s'avère nécessaire afin d'optimiser l'utilisation des accumulateurs de chaleur, car elles constituent des pertes d'exergie et augmentent ainsi la consommation énergétique. Dans les accumulateurs à eau, la **stratification de la température** découle en particulier de l'écart de densités, comme le montre la Fig. 2.33, avec une zone chaude dans la partie supérieure du réservoir et une zone froide dans la partie inférieure. La configuration des **flux d'amenée et de retour** d'un accumulateur est donc essentielle. L'impulsion générée par le débit massique du flux d'entrée provoque un tourbillon à l'intérieur de l'accumulateur, ce qui peut détruire la stratification thermique. La force du tourbillon généré par le flux d'amenée dépend du type de flux, de la formation de la stratification thermique et de l'impulsion du flux d'amenée.

Les modèles d'amenée et de retour à privilégier sont p. ex. les tubes perforés ou les déflecteurs circulaires à sortie horizontale, comme le montre la Fig. 2.35. A l'inverse, les conduites tubulaires à raccordement direct, les raccords coudés proches du fond ou à tôle déflectrice sont quant à eux peu adaptés. Afin d'atténuer le flux d'amenée sur les modèles inadaptés, des ajouts tels que des tôles perforées et/ou des sorties en forme d'entonnoir (diffuseurs) sont à prévoir. Tout raccord ou ajout de tout type doit quoi qu'il en soit être suffisamment dimensionné pour pouvoir maîtriser la vitesse du flux d'entrée, et donc minimiser la formation de tourbillons. A titre de référence, il est recommandé de mettre en place une vitesse de flux d'entrée de 0.1 m/s à 0.2 m/s.

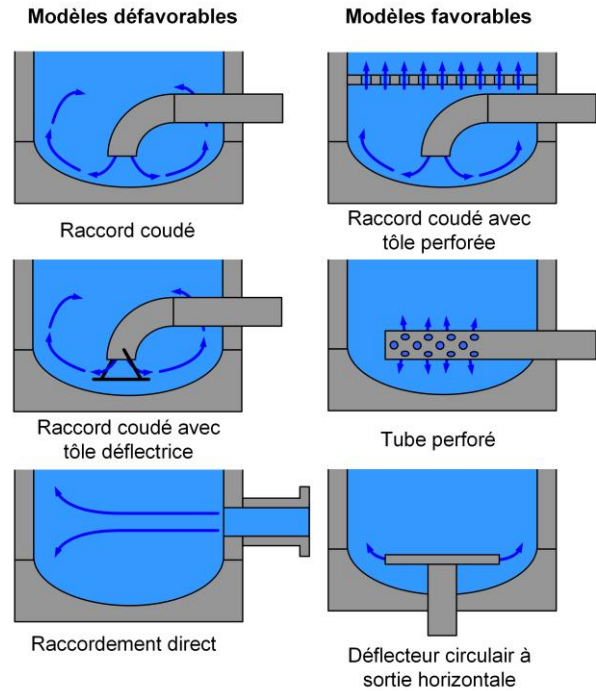


Fig. 2.35 Conceptions des flux d'amenée et de retour d'un réservoir. Modèles inadaptés à gauche, adaptés à droite.

Le **rapport hauteur/diamètre** est un autre indicateur issu du dimensionnement et de la conception de l'accumulateur, ou que le fournisseur est tenu de respecter. Deux points opposés sont à prendre en considération. D'une part, il est possible d'obtenir un rapport surface/volume optimal pour des rejets de chaleur minimales et, d'autre part, il existe des valeurs indicatives pour la formation optimale d'une stratification thermique dans le réservoir, par exemple afin d'enregistrer l'état de charge de l'accumulateur.

La Fig. 2.36 présente le refroidissement de l'accumulateur selon la taille de l'accumulateur (selon le rapport surface/volume). Le dimensionnement a par exemple été pensé pour des appels de puissance thermique de 1'000 kW. Les volumes de stockage ont été déterminés pour la compensation de la chaleur requise pendant 1, 12 et 24 heures avec un écart de température de 30 K. Les accumulateurs présentent respectivement un volume de 29 m³, 350 m³ et 700 m³ pour un rapport surface/volume de 1.8, 0.79 et 0.62 m²/m³. Le rapport surface/volume est basé sur le cas d'un accumulateur de chaleur cylindrique présentant un **rapport hauteur/diamètre** de 1. Il en résulte un rapport surface/volume optimal, qui se rapproche autant que possible de celui d'une sphère. On suppose ensuite que la température du réservoir chargé s'élève à 80°C et la température ambiante moyenne à 10°C. Le coefficient

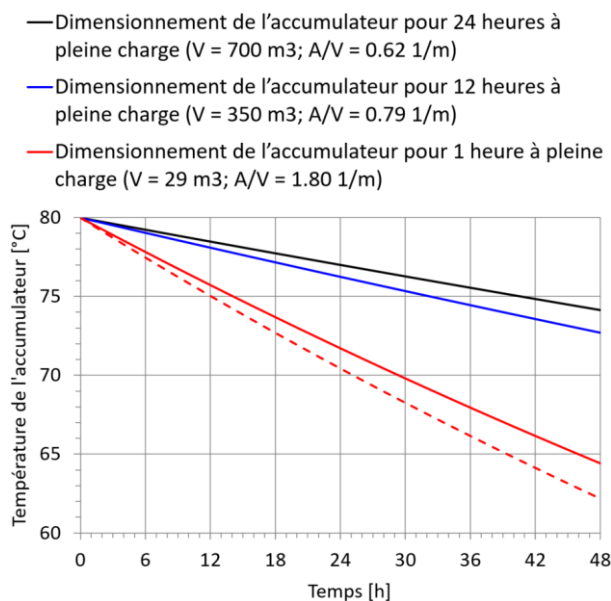


Fig. 2.36 Refroidissement de la température du réservoir en fonction du temps. Dimensionnement de l'accumulateur pour des appels de puissance thermique de 1'000 kW, une compensation pour 1, 12 et 24 heures à pleine charge et un rapport hauteur/diamètre de 1. La ligne pointillée correspond à un rapport hauteur/diamètre de 7.3. Départ à une température de stockage de 80°C et à une température ambiante moyenne de 10°C. $1/\text{m} = \text{m}^2/\text{m}^3$.

de transmission thermique moyen des parois des trois accumulateurs est de $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. A titre de comparaison, on peut voir sur la Fig. 2.32 un accumulateur présentant un rapport surface/volume de $2.10 \text{ m}^2/\text{m}^3$ et un volume de 29 m^3 .

On constate aisément que le rapport surface/volume ou que le rapport hauteur/diamètre a un impact considérable sur la durée de refroidissement. Un **rapport hauteur/diamètre de 5 à 10** est donc d'autre part recommandé afin d'obtenir une stratification thermique optimale. La ligne pointillée rouge sur la Fig. 2.36 en est un bon exemple. Elle a les mêmes caractéristiques que la ligne rouge pleine, mais présente un rapport hauteur/diamètre de 7.3 au lieu de 1. Une couche d'isolation plus épaisse permet de compenser les rejets de chaleur plus importants dus à des rapports hauteur/diamètre plus élevés. Cela n'est toutefois rentable qu'avec des accumulateurs plus petits.

En fonction de l'utilisation, de l'espace et du volume requis, plusieurs réservoirs de stockage peuvent être nécessaires. Il faut en effet distinguer **fonctionnement en série et en parallèle**. Un fonctionnement **en série** n'est recommandé que si la vitesse d'écoulement maximum de l'accumulateur ne dépasse pas les 6 à 10 m/h (cf. puissances de charge et de décharge). Dans le cas contraire, le fonctionnement en parallèle est recommandé. Dans le cas d'un fonctionnement **parallèle**, il faut respecter le principe des chutes de pression constantes (boucle de Tichelmann). Le principe est que

le fluide circulant dans le système doit toujours parcourir la même distance (même diamètre de conduite, même longueur). Ainsi, chaque élément est à l'origine des mêmes pertes de pression, de sorte que toutes les pièces sont traversées et chauffées uniformément, ou alors sont chargées ou déchargées simultanément, comme p. ex. avec les accumulateurs montés en parallèle. Il est également possible d'exploiter plusieurs accumulateurs en série ou en parallèle grâce à des robinets à papillon. Cela peut par exemple être utile s'il est impossible de déterminer de manière concluante la capacité de charge et de décharge effective de l'accumulateur. Cette technique est cependant plus complexe et plus coûteuse.

Les accumulateurs dont le diamètre ne dépasse pas 4.5 m sont adaptés au **transport** sur route. Les réservoirs plus imposants (diamètre plus élevé) doivent être soudés ou bétonnés sur site et ne sont généralement plus résistants à la compression. Dans le cas d'un diamètre de 4.5 m et d'un rapport hauteur/diamètre de 5 (hauteur 22.5 m), le volume atteint près de 358 m^3 .

La **résistance à la compression** de l'accumulateur ne doit être plus élevée que nécessaire. Etant donné qu'un accumulateur est généralement raccordé à la conduite de retour, il peut s'orienter vers une pression de retour plus basse. Les réservoirs habituellement vendus dans le commerce sont généralement destinés à une résistance à la compression de 6 bar à 10 bar (rarement 15 bar). De plus, les épaisseurs de paroi requises deviennent trop grandes pour rester rentables. Jusqu'à 100°C, les accumulateurs sont conçus non pressurisés et équipés d'un coussin de gaz (p. ex. d'azote (N_2)). Au-delà de 100°C (accumulateurs de pression), ils ne sont pas équipés de coussins de gaz.

Pour les **réservoirs à longue durée d'accumulation** destinés aux applications de chauffage et de refroidissement situés dans la plage de température de 0°C à 100°C, on utilise des accumulateurs de chaleur souterrains:

- réservoirs aquifères;
- accumulateurs à sonde géothermique;
- cavernes-réservoirs;
- accumulateurs de chaleur à eau/gravier ou sol/eau.

Les réservoirs aquifères et accumulateurs à sonde géothermique ont l'inconvénient de ne pas pouvoir bénéficier d'isolation thermique. Ils présentent donc des rejets de chaleur plus importants que les accumulateurs d'eau surchauffée et accumulateurs de chaleur à eau/gravier bien isolés. Il convient également de noter qu'il leur faut plusieurs années avant d'atteindre le régime stationnaire et ainsi être rentables. De ce fait, le taux d'utilisation n'est pas très élevé au début. En effet, le volume de stockage et la terre adjacente doivent être chauffés jusqu'à atteindre la température d'exploitation. Dans le domaine du stockage de chaleur à long terme, par exemple pour le stockage saisonnier de la chaleur solaire ou, dans le cas de centrales thermiques, pour une flexibilisation des centrales électriques, deux aspects

sont essentiels: les concepts d'isolation innovants, qui doivent avant tout se caractériser par une diminution des coûts, et les unités de charge stratifiées, qui stockent le fluide caloporteur dans la zone de température adaptée en cas de charge directe.

2.10.5 Intégration et utilisation

Les accumulateurs d'énergie thermique jouent un rôle important en ce qui concerne l'approvisionnement en chaleur. Dans le domaine du chauffage à distance, on utilise les accumulateurs d'énergie thermique d'une part seuls, dans le cadre du chauffage, et d'autre part combinés, dans le cadre à la fois de l'électricité et du chauffage.

2.10.5.1 Intégration dans le cadre du chauffage

Les utilisations des accumulateurs d'énergie thermique dans le domaine du chauffage et en particulier du chauffage à distance sont très diverses. On met ici l'accent sur l'utilisation en centrale thermique, dans laquelle la chaleur est produite de façon centralisée, pour ensuite être distribuée sur site ou transférée par le biais d'un réseau de transport de distribution. Dans ce cas, la mission principale de l'accumulateur d'énergie thermique est de compenser les pics et les chutes de puissance afin que l'installation de production de chaleur dispose de suffisamment de temps pour pouvoir réagir aux variations des besoins. Cela se révèle particulièrement important pour des installations de production d'énergie à forte inertie telles que les systèmes de chauffage au bois. Selon la teneur en eau de leur combustible, la puissance des systèmes automatiques de chauffage au bois peut varier d'environ 1% par minute. Cela signifie qu'à partir de son fonctionnement normal, d'une puissance de 30%, un système de chauffage au bois a besoin d'env. 70 minutes pour restituer une puissance thermique de 100%. Un accumulateur d'énergie thermique peut nettement améliorer le fonctionnement d'une chaudière à bois étant donné qu'il équilibre les pics et les chutes de consommation, tandis que la chaudière à bois peut, quant à elle, suivre les appels de puissance thermique moyens. Cela permet un dimensionnement réduit de la chaudière à bois et lui assure des durées de fonctionnement plus importantes, de plus faibles taux d'émission de polluants et un meilleur fonctionnement. QM Chauffages au bois [21] recommande une capacité de stockage permettant de compenser la puissance thermique nominale de la chaudière à bois pendant une heure à un écart de température de 30 K. En cas d'installations à chaudières multiples, la capacité de stockage doit être adaptée à toutes les exigences, en respectant toutefois au minimum la puissance thermique nominale de la chaudière à bois la plus grande. Si l'écart de température dans le réservoir est inférieur à 30 K, le volume de stockage doit être ajusté en conséquence.

Il est également important d'être attentif au bon fonctionnement de l'accumulateur. L'exploitation d'un accumulateur d'énergie thermique passe par une stratification de température non perturbée, comme l'explique

le chapitre 2.10.4. C'est en effet ce que garantissent des ajouts appropriés et des sections d'amenée et de refoulement largement dimensionnées, ainsi qu'un bon équilibrage hydraulique. Dans le cas de générateurs de chaleur au fonctionnement lent, comme une chaudière à bois, il faut également veiller à l'état de charge du réservoir et aux conditions de puissance qui en résultent pour la chaudière à bois. Pour ce cas précis, QM Chauffages au bois [22] émet des recommandations également applicables à d'autres installations.

Autre utilisation possible des accumulateurs: la réticulation thermique (réseaux Anergie ou système LowEx) de différentes sources de chaleur et dissipateurs thermiques d'un niveau de température relativement bas avec accumulateurs à sonde géothermique ou à champ de capteurs géothermiques pour le stockage saisonnier de la chaleur et en utilisant des pompes à chaleur centralisées ou décentralisées. En Allemagne et au Danemark par exemple, on utilise également de grands accumulateurs de chaleur saisonniers dans le domaine de l'énergie solaire thermique [36], [37], [38]. La mission principale de l'accumulateur d'énergie est alors de compenser la non-simultanéité de la production de chaleur et de la demande de chaleur. Selon l'utilisation qui en est faite, il s'agit de réservoirs d'une durée de stockage de quelques jours, de quelques semaines voire d'un an.

Au-delà de la gestion classique de la charge du réservoir (comme lorsque l'on détermine un état de charge constant de 60%), les conditions météorologiques peuvent elles aussi influencer sur cette gestion. Cela doit particulièrement être pris en compte lorsque les conditions climatiques ont un impact considérable sur les besoins de chaleur, comme dans les serres. Les prévisions météorologiques peuvent permettre d'anticiper l'impact climatique 5 à 7 jours max. plus tôt, et de l'intégrer à la gestion de la charge du réservoir. Si le réservoir est suffisamment grand et qu'il possède une capacité correspondant à env. 4 à 8 heures de puissance nominale du générateur de chaleur à un écart de température donné, le générateur de chaleur peut alors être beaucoup plus petit et nettement plus exploité que sans accumulateur. Autre domaine d'application nécessitant de tenir compte des prévisions météorologiques, la réticulation thermique de différentes sources d'énergie par exemple, en particulier avec l'énergie solaire thermique.

Utiliser des accumulateurs d'énergie thermique offre en effet, selon le système, un potentiel d'optimisation du fonctionnement de l'installation considérable en ce qui concerne les coûts et la consommation d'énergie primaire. En voici les principaux aspects dans le domaine du chauffage.

- Les accumulateurs de chaleur réduisent les pics de demande de chaleur.
- Les installations de production de chaleur peuvent être plus petites.
- Les accumulateurs de chaleur ont un impact positif sur le fonctionnement de l'installation de production de chaleur.

- Les accumulateurs de chaleur constituent une réserve d'énergie en cas de défaillance ou de brève coupure.
- Les rejets de chaleur peuvent être exploités même s'ils ne sont pas générés au moment où cette chaleur s'avère utile.
- Les accumulateurs de chaleur décentralisés peuvent soulager le réseau de chauffage à distance en certains points stratégiques et permettre de raccorder d'autres consommateurs à un réseau pleinement exploité.

2.10.5.2 Intégration en centrales thermiques

Pour les centrales thermiques, on distingue fonctionnement à la chaleur et fonctionnement à l'électricité. En Suisse, les centrales thermiques décentralisées fonctionnent en règle générale à la chaleur, car les rendements électriques sont faibles et que les rejets de chaleur dissipés dans l'environnement sont limités par les exigences de la rétribution à prix coûtant du courant injecté, comme l'explique la Fig. 2.9. Dans le cas de systèmes fonctionnant à la chaleur, la centrale thermique suit la charge thermique, tandis que l'électricité n'est produite qu'à titre secondaire. Cela présente toutefois l'inconvénient que l'électricité est aussi en partie produite à des moments où le réseau n'en a pas besoin. Les centrales thermiques fonctionnant à la chaleur peuvent ainsi augmenter les besoins de stockage dans le secteur de l'électricité. Cela peut être évité en découplant partiellement la production de chaleur et d'électricité dans les centrales thermiques, grâce entre autres à l'utilisation d'accumulateurs de chaleur. Cette flexibilisation des centrales de couplage chaleur-force peut permettre d'optimiser la marche de l'installation en matière de coûts et de consommation d'énergie primaire. Pour ce faire, outre l'accumulateur de chaleur, on trouve aussi d'autres composants, tels que la chaudière de charge de pointe et la pompe à chaleur, la marche de l'installation avec contournement de la turbine à vapeur [39], ou encore l'utilisation d'accumulateurs d'électricité décentralisés. Le contournement de la production d'électricité n'est cependant pas souhaitable sur le plan énergétique, les accumulateurs d'électricité étant nettement plus coûteux que les accumulateurs de chaleur. Si aucun tarif de rachat fixe n'est établi en ce qui concerne la production d'électricité (ce qui est le cas sans rétribution à prix coûtant du courant injecté), l'utilisation d'accumulateurs de chaleur en centrale thermique devient alors relativement intéressante. Par conséquent, les centrales thermiques peuvent être utilisées au moins en partie pour la production d'une énergie de réglage coûteuse, suivant les besoins (Power-on-Demand), tandis que le réseau de chauffage à distance est alimenté en partie par l'accumulateur de chaleur. Par ailleurs, les accumulateurs de chaleur peuvent permettre de réaliser des économies en déterminant la puissance de l'installation.

3 Liaison entre fourniture et distribution de chaleur

Le présent chapitre présente les éléments de base et composantes les plus importants des centrales thermiques (principalement) se révélant nécessaires à l'alimentation en chaleur et à sa distribution.

On considère comme faisant la liaison entre la fourniture de chaleur et sa distribution l'unité de pompage équipée du dispositif de commande associé, ainsi que l'installation d'expansion et de maintien de pression. Dans certains cas, il peut être nécessaire de mettre en place une séparation du réseau ou une station de surpression.

3.1 Températures du réseau

Les températures d'amenée et de retour du réseau répondent aux exigences des consommateurs de chaleur en matière de température d'amenée ainsi qu'à la nécessité de présenter un écart de température particulièrement important, ou à celle d'avoir une température de retour aussi basse que possible.

3.1.1 Température d'amenée

Les **exigences des consommateurs de chaleur** varient du tout au tout (Tableau 3.1) et la température d'amenée du réseau de chauffage à distance doit en principe être capable de répondre aux attentes du consommateur de chaleur dont les besoins en température d'amenée sont les plus contraignants. En fonction de leur situation, les consommateurs de chaleur peuvent être regroupés en différents niveaux de température (p. ex. température élevée pour les radiateurs et basse pour le chauffage par le sol). Ce système peut permettre une mise en cascade avantageuse de la température d'amenée: la forte température de retour élevée d'un consommateur de chaleur sert alors de faible température d'amenée à un autre situé en aval.

Tableau 3.1 Températures d'amenée primaire requises en fonction des différents types de consommateurs de chaleur.

Consommateur de chaleur	Température d'amenée
Chaleur industrielle	
Hôpital avec production de vapeur stérile 3 bar	≥ 160°C
Processus de séchage dans le domaine de la technologie alimentaire	≥ 130°C
Site industriel avec réseau d'eau chaude secondaire 80/60	≥ 85°C
Baignoires et équipements de bien-être (circuit hygiène)	≥ 70°C
Serres à chauffage par l'air	≥ 60°C
Serres à chauffage par le sol	≥ 40°C
Chauffage des locaux et eau chaude	
Bâtiments avec radiateurs (avec ou sans EC)	≥ 65°C
Bâtiments équipés de chauffages à basse température (sans EC)	≥ 40°C

Dans le cas de **réseaux géographiquement très étendus**, l'écart de température a un impact considérable sur les coûts d'investissement et d'exploitation. En diminuant de moitié l'écart de température, le débit nécessaire pour une même puissance est doublé, de sorte que la consommation d'énergie demandée par le pompage augmente elle aussi en conséquence. Cependant, il faut tout d'abord augmenter le diamètre de la conduite d'un facteur d'environ 1.3, ce qui augmente les coûts d'investissement. Conséquence: les rejets de chaleur du réseau augmentent également, entraînant une hausse des coûts de production de chaleur.

Dans un souci de rentabilité des réseaux, ces conditions-cadres nécessitent par ailleurs que l'écart de température requis (donc la température d'amenée) suive l'augmentation de la longueur du réseau. La hausse des températures d'amenée entraîne toutefois une hausse des rejets de chaleur.

Les **conditions limites de la source de chaleur** influent sur la température d'amenée:

- température d'amenée indiquée par la température des rejets de chaleur disponibles;
- température d'amenée limitée à une certaine pression de vapeur dans le cas d'une extraction de vapeur industrielle. Une température d'extraction élevée ne peut être garantie que si la production d'énergie est réduite;
- extraction de chaleur à la source ne laissant pas le choix du niveau de température (p. ex. géothermie, pompe à chaleur, centrale thermique).

Le choix de la **température d'amenée** a un impact technique sur le choix de la pression nominale, sur le dimensionnement des sections de la conduite, sur le débit ainsi que sur les rejets de chaleur. Une température d'amenée élevée peut permettre de n'exiger qu'une pression nominale plus faible, ou des sections de conduite plus petites et un débit réduit. En même temps, les rejets de chaleur augmentent, en fonction du type de générateur de chaleur, de même que la consommation d'énergie de ce dernier. On le constate principalement en cas de couplage chaleur-force et de pompe à chaleur. C'est pour cette raison qu'une optimisation économique de la température d'amenée et de la section de conduite prend toute son importance.

3.1.2 Température de retour

Les températures de retour résultent des conditions limites, telles que l'âge et l'état du bâtiment à chauffer, le mode de préparation d'eau chaude et le type de raccordement hydraulique côté consommateurs de chaleur. D'autre part, certaines exigences en matière de température de retour sont imposées par la source de chaleur. Dans certains cas, l'exploitation de la chaleur nécessite des températures de retour basses. C'est le cas par exemple des installations à condensation des gaz de combustion.

Le Tableau 3.2 permet de connaître quelles valeurs réelles et quelles valeurs cibles s'appliquent aux températures de retour.

Les températures de retour maximum doivent être définies par le contrat de fourniture de chaleur ou par les prescriptions techniques de raccordement (cf. chapitre 5.3). Il est d'ailleurs recommandé de distinguer exigences de températures de retour pour le chauffage des locaux et exigences de températures de retour pour la production de l'eau chaude sanitaire.

Proposer un prix de l'énergie en fonction de la température de retour pourrait permettre d'assurer des températures de retour les plus basses possible. Pour les nouveaux réseaux de chauffage à distance comme pour ceux qui existent déjà, la température de retour (ou l'écart de température) nécessite d'être évaluée. Cette évaluation permet d'identifier rapidement le potentiel

d'optimisation et les dysfonctionnements des stations de transfert. Une méthode simple est détaillée au chapitre 10: l'enregistrement de la consommation supplémentaire.

Tableau 3.2 Valeurs indicatives et valeurs réelles de températures de retour.

Réseau de chaleur à distance		Température de retour
UIOM > 10 MW	Valeur réelle	55-65°C
Chauffage au bois à condensation	Valeur réelle	> 45°C
	Valeur cible	≤ 45°C
Quartier de nouvelles constructions	Valeur réelle	> 38°C
	Valeur cible	≤ 35°C

3.2 Mode opératoire du réseau

L'adaptation et l'évolution de la température d'amenée doivent être consignées dans les prescriptions de raccordement techniques (TAV) de chaque fournisseur d'énergie. Trois modes opératoires se rencontrent principalement concernant l'évolution de la température d'amenée du réseau (Fig. 3.1).

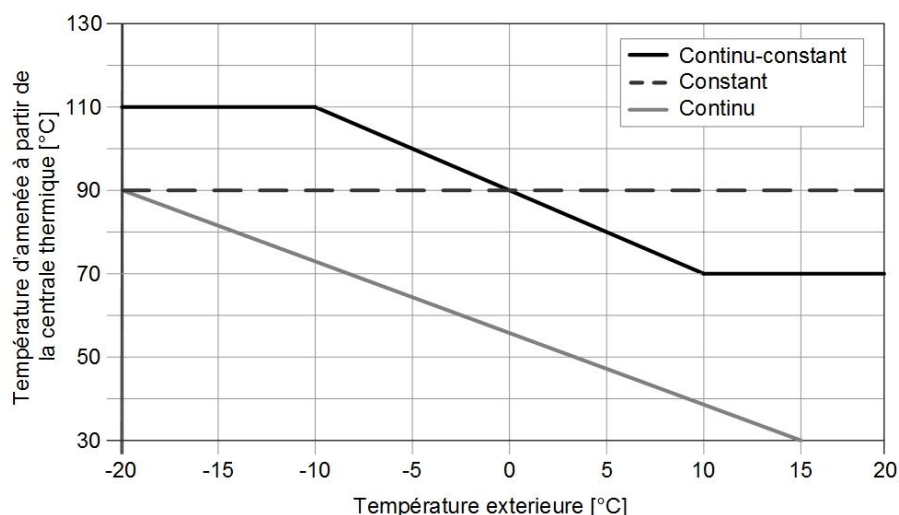


Fig. 3.1 Température d'amenée à partir de la centrale thermique en fonction de la température extérieure pour les trois modes opératoires de réseaux de chauffage à distance (continu-constant, constant, continu).

3.2.1 Fonctionnement continu

La température d'amenée du réseau est réglée en fonction de la température extérieure. En cas de baisse de la température extérieure, la température d'amenée du réseau est augmentée de manière continue jusqu'à sa valeur maximale. En cas de hausse de la température extérieure, la température d'amenée du réseau est abaissée de manière continue, jusqu'à ce que la limite de chauffage soit atteinte et que l'approvisionnement en chaleur soit ajusté. Le fonctionnement continu ne convient qu'à l'alimentation du chauffage des locaux. Il n'est pas adapté pour les consommateurs indépendants des intempéries comme la chaleur industrielle et l'eau chaude.

3.2.2 Fonctionnement continu-constant

La température d'amenée du réseau est réglée sur les valeurs limites déterminées en fonction des conditions météorologiques. En cas de baisse de la température extérieure, la température d'amenée du réseau est augmentée de manière continue jusqu'à la valeur maximale. En cas de hausse de la température extérieure, elle est abaissée de manière continue jusqu'à la valeur minimale. Cette valeur minimale est déterminée par la température d'amenée du réseau minimale à fournir (p. ex. chauffage de l'eau chaude). Le fonctionnement continu-constant, qui est le plus courant, permet d'alimenter simultanément le chauffage des locaux, l'eau

chaude et la chaleur industrielle. Un fonctionnement indépendant du fournisseur d'énergie est possible concernant la température d'amenée et le temps de chauffe, en régulant la température d'amenée du circuit secondaire nécessaire au consommateur dans la sous-station.

La température extérieure actuelle mesurée n'est que rarement utilisée comme variable de référence pour la température d'amenée du réseau. Selon la taille du réseau, il peut s'avérer opportun de prendre comme base la température extérieure moyenne sur une longue période, en prenant en compte les prévisions des températures extérieures le cas échéant.

3.2.3 Fonctionnement constant

La température d'amenée du réseau reste constante indépendamment de la température extérieure. En principe tous les consommateurs de chaleur courants peuvent être raccordés si la température d'amenée constante proposée est suffisante pour l'usage prévu. Une régulation de la température d'amenée doit être prévue dans la sous-station, conformément aux exigences de chaque consommateur de chaleur. Le fonctionnement constant permet de proposer la puissance thermique à fournir, même en cas de températures extérieures élevées, fondamental notamment pour la chaleur industrielle et le chauffage de l'eau chaude. Ce fonctionnement entraîne néanmoins d'importantes pertes de distribution de chaleur durant la mi-saison et la période estivale.

3.3 Pompes

Les pompes de circulation alimentées par un moteur électrique servent à la circulation d'eau dans les réseaux de chauffage à distance. Soit elles fonctionnent à vitesse constante, conformément aux prescriptions actuelles, soit elles sont réglables en continu. La Fig. 3.2 offre un aperçu typologique des conceptions et applications des différents types de pompes en fonction de la hauteur de refoulement et du débit volumique. En plus de la distinction entre forme axiale et forme radiale, on différencie également les pompes à moteur ventilé et à rotor noyé.

3.3.1 Conceptions

Les **pompes à moteur ventilé** sont utilisées pour des réseaux de chauffage à distance de grande taille. Elles sont raccordées à l'arbre et l'accouplement à l'aide d'un moteur standard. Les conceptions y sont différenciées: *pompe sur socle* (moteur et pompe montés sur un socle) et *pompe en ligne* (moteur monté sur une pompe installée en ligne). Le Tableau 3.3 montre les hauteurs de refoulement et débits volumiques typiques pour les différents types de pompes, ainsi que les valeurs s'appliquant à chaque pompe. Qu'il s'agisse d'un montage en série ou en parallèle, des valeurs supérieures peuvent être atteintes, comme le souligne la Fig. 3.2. On utilise dans la technique du bâtiment ainsi que dans de petits réseaux de chauffage à distance des **pompes à rotor noyé**, dans lesquelles la pompe installée en ligne forme une unité avec le moteur dit à gaine. Le liquide nécessaire lubrifie le roulement et refroidit en même temps le moteur.

Tableau 3.3 Hauteurs de refoulement et débits volumiques typiques pour les différents types de pompes.

Type de pompe	Hauteur de refoulement m	Débit volumique m ³ /h
Moteur ventilé		
Pompe sur socle	> 200	> 1000
Pompe en ligne	> 80	> 600
Rotor noyé		
	< 19	> 76

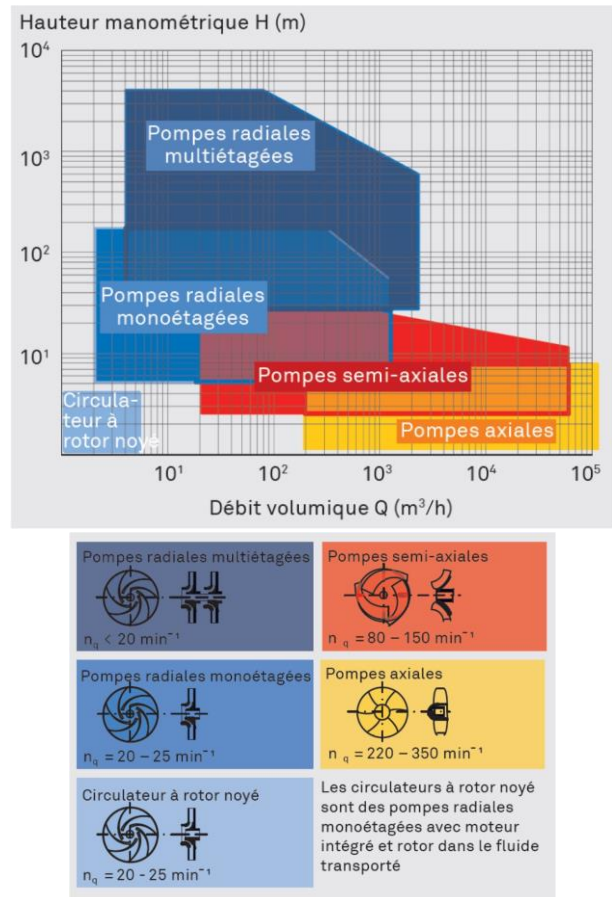


Fig. 3.2 Aperçu typologique des pompes en fonction de la hauteur de refoulement et du débit volumique. La vitesse de rotation n_q caractérise la forme de la pompe [74].

3.3.2 Efficacité énergétique

Le règlement européen (CE) 640/2009 s'applique aux moteurs électriques intégrés aux **pompes à moteur ventilé** [73]. De nouvelles classes de rendement [113] ont d'ailleurs été définies, dans lesquelles on a remplacé l'ancienne meilleure catégorie EFF1 par les classes de rendement IE2 et IE3 en trois étapes conformément au Tableau 3.4. L'adaptation des classes de rendement s'effectue en trois étapes:

Etape 1 À compter du 16 juin 2011, tous les nouveaux moteurs électriques vendus doivent respecter les exigences de la classe IE2, à l'exception de quelques conceptions et applications. Les moteurs de pompes de la classe de rendement EFF2 ne doivent plus être mis sur le marché à compter de cette date.

Etape 2 À compter du 1er janvier 2015, la classe de rendement encore plus stricte IE3 s'applique dans un premier temps aux moteurs d'une puissance nominale comprise entre 7,5 kW et 375 kW. Autrement ces moteurs doivent satisfaire aux exigences IE2 et être équipés d'un variateur de fréquence.

Etape 3 À compter du 1er janvier 2017, les exigences de l'étape 2 s'appliquent également pour les moteurs à partir de 0,75 kW.

Tableau 3.4 Classes de rendement énergétique pour les pompes à moteur ventilé.

Date limite	Moteurs électriques 0,75 kW à < 7,5 kW	Moteurs électriques 7,5 kW à 375 kW
1er juin 2011	IE2 ou supérieur	IE2 ou supérieur
1er janvier 2015	IE2 ou supérieur	IE4 IE3 ou IE2 avec variateur de fréquence
1er janvier 2017	IE4 IE3 ou IE2 avec variateur de fréquence	IE4 IE3 ou IE2 avec variateur de fréquence

Les **pompes à rotor noyé**, qui possèdent une consommation d'énergie très importante, étaient jusqu'à présent utilisées presque exclusivement sans réglementation. L'indice d'efficacité énergétique (IEE) constitue la base de l'utilisation des pompes à rotor noyé conformément à une méthode de calculs définie dans le règlement (CE) 641/2009 [72], qui se fonde sur une comparaison de la puissance absorbée au sein d'un profil de charge avec une pompe de référence. La mise en place d'une nouvelle directive est prévue en trois étapes conformément au Tableau 3.5. Les pompes de circulation à eau potable en sont exclues.

Tableau 3.5 Valeurs limites IEE pour les pompes à rotor noyé

Date limite	Pompes externes pour chauffage et refroidissement	Pompes intégrées aux produits	Utilisation de pompes intégrées
1er janvier 2013	0,27	aucune exigence	aucune exigence
1er août 2015	0,23	0,23	aucune exigence
1er janvier 2020	0,23	0,23	0,23

* valable pour les pompes commercialisées avant le 1er août 2015

3.3.3 Régulation de pompe

On fait la différence entre les pompes de circulation non régulées et régulées. Les pompes non régulées présentent certes un rendement plus élevé que les pompes régulées à un point de fonctionnement en charge partielle, mais elles ne sont appropriées que si la variation du débit est inférieure à un facteur de 2, comme dans le cas de pompes de circulation de chauffage affichant des puissances de 400 W max [69].

Cependant, on utilise quasiment que des pompes avec **variateur de fréquence** dans les réseaux de chauffage à distance. Lors de la conception il faut veiller à ce que les pompes présentent un rendement élevé en pratique. Concernant des pompes de circulation régulées, le point de fonctionnement de la conception doit se situer dans le dernier tiers de la courbe caractéristique des pompes, afin de permettre une importante plage de réglage et d'assurer simultanément un rendement élevé en cas de charge partielle essentielle à l'exploitation, comme dans la Fig. 3.3. Il faut par ailleurs privilégier la classe énergétique la plus efficace.

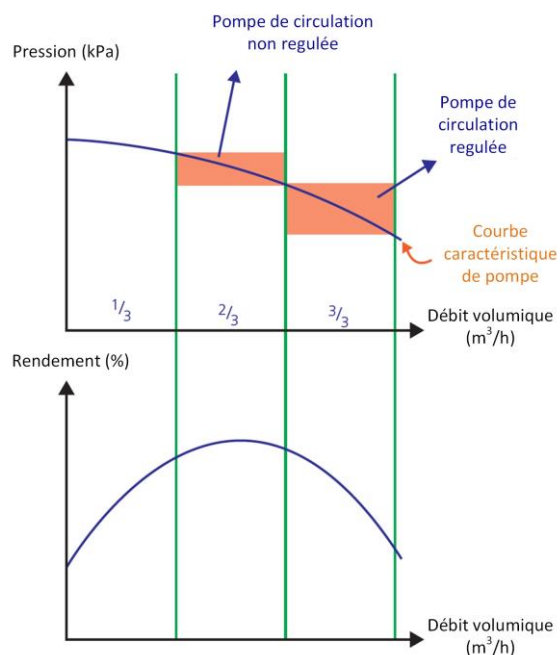


Fig. 3.3 Plages de réglage recommandées pour la conception de pompes de circulation non régulées et régulées [69]. La distribution secondaire s'effectue dans une zone antérieure, moyenne et postérieure (lignes vertes).

Pompes de circulation non régulées (Fig. 3.4 en haut): Dans le cas de pompes de circulation non régulées, le point de fonctionnement se situe toujours sur la courbe caractéristique des pompes. Par conséquent, le débit et la hauteur de refoulement ne changent pas. Les pompes de circulation non régulées sont utilisées si les paramètres hydrauliques restent constants durant un processus de charge, par exemple en cas de charge d'eau

chaude ou en cas de distribution sans pression différentielle du réseau pour une pompe principale.

Pompes de circulation régulées (Fig. 3.4 au milieu et en bas): Les pompes de circulation régulées s'adaptent en permanence à la hauteur de refoulement en cas de variation des conditions de charge dans le circuit hydraulique. La vitesse de rotation de la pompe est régulée en continu au moyen d'un convertisseur de fréquence. La vitesse de rotation de la pompe s'adapte aux conditions nécessaires à l'installation et se règle à nouveau pour chaque point de fonctionnement en charge partielle. La puissance électrique absorbée s'adapte en conséquence, augmentant nettement l'efficacité de la pompe de circulation. Pour ce faire, une régulation de la pression différentielle du réseau en fonction du débit est nécessaire, permettant de couvrir d'autant plus efficacement le besoin, que la mesure de pression différentielle du réseau est proche des consommateurs déterminants et donc souvent chez le consommateur de chaleur le plus éloigné.

En cas de régulation de la pression différentielle du réseau sur la pompe, on distingue les différents modes de fonctionnement suivants:

- Régulation avec **pression de service constante** ou également **régulation de la pression constante** (Fig. 3.4 au milieu): La pression différentielle du réseau sur la pompe est maintenue en cas de débit volumique variable. Dans la plage de charge partielle, le point de fonctionnement suit la courbe caractéristique de régulation de la pompe maintenue constante de l'horizontale vers la gauche. Ce mode de fonctionnement est utilisé en général pour les installations de chauffage les plus petites.
- Régulation avec **pression de service proportionnelle** ou également **régulation de la pression proportionnelle** (Fig. 3.4 en bas): Dans ce type de régulation, la pression différentielle du réseau sur la pompe baisse avec un débit volumique décroissant et augmente avec un débit croissant. Dans la plage de charge partielle, le point de fonctionnement suit la courbe caractéristique de régulation de la pompe proportionnelle en pente vers la gauche. En général les pompes avec régulation de la pression proportionnelle sont plus efficaces que les pompes avec régulation de la pression constante.

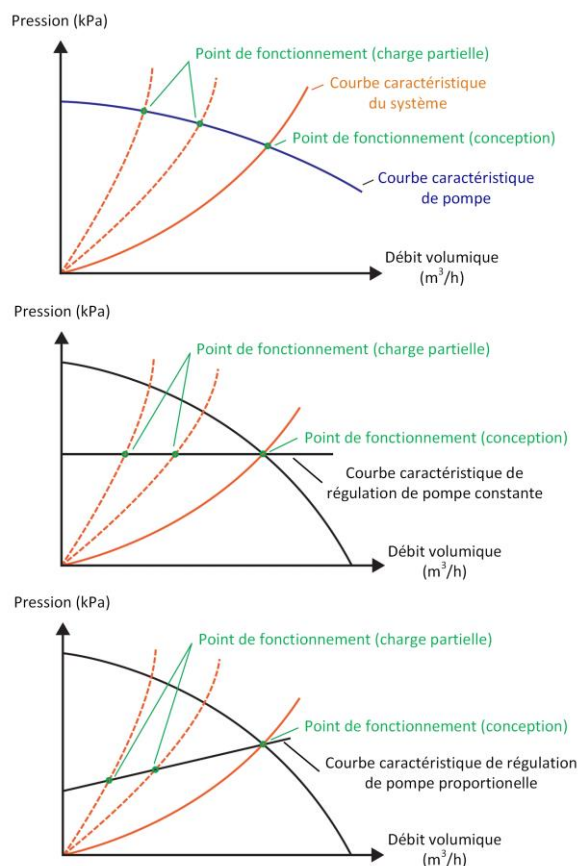


Fig. 3.4 Diagramme des pompes avec représentation de l'exploitation avec différentes régulations [69].

En haut: Pompe non régulée

Au milieu: Régulation pression constante

En bas: Régulation pression proportionnelle.

3.4 Montage des pompes

Dans les réseaux de chauffage à distance plusieurs pompes sont en principe utilisées dans une unité de pompage, sous réserve que les conditions suivantes soient respectées:

- Montage en parallèle de deux pompes, à chaque fois qu'une seule pompe fonctionne. La deuxième pompe est utilisée comme pompe de réserve (redondance).
- Montage en parallèle de plusieurs pompes, lorsque plusieurs pompes sont plus avantageuses pour atteindre le débit volumique exigé (rendement, coûts).
- Montage en série de plusieurs pompes, lorsque plusieurs pompes sont plus avantageuses pour atteindre la hauteur de refoulement exigée (rendement, coûts).

On peut garantir la sécurité de fonctionnement (redondance) avec une ou plusieurs pompes de réserve disposées parallèlement (voir chapitre 3.4.3).

3.4.1 Montage en parallèle

Le montage en parallèle des pompes de circuit de chauffage à distance est bénéfique dans le cadre de réseaux de chauffage à débit volumique élevé et hauteur de refoulement proportionnellement réduite (courbe de réseau plate). Le type de pompe doit être identique pour les pompes disposées en parallèle (incluant une pompe de réserve). Elles peuvent fonctionner avec une régulation de la pression différentielle du réseau en fonction de la charge en mesurant la pression différentielle dans le réseau, comme suit:

- Faible charge: Exploitation commandée par la vitesse de rotation d'une pompe individuelle (plage de réglage A dans la Fig. 3.5)
- Charge supérieure: Commande des deux pompes en service avec vitesse de rotation synchrone (plage de réglage B dans la Fig. 3.5).

Une exploitation mixte (une pompe actionnée par la vitesse de rotation, la deuxième pompe sur la vitesse maximum) n'est pas autorisée pour un montage en parallèle.

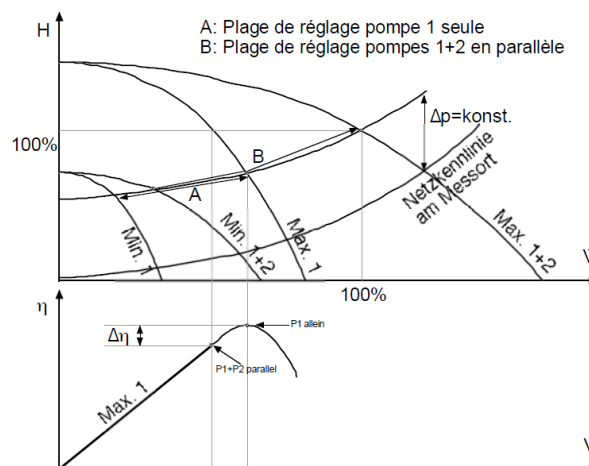
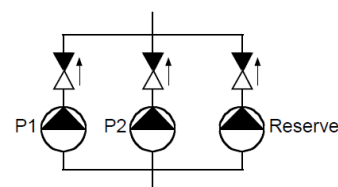


Fig. 3.5 Montage en parallèle de deux pompes et d'une pompe de réserve [21]. $\Delta p = \text{constant}$ correspond à la perte de pression au niveau de la station de transfert pour le consommateur de chaleur déterminant (en règle générale le consommateur de chaleur le plus éloigné).

3.4.2 Montage en série

Le montage en série des pompes de circuit de chauffage à distance est avantageux dans des réseaux de chauffage avec hauteur de refoulement élevée et débit proportionnellement réduits (courbe de réseau pentue).

Par exemple, une pompe à augmentation de pression est aussi montée en série dans le réseau avec la pompe principale.

En cas de montage en série des pompes comme unité selon la Fig. 3.6, un bypass à robinet à papillon d'arrêt automatique est installé parallèlement à chaque pompe. Une pompe de réserve est disposée de sorte à pouvoir assurer le fonctionnement de chaque pompe et à ce que les pompes montées en série soient réciproquement commutables. Toutes les pompes doivent être du même type.

La régulation de la pression différentielle du réseau avec mesure de la pression différentielle du réseau peut s'effectuer en fonction de la charge comme suit:

- Faible charge: Une seule pompe actionnée par la vitesse (plage de réglage A dans la Fig. 3.6)
- Charge supérieure: Commande commune des deux pompes en service avec vitesse synchrone (plage de réglage B dans la Fig. 3.6)
- Charge supérieure (alternative): Régulation de vitesse d'une pompe, la deuxième pompe est actionnée à une vitesse maximum.

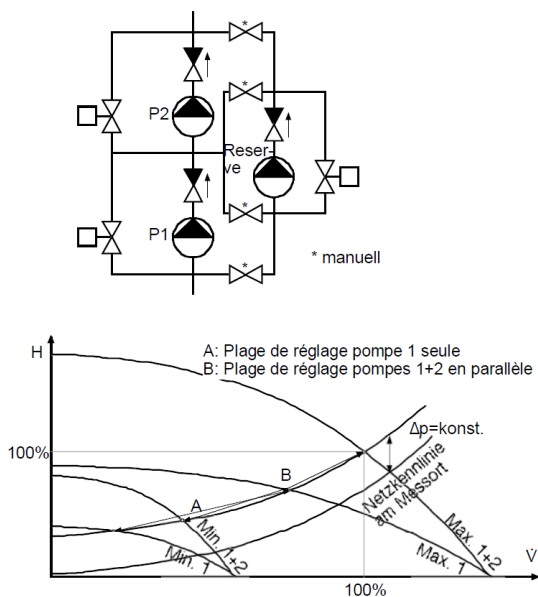


Fig. 3.6 Montage en série de deux pompes et d'une pompe de réserve [21]. $\Delta p = \text{constant}$ correspond à la perte de pression au niveau de la station de transfert pour le consommateur de chaleur déterminant (en règle générale le consommateur de chaleur le plus éloigné).

3.4.3 Redondance

Les pompes sont essentielles à l'exploitation d'une installation de chauffage à distance. C'est pourquoi une redondance des pompes de réseau est recommandée, car en cas de défaillance d'une pompe, le réseau peut continuer à être pleinement exploité. Les positions de redondance habituelles sont:

- 2 x 100% de la puissance nominale
- 3 x 50 % de la puissance nominale
- 4 x 33% de la puissance nominale

La disposition 3 x 50% ou 2 x 100% etc. est soumise à une étude de rentabilité. Pour les réseaux de grande taille il s'agit surtout de 3 x 50% ou 4 x 33%, car les coûts d'investissement des grosses pompes augmentent de façon disproportionnée. De plus, le fonctionnement et la maintenance sont plus simples pour des unités de pompage plus petites. Par ailleurs, durant les premières années d'exploitation des réseaux en cours de développement, souvent seule une fraction de la puissance de pompage de l'aménagement complet s'avère nécessaire. Un groupe de pompes d'une puissance de 2 x 33% suffit pendant cette période. Les investissements de départ peuvent donc être réduits et les pompes exploitées plus efficacement. Il est possible d'installer d'autres pompes ultérieurement.

Pour des réseaux de petite taille, une position de redondance de 2 x 80% peut être utilisée pour des raisons de coût. Ainsi, en cas de défaillance d'une pompe, seulement 80% de la puissance de pompage est disponible.

3.5 Régulation du réseau

Dans un réseau de chauffage à distance, les consommateurs de chaleur raccordés indirectement ont besoin d'une pression différentielle du réseau au niveau de la station de transfert de chaleur. Cette **pression différentielle du réseau minimale** s'élève en général entre 0,4 et 1 bar. Le réseau est régulé afin que la pression différentielle du réseau minimale requise soit disponible à chaque station de transfert de chaleur entre l'amenée et le retour.

La pression différentielle du réseau la plus faible se situe à un point du réseau entre l'amenée et le retour. Ce point est appelé le **point le plus défavorisé du réseau** ou **point le plus défavorisé**. Il peut changer en fonction de la demande en chaleur momentanée. Les difficultés d'approvisionnement sont le plus susceptibles de survenir dans la zone du point le plus défavorisé du réseau.

La pression différentielle du réseau est compensée par les pompes de réseau. Différents concepts sont proposés pour la régulation des pompes de réseau:

- Variateur de fréquence des pompes de chauffage à distance en mesurant la pression différentielle du réseau au niveau des pompes et régulation au moyen d'une courbe caractéristique de régulation de la pompe constante ou proportionnelle.
- Une mesure de pression différentielle du réseau peut être mise en place dans le réseau sur un ou plusieurs points de mesure de référence, influençant le variateur de fréquence des pompes de chauffage à distance dans la centrale. Les points de mesure de référence sont des points du réseau éloignés de la centrale (points les plus défavorisés du réseau ou points les plus défavorisés).
- La position de la vanne primaire (p. ex. vanne combi) peut aussi être saisie comme alternative ou comme variable de référence pour un régulateur maître concernant les stations de transfert sélectionnées (les positions de toutes les vannes primaires p. ex. peuvent être saisies et évaluées avec un système de contrôle). La régulation des pompes de réseau s'effectue alors en évaluant la position des vannes au niveau de la pression différentielle du réseau requise. Il est important de garantir la pression différentielle minimale requise (vanne) dans chaque état de service.

Des **réseaux de transport de distribution ramifiés** proposent une régulation de la pression séparée par branche de réseau. Une régulation de la pression individuelle est réalisée pour chaque branche de réseau. Ainsi on évite une exploitation des branches du réseau individuelles avec des pressions différentielles trop élevées et une augmentation du besoin en électricité à l'égard des pompes. Un groupe de pompes propre doit néanmoins être installé pour chaque branche.

Un point d'injection doit être déclaré comme maître pour la régulation de pression du point de vue technique de régulation en cas de dispositions de réseau avec **plusieurs points d'injection**. Le deuxième point d'injection ainsi que tous les points ultérieurs favorisent une puissance thermique déterminée dans le réseau selon un champ de caractéristiques ou selon les exigences.

L'algorithme de l'injection de plusieurs points dans le réseau doit en plus prendre en considération le fait qu'aucune pénurie ne doit survenir entre les points d'injection à cause de l'arrêt du flux.

3.5.1 Concept de régulation

L'exploitation du réseau s'effectue, comme indiqué dans le chapitre 3.2, en général en fonction des conditions climatiques et d'un programme horaire. La réalisation de la pré-régulation peut s'effectuer de la manière suivante:

- système MCR maître,
- automate programmable (API) de la chaudière,
- régulateur individuel.

Si plusieurs pompes sont utilisées, en cas d'activation et de désactivation exigeantes du point de vue technique de régulation des pompes individuelles, il convient de considérer ce qui suit:

- réduction des variations de pression dans le réseau au point de commutation en adaptant la vitesse de rotation requise, si possible immédiatement. Les points suivants entrent en partie en contradiction avec cette exigence.
- Il faut éviter des surcharges au niveau des pompes au point de commutation: Lorsque la pompe 1 fonctionne un certain temps à vitesse maximum, elle descend d'abord à la vitesse de rotation nécessaire à l'utilisation avec la pompe 2 et seulement ensuite la pompe 2 démarre à la vitesse requise.
- Il faut empêcher dans tous les cas un fonctionnement dans le dernier tiers de la courbe caractéristique des pompes, car cela peut entraîner une surcharge électrique risquant d'endommager la pompe.
- Il faut éviter des activations et désactivations trop fréquentes des pompes en choisissant des critères de commutation appropriés et des retards correspondants.

Suite à ces activations et désactivations, les points de fonctionnement de chaque pompe varient, ainsi que leur rendement. La question suivante se pose alors: comment les pompes peuvent-elles être exploitées le plus efficacement possible? Il n'y a pas de réponse claire, pourtant on constate que:

- Le rendement optimal se trouve en général dans le tiers médian de la courbe pour la vitesse la plus élevée. Si le point de fonctionnement est fixé dans cette zone, cela implique pour les pompes à vitesse variable:
 - Tant que les plages de réglage A «pompe 1 seule» et B «pompe 1 + 2» se chevauchent, «pompe 1 seule» est meilleure (Fig. 3.5 et Fig. 3.6).
 - En cas de montage en série, il convient de savoir au cas par cas si cela vaut la peine de dimensionner la régulation de la pression différentielle du réseau pour une pompe seule et d'exploiter la deuxième pompe à vitesse maximum.
- Il convient de choisir le rendement optimal pour le cas d'utilisation comptant le nombre d'heures de marche le plus élevé. Lorsque dans le cas de montage en parallèle «pompe P1 seule» est définie sur le

rendement optimal à vitesse maximale, l'exploitation totale «P1 + P2 parallèle» engendre une perte de rendement à vitesse maximale.

- Afin de répartir de manière équilibrée l'usure des pompes de construction identique, les durées d'exploitation doivent être partagées équitablement en changeant les priorités.

3.5.2 Site de mesure de la régulation de pression différentielle du réseau

Le site ou les sites de mesures de la régulation de pression différentielle du réseau doivent être choisis afin que la variation de pression différentielle du réseau puisse garantir un fonctionnement irréprochable sans pénurie ni surproduction dans chaque point de fonctionnement. Selon le site de mesure choisi, les défaillances peuvent être compensées différemment:

- En cas de **mesure de la pression différentielle dans le réseau de chauffage à distance**, la pression différentielle est maintenue constante parallèlement à la courbe de réseau sur le site de mesure (Fig. 3.7). La pompe de circuit de chauffage à distance présentera alors une courbe caractéristique de régulation de la pompe inclinée vers l'arrière. Dès que le débit chute dans le réseau, la hauteur de refoulement de la pompe baisse proportionnellement. La chute de pression diminue alors dans le réseau et le point de fonctionnement de la pompe suit la courbe caractéristique des installations. Le rapport est comparable avec une courbe caractéristique de régulation de la pompe proportionnelle comme dans la Fig. 3.4 en bas.
- Dans le cas de la régulation de pression constante ou de pression proportionnelle, la **mesure de pression différentielle** se produit obligatoirement **sur la pompe**, engendrant une courbe caractéristique de régulation de la pompe horizontale ou descendant vers l'arrière. Seules des défaillances causées par la pente de la courbe caractéristique des pompes sont compensées.
- En cas de **mesure de pression différentielle dans l'amenée et le retour** concernant une pompe de circuit de chauffage à distance située dans la centrale thermique, des défaillances causées par le réseau hydraulique avant le site de mesure (chute de pression au niveau de la robinetterie, compteur d'énergie thermique, etc.) sont également compensées.

Conclusion:

Le variateur de fréquence des pompes à une pression différentielle constante dans le réseau de chauffage (point le plus défavorisé) constitue la solution la plus efficace, mais aussi la plus complexe par rapport à une régulation de pression constante ou de pression proportionnelle sur les pompes.

En cas de modification de la structure d'abonnés (renforcement ou arrêt) ou même en cas de charge partielle, le point le plus défavorisé du réseau ou le consommateur de chaleur déterminant peut «migrer». En cas de modification de la structure d'abonnés notamment, il faut vérifier si la courbe caractéristique de régulation de la pompe doit être adaptée à la nouvelle situation.

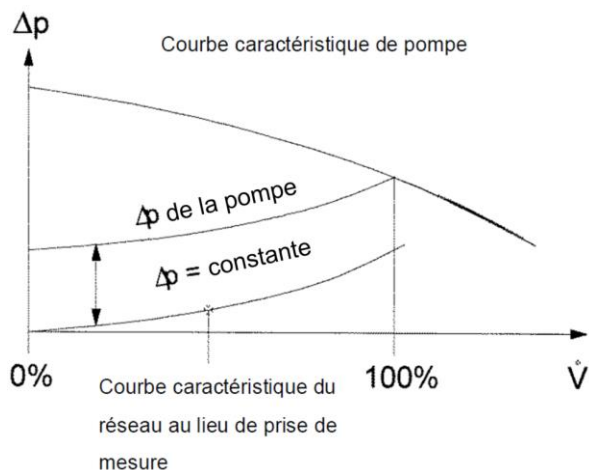


Fig. 3.7 Exemple de mesure de pression différentielle dans un réseau de chauffage [21].
 $\Delta p = \text{constant}$ correspond à la perte de pression au niveau de la station de transfert pour le consommateur de chaleur déterminant (en règle générale le consommateur de chaleur le plus éloigné).

3.5.3 Réseaux de chauffage avec débit fortement variable et température d'amenée plus élevée

Le débit s'avère souvent très variable dans des réseaux de chauffage à distance importants comptant plusieurs pompes de circuit de chauffage à distance. La température d'amenée quant à elle ne peut être modifiée qu'avec des variations relativement modestes en fonction de la température extérieure (voir Fig. 3.8). Dans ce cas il est avantageux de pouvoir activer et désactiver les deux vannes à trois voies. L'activation et la désactivation d'une vanne à trois voies fait bondir le débit, ce qui peut être désamorcé par une régulation séquentielle. Les deux vannes à trois voies montées en parallèle sont commandées par le régulateur séquentiel à deux sorties entre 0% et 100%. La séquence ainsi que l'activation et la désactivation des deux vannes à trois voies s'effectuent selon les points ci-dessous:

- Régulation de la vanne à trois voies plus petite sur la sortie de régulateur 1.
- Activation de la plus grande vanne à trois voies et désactivation de la plus petite vanne à trois voies, si débit circuit de chauffage à distance (signal mesure du débit compteur d'énergie thermique circuit de chauffage à distance) > Débit en cas de chute de pression maximale appliquée sur la plus petite vanne à trois voies.
- Régulation de la vanne à trois voies plus grande sur la sortie de régulateur 2.
- Activation de la plus petite vanne à trois voies, si débit circuit de chauffage à distance (signal mesure du débit compteur d'énergie thermique circuit de chauffage à distance) > Débit en cas de chute de pression

maximale appliquée sur la plus grande vanne à trois voies.

- Régulation conjointe des deux vannes à trois voies sur la sortie de régulateur 2.
- Désactivation de la plus petite vanne à trois voies, si débit circuit de chauffage à distance (signal mesure du débit compteur d'énergie thermique circuit de chauffage à distance) > Débit en cas de chute de pression minimale appliquée sur les deux vannes à trois voies.
- Régulation de la vanne à trois voies plus grande sur la sortie de régulateur 2.
- Désactivation de la plus grande vanne à trois voies et activation de la plus petite vanne à trois voies, si débit circuit de chauffage à distance (signal mesure du débit compteur d'énergie thermique circuit de chauffage à distance) > Débit en cas de chute de pression minimale appliquée sur la plus grande vanne à trois voies.
- Régulation de la vanne à trois voies plus petite à nouveau sur la sortie de régulateur 1.

L'activation et la désactivation des vannes à trois voies peuvent s'effectuer de manière alternative en saisissant la pression différentielle sur les vannes à trois voies, en appliquant la même logique que celle décrite.

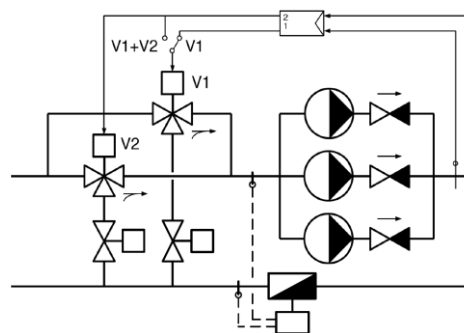


Fig. 3.8 Pompes de réseau montées en parallèle avec deux vannes de régulation pour améliorer la puissance thermique minimale réglable [21].

3.5.4 Groupes de circuit de chauffage à distance séparés pour exploitation hivernale et exploitation estivale

Pour une période estivale optimale du point de vue énergétique avec un débit nettement plus faible (inférieur à 20% du débit total), une exploitation séparée d'une pompe estivale à vitesse variable montée en parallèle s'avère avantageuse (voir Fig. 3.9):

- Les réglages techniques du point de vue régulation peuvent être facilement mis en place (aucune séquence, mais une commutation manuelle entre exploitation estivale et exploitation hivernale).
- La pompe de circuit de chauffage à distance pour l'exploitation hivernale doit pouvoir alimenter en chaleur le réseau de chaleur à distance à 100% au point d'application (aucun montage en parallèle des

deux pompes de circuit de chauffage à distance, installation de pompe de remplacement le cas échéant).

- La vanne à trois voies et la pompe de circuit de chauffage à distance pour l'exploitation estivale peuvent être dimensionnées en fonction de la demande en été.
- Concernant la pré-régulation d'un circuit de chauffage à distance avec exploitation estivale, deux vannes sont recommandées, si les appels de puissance thermique estivaux maximum $\leq 10\%$ des appels de puissance thermique hivernaux maximum.

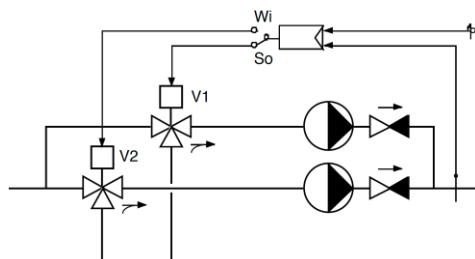


Fig. 3.9 Pompes estivale et hivernale montées en parallèle avec deux vannes de régulation pour améliorer la puissance thermique minimale réglable. [21].

3.6 Pression nominale

Les niveaux de pression nominale spécifiques des conduites et des composants comme les brides, vannes, robinets-vannes et autres robinets sont définis conformément à la norme SN EN 1333 [99] et sont désignés par PN pour «Pressure Nominal». Le niveau de pression nominale détermine l'épaisseur de paroi minimale et les dimensions des conduites, brides, robinets, etc.

La pression de service et la pression de test maximales admissibles doivent être prises en compte pour concevoir l'ensemble des conduites et composants sous pression. Elles sont désignées conformément à l'Ordonnance relative aux équipements sous pression [66] à l'aide de «PS» ou aussi «MOP» (Maximum Operating Pressure). La pression de service maximale admissible est déterminée par le fabricant du composant. Les circuits de chauffage à distance d'une conduite ou d'un système de conduite, ainsi que les derniers robinets dans la zone de l'installation, incluant tous les équipements auxiliaires, ne relèvent néanmoins pas de cette Ordonnance relative aux équipements sous pression. Inversement l'Ordonnance relative aux équipements sous pression s'applique pour les équipements sous pression standards tels que ceux pouvant se trouver dans les stations de régulation de pression et de compression.

L'Ordonnance relative aux équipements sous pression [66] correspond par analogie à la Directive européenne relative aux appareils sous pression 97/23/EC (DGRL), ayant servi de base pour l'élaboration des principes directeurs [68]. Concernant le terme d'équipements sous pression standard, pour ce qui est de l'art. 1, al. 3, let. b de l'Ordonnance relative aux équipements sous pression [66], le principe directeur 1/17 précise: Un équipement sous pression standard ne doit pas avoir été conçu et

construit spécifiquement pour l'acheminement de fluides dans un circuit de chauffage à distance, mais pour un éventail d'applications. Des exemples typiques d'équipements sous pression standards dans des circuits de chauffage à distance, de stations de régulation de pression et de compression sont:

- appareils de mesure,
- vannes,
- régulateurs de pression,
- soupapes de sécurité,
- filtres,
- échangeur de chaleur
- réservoirs.

À moins que d'autres exigences n'aient été imposées, les réseaux de chauffage à distance avec conduites de fluides en acier (tubes pré-isolés en métal et tubes médians en métal) sont fixés à PN 16, bien que les conduites soient utilisables jusqu'à PN 25. Les composants (robinets, vannes, etc.) jusqu'à DN 150 sont en version PN 16, qu'ils soient de structure identique ou sensiblement plus complexes ou plus coûteux que ceux de pression nominale plus faible. Le prix des composants augmente dans le cas de diamètres nominaux plus importants ou de niveaux de pression nominale plus élevés (p. ex. PN 25). Des installations domestiques et stations de transfert de chaleur avec des pressions nominales plus élevées que PN 16 sont par conséquent plus onéreuses et aussi plus complexes dans leur fonctionnement. Les conditions géodésiques, les pressions d'amenée maximales et la superposition de pression requise du réseau constituent des critères essentiels dans le choix de la pression nominale.

Des réseaux de chauffage à distance avec conduites de fluides en plastique (tubes médians en plastique) présentent une faible pression nominale de PN 6. Ils ne sont disponibles que dans des dimensions relativement petites (max. DN 150).

Il est possible de définir une pression supérieure à la pression nominale (PN) dans certains cas, si les conditions marginales extérieures sont connues et si des calculs détaillés montrent que les pressions maximales admissibles (PS) sont respectées. Sinon les données relatives à la pression nominale (PN) des conduites et robinets s'appliquent comme pression de service maximale admissible.

3.7 Répartition de pression dans le réseau de chauffage à distance

Le graphique de pression représente les rapports de pression au sein du réseau en fonction de la distance entre la centrale thermique (à partir de la pompe de réseau) et le point le plus défavorisé (consommateur le plus éloigné). Dans l'exemple de la Fig. 3.11, la pompe de circuit de chauffage à distance est mise en place dans l'amenée. Le maintien de la pression se trouve dans le retour et est garant d'une pression constante dans la centrale avant les pompes de chauffage à distance (pré-

maintien de la pression). Avec une puissance consommée variable, la pression moyenne dans le réseau fluctue et par conséquent la répartition de pression pour toutes les stations de transfert de chaleur. Le graphique de pression empilé se répartit en différentes zones:

- **Pression de test:** L'étanchéité de la pression est vérifiée dans l'ensemble du réseau de chauffage à distance ou sur chaque tronçon. La pression de test correspond en général à 1,3 fois la pression de service maximale admissible. Elle est libérée sur une durée de 24 heures.
- **Pression limite en cas d'incident (MIP):** Pression maximale limitée par des dispositifs de sécurité qui peut survenir dans un système à court terme (Maximum Incidental Pressure).
- **Pression de service maximale admissible (MOP):** A aucun point du réseau la pression ne doit dépasser la pression de service maximale admissible de la conduite et les pièces de l'installation en exploitation normale (Maximum Operating Pressure). La pression de service maximale admissible s'ajuste en fonction du niveau de pression nominale et dépend de la longueur du réseau, de la température d'exploitation et des rapports géodésiques au sein du réseau. Il faut la choisir la plus basse possible pour des raisons économiques. Les niveaux de pression nominale typiques des réseaux de chauffage à distance s'étalent de PN16 à PN25. Conduites et notamment composants d'installation à partir de PN25 augmentent considérablement le coût du réseau et ne doivent être utilisés que lorsque les conditions l'exigent (voir aussi le chapitre 3.6 Pression nominale). Des dysfonctionnements dans la régulation de pression du réseau peuvent entraîner des pressions excessives. Concernant les pompes qui risquent de dépasser la pression de service maximale admissible à hauteur de refoulement maximale et à pression statique, un pressostat de sécurité bloquant directement les pompe(s) de réseau est recommandé.
- **Répartition de pression Amenée:** Représente la répartition de pression de l'amenée, de la centrale thermique jusqu'au raccordement domestique, ayant été définie comme point le plus défavorisé (correspond à la chute de pression faisant suite à la perte de pression dans les conduites et les installations).
- **Pression différentielle du réseau Sous-station:** La différence de pression entre amenée et retour à la fin d'un raccordement domestique est définie par la pression différentielle du réseau minimale requise au-dessus de la sous-station. La pression différentielle du réseau minimale dans une sous-station peut s'élever de 0,7 à 1 bar.
- **Répartition de pression Retour:** Représente la répartition de pression du retour, du raccordement domestique jusqu'à la centrale thermique (correspond à la chute de pression suite à la perte de pression dans les conduites et les installations).
- **Chute de pression Réseau:** La pression dynamique se modifie en fonction de la charge et doit être fournie par la pompe de circuit de chauffage à distance. Elle se compose des pertes de puissance et de la pression différentielle du réseau minimale du consommateur de chaleur déterminant (en règle générale la sous-station la plus éloignée). La pression dynamique maximale est attendue au point d'application.
- **Pression statique:** La pression statique dérive de la différence entre le point le plus élevé et le point le plus bas (différence de hauteur) dans le réseau de chauffage à distance (pression de la colonne d'eau).
- **Pression de service minimale:** Se compose de la pression statique et d'une marge de sécurité évitant la création d'une dépression, une évaporation et une cavitation. Ceci signifie qu'au point le plus haut du réseau, la pression de l'eau du réseau de chauffage à distance doit être supérieure à la pression de vapeur d'au moins 0,5 bar en cas de température du réseau maximale (voir Fig. 11.1). Une sécurité supplémentaire d'environ 1 bar est recommandée en raison de certaines tolérances de régulation du maintien de la pression et pour des phénomènes transitoires et phénomènes transitoires non stationnaires concernant des événements imprévus. Le maintien de la pression peut correspondre à la pression d'équilibre selon la situation.
- **Pression totale Réseau:** La pression du réseau maximale (part statique et dynamique) est atteinte à une charge maximale au niveau du point d'application et à une température du réseau maximale. Dans ce cas la pression du réseau maximale ne doit pas dépasser la pression de service maximale.

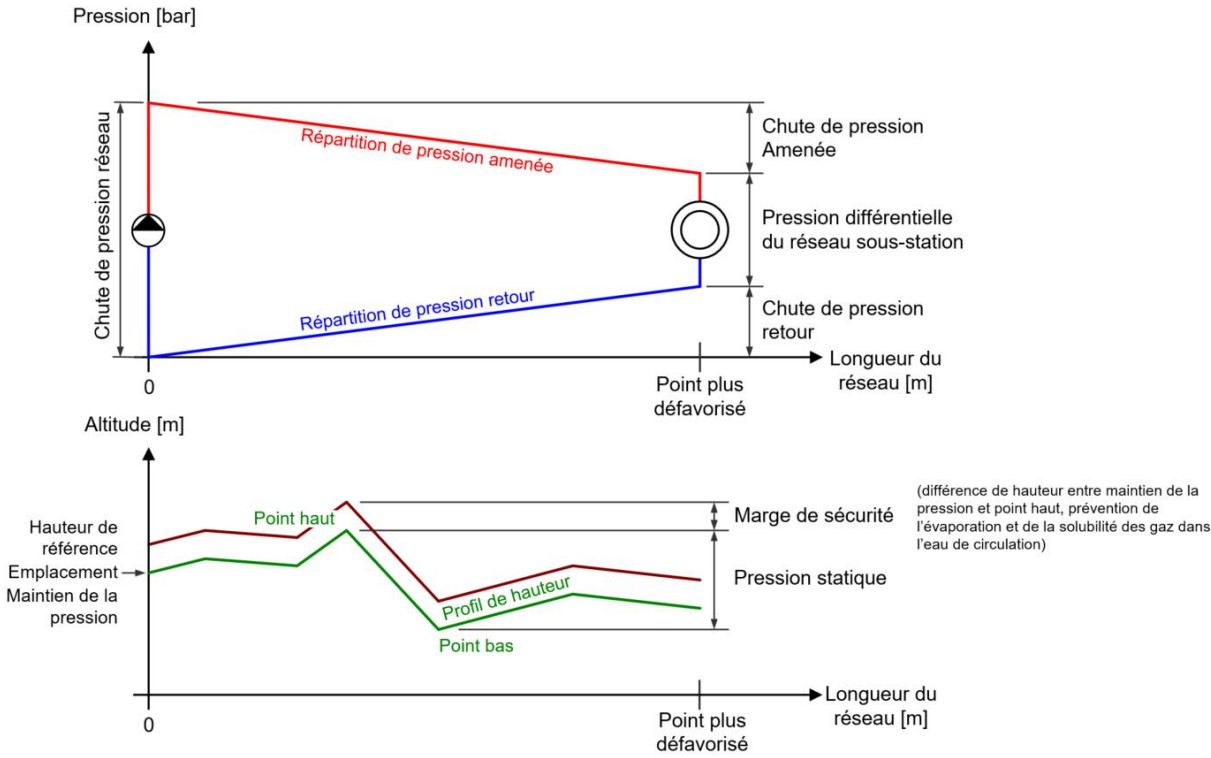


Fig. 3.10 Représentation qualitative de la courbe de réseau (en haut) comme pression en bar et de la pression statique (en bas) comme courbe d'altitude en mètres au-dessus du niveau de la mer, en fonction de la longueur du réseau jusqu'au point le plus défavorisé.

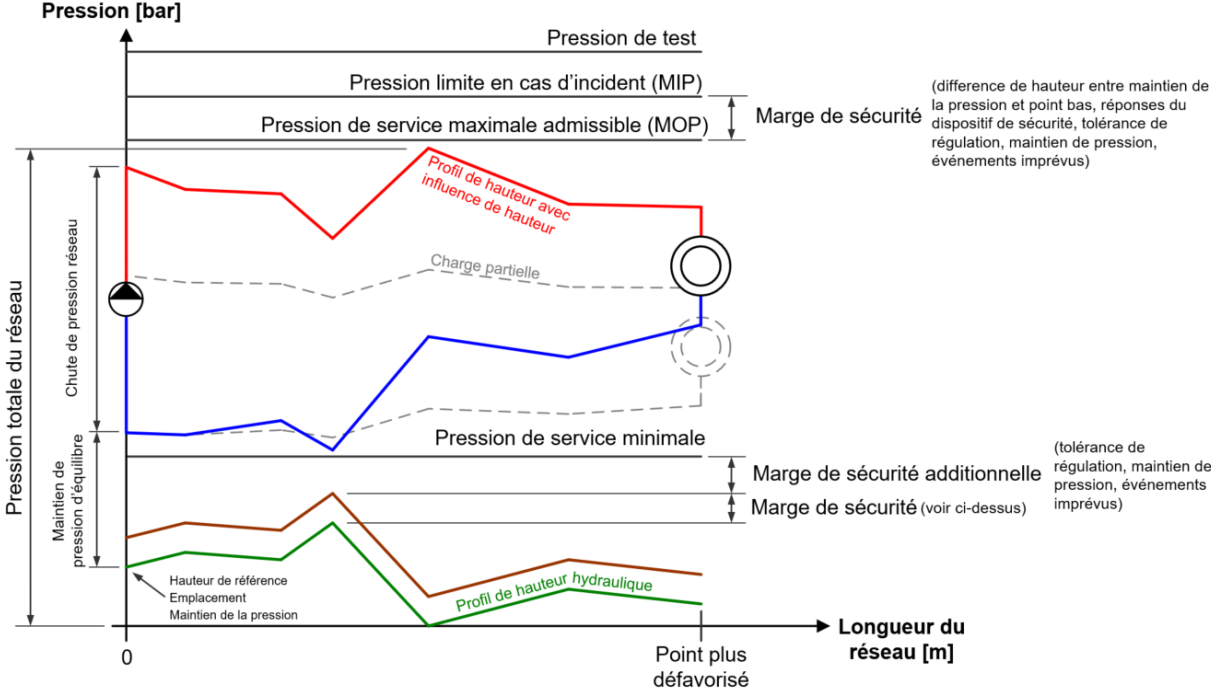


Fig. 3.11 Graphique de pression empilé pour un réseau de chauffage avec superposition de la courbe d'altitude et de la courbe de réseau en fonction de la longueur du réseau jusqu'au point le plus défavorisé.

3.8 Augmentation de pression et séparation du réseau

Pour des réseaux de plus grande taille et étendus (pressions nominales PN25 ou même PN40 au lieu de PN16), une étude de rentabilité est recommandée, pour savoir si la perte de pression dans le réseau doit être compensée par les pompes de circuit de chauffage à distance centrales, ou si les stations de surpression décentralisées ou les séparations de systèmes sont avantageuses. En utilisant des stations de surpression et des séparations de systèmes, il est possible de réaliser des économies au niveau des coûts d'exploitation et d'investissement selon la situation.

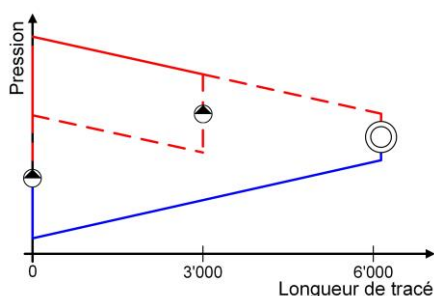


Fig. 3.12 Exemple de répartition de pression avec et sans pompe à augmentation de pression.

Comme dans l'exemple de la Fig. 3.12, après une longueur de tracé de 3000 m seule une part du débit volumique est privilégiée jusqu'au consommateur de chaleur le plus éloigné avec une pompe à augmentation de pression de plus faible puissance. Cet exemple montre qu'avec une pompe à augmentation de pression, la pression du réseau est plus faible que sans pompe à augmentation de pression.

Une séparation du réseau décrit une séparation hydraulique de deux systèmes normalement connectés dans le cas de la distribution du chauffage à distance. Les raisons éventuelles d'une séparation du réseau sont:

- protection contre les pressions trop élevées (raccordement domestique, différence de hauteur géodésique, longueur de conduite, etc.),
- séparation de différents fluides (p. ex.: vapeur-eau ou huile thermique-eau),
- paramètres réseau différents (pression et température),
- réseaux secondaires.

Les pertes énergétiques qui en découlent en cas de transfert de chaleur doivent être considérées comme préjudiciables. En cas d'interprétation, celles-ci doivent être maintenues au plus bas niveau possible, tout en veillant à une température différentielle minimum dans l'échangeur de chaleur.

3.9 Maintien de la pression

Avec la variation de température, les fluides caloporteurs connaissent une variation du volume en fonction du coefficient de dilatation volumique. Utilisée généralement comme fluide caloporteur, l'eau présente la densité la plus élevée à 4°C et donc le plus petit volume. Ainsi le volume augmente proportionnellement à la température. Cependant, entre 4°C et 30°C, ce phénomène est limité, mais se renforce à des températures plus élevées. Dans un système fermé, il faut par conséquent compenser la variation du volume pour conserver une pression constante. Les installations d'expansion et de pression utilisées sont donc cruciales dans les circuits de chauffage et de refroidissement. Elles remplissent trois missions fondamentales:

- maintien de la pression à chaque point du système d'installation dans les limites admissibles, c'est-à-dire aucun dépassement de la surpression de service maximale admissible, mais également une garantie de pression minimale pour éviter la cavitation (dépression, évaporation, solubilité du gaz),
- compensation des variations de volume du fluide caloporteur (eau) suite aux variations de température,
- fourniture de pertes en eau systémiques sous forme d'une réserve d'eau.

Un calcul, une mise en service et une maintenance minutieux constituent les conditions fondamentales d'un fonctionnement correct du maintien de la pression. D'autres indications et recommandations relatives à la mise en place se trouvent dans la fiche de travail FW 442 de l'AGFW Maintien de la pression dans des réseaux de chauffage à distance à eau de chauffage [104]. Les systèmes de maintien de la pression, l'intégration du maintien de la pression, ainsi que le volume nominal et le débit massique de réalimentation de l'installation d'expansion sont détaillés ci-après.

3.9.1 Systèmes de maintien de la pression

Il existe différents systèmes de maintien de la pression. Chacun d'eux nécessite un réservoir de compensation et un système d'entretien de la pression d'équilibre (p. ex. compresseur pour gaz ou pompe pour fluides). Un maintien de la pression avec un réservoir ouvert ou fermé est désigné comme un maintien de la pression statique. Un maintien de la pression avec pompe avec régulation de pression est nommé maintien de la pression dynamique.

Les systèmes de maintien de la pression doivent en général garantir la disponibilité des capacités de réserve correspondantes en cas de défaillance d'une unité.

Maintien de la pression avec réservoir ouvert

Lors du maintien de la pression avec un réservoir haut ouvert, un réservoir ouvert est placé à un endroit surélevé dans le réseau comme réservoir de compensation. Les propulseurs de maintien de la pression dans ce système sont :

- la pression atmosphérique exercée sur la surface de l'eau du réservoir ouvert,
- et le poids de l'eau dans le réservoir de compensation.

Ce principe présente l'avantage d'un mode de conception économique, car il n'a besoin quasiment d'aucun robinet, ni dispositif de régulation ni pompe. En revanche, la corrosion dans le réseau de chauffage à distance engendrée par l'entrée permanente d'oxygène dans la conduite de ventilation et le danger du refroidissement dû à l'air extérieur sont problématiques dans le cas d'un réservoir haut ouvert. Par ailleurs, il s'avère souvent difficile de trouver un site suffisamment élevé pour installer un réservoir haut afin d'assurer la pression correspondante. On évite de nos jours le maintien de la pression avec réservoir ouvert, qui généralement n'est plus utilisé.

Maintien de la pression avec réservoir fermé

Les gaz se compriment et s'utilisent comme propulseurs de maintien de la pression dans un réservoir fermé. Cette propriété est utilisée dans le maintien de la pression des réseaux de chauffage à distance. Si des pertes en eau

surviennent dans le réseau, le coussin de gaz comprimé dans le réservoir de compensation fait pression sur la surface de l'eau. En cas de déficit hydrique, la quantité d'eau nécessaire est donc réinjectée dans le réseau de chauffage à distance à partir du réservoir de compensation. En raison du risque de corrosion engendrée par l'air, un gaz inerte, par exemple l'azote, est en règle générale utilisé comme propulseur de maintien de la pression. Une autre mesure consiste à séparer deux fluides par une membrane (membrane du réservoir d'expansion, MAG).

Maintien de la pression avec pompe avec régulation de pression

La pompe avec régulation de pression est installée entre le réservoir et le réseau de chauffage à distance. En cas de déficit hydrique dans le réseau de chauffage à distance et donc de chute de pression associée, la pompe avec régulation de pression pompe la quantité d'eau manquante dans le réservoir du réseau. Un clapet anti-retour empêche l'eau du réseau de chauffage à distance de refouler. En cas d'augmentation de la pression dans le réseau de chauffage à distance, une soupape de décharge s'ouvre afin que l'eau du réseau de chauffage à distance puisse s'écouler hors du réseau dans le réservoir.

3.9.2 Intégration du maintien de la pression

L'intégration hydraulique du maintien de la pression dans le système d'installation influence radicalement l'évolution de la pression de service. La pression de service se compose du niveau de la pression d'équilibre et de la pression différentielle du réseau, qui est créée au niveau de la pompe de circulation en fonctionnement. On distingue trois sortes de maintien de la pression:

- pré-maintien de la pression,
- maintien de la pression,
- maintien de la pression moyenne.

Toutefois il est possible d'utiliser d'autres variantes en pratique.

Pré-maintien de la pression

Le maintien de la pression est raccordé avant la pompe de circulation, donc côté aspiration. C'est pour cette raison qu'on emploie également le terme de maintien de la pression d'aspiration. On a recours presque exclusivement à ce type de maintien, car il est le plus facile à maîtriser.

Avantages:

- niveau de pression d'équilibre bas,
- pression de service > pression d'équilibre, donc aucun risque de formation de dépression.

Inconvénient:

- en cas de pression de la pompe de circulation élevée (installations de grande taille) pression de service plus importante, attention à la charge du réseau p_{zul} .

Maintien de la pression,

Le maintien de la pression est raccordé après la pompe de circulation, donc côté refoulement. Lorsqu'on détermine la pression d'équilibre, il faut inclure une partie de la pression différentielle du réseau de la pompe de circulation spécifique à l'installation (50% à 100%). L'utilisation se limite à quelques applications comme par exemple les installations photovoltaïques.

Avantage:

- niveau de pression d'équilibre bas, lorsque ce n'est pas la pression globale de la pompe qui doit être chargée.

Inconvénient:

- niveau de pression d'équilibre élevé.
- Il faut être particulièrement vigilant à respecter les instructions du fabricant concernant le maintien de la pression d'aspiration nécessaire pour la pompe de circulation, sinon on court le risque de cavitation.

Maintien de la pression moyenne.

Le point de mesure pour le niveau de la pression d'équilibre est «transféré» par le biais d'une section de mesure par analogie dans l'installation. Les niveaux de pression d'équilibre et de pression de service peuvent par conséquent s'harmoniser de manière optimale et être variables (maintien de la pression moyenne symétrique, asymétrique). En raison de dépenses en équipement relativement importantes, son utilisation se limite aux installations avec des rapports de pression complexes, principalement dans le domaine du chauffage à distance.

Avantage:

- harmonisation optimale, variable de la pression de service et de la pression d'équilibre.

Inconvénient:

- dépenses en équipement élevées.

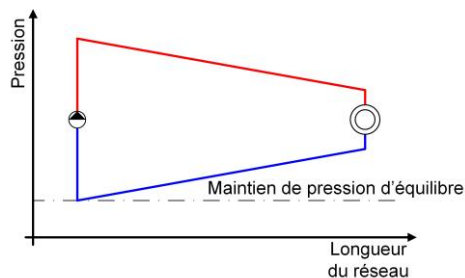


Fig. 3.13 Pré-maintien de la pression.

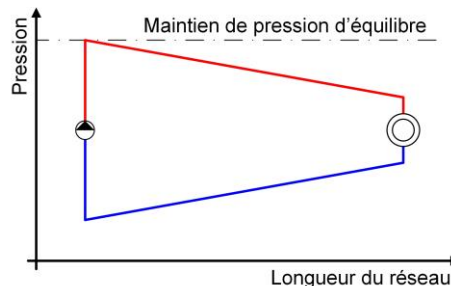


Fig. 3.14 Maintien de la pression.

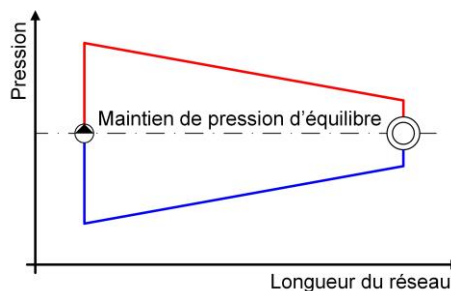


Fig. 3.15 Maintien de la pression moyenne.

3.9.3 Volumes d'expansion et quantité réalimentée

Le volume nominal et la capacité de réalimentation de l'installation d'expansion constituent les paramètres adaptés à l'installation d'expansion et au maintien de la pression d'une installation de chauffage à distance.

Le volume nominal de l'installation d'expansion ou du vase d'expansion se compose du volume d'expansion théorique et de la réserve d'eau supplémentaire visant à couvrir les fuites. Etant donné que la pression dans le réservoir d'expansion est en général créée par un coussin de gaz et que le niveau d'eau et la pression dans l'espace gazeux sont liés ($p \times V = \text{constant}$), il est impossible d'utiliser le volume global du réservoir d'expansion pour l'apport en eau. Le volume nominal est donc multiplié par un facteur.

$$V_N = (\Delta V + V_{wv}) \frac{p_e + 1}{p_e - p_0}$$

Le volume d'expansion théorique d'une installation de chauffage à distance est donc le volume réalimenté pour l'évacuation de l'énergie ou le volume de décharge pour l'approvisionnement en énergie multiplié par la variation de température du fluide caloporteur. Le volume réalimenté se calcule de la manière suivante:

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho(T_x)} - 1 \right)$$

La saisie correcte de l'eau contenue V_0 est importante, car elle est essentielle pour le calcul du volume réalimenté (voir exemple de calcul). Celui-ci comprend le volume d'eau global dans le système fermé auquel l'installation d'expansion est raccordée (échangeur de chaleur, accumulateurs d'énergie, chaudière, conduites, réservoir intermédiaire expansion, etc.).

La réserve d'eau compense d'éventuelles pertes en eau du système et doit s'élever à environ 0,5% de l'eau contenue V_0 .

$$V_{wv} = 0.005 V_0$$

Le débit massique de réalimentation de l'installation d'expansion dépend de la puissance thermique évacuée ou amenée, du coefficient de variation volumique et de la capacité thermique spécifique du fluide caloporteur. Le débit massique de réalimentation est nécessaire à la conception de la vanne de décharge et/ou de la pompe avec régulation de pression. Il se calcule de la manière suivante:

$$\dot{M} = \gamma(T_x) \frac{\dot{Q}}{c_p}$$

Le coefficient de variation volumique nécessaire au calcul du débit massique de réalimentation dépend de la différence de température et de densité du fluide caloporteur et se calcule ainsi:

$$\gamma(T_x) = -\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \frac{1}{\Delta T} = -\frac{\rho(T_x) - \rho_0}{\rho_0 (T_x - T_0)}$$

Lors de la conception du dispositif d'expansion et de maintien de la pression, il convient de prendre en compte les points suivants:

- puissance des installations de chauffage et consommateur de chaleur,
- température d'amenée et de retour, température maximale et température de remplissage,
- rapports de pression dans le système,
- fluide (eau, eau-glycol, etc).

Selon l'utilisation et la taille de l'installation, on recommande un dispositif d'expansion et de maintien de la pression à charge de gaz fixe (petites installations), avec compresseurs (maintien de la pression précis éventuel) ou avec pompes (pompes Transero pour de grandes installations).

Une variation de pression de $\pm 0,2$ bar correspond à une qualité de régulation suffisante pour un réseau. L'objectif doit être une réinjection dans le réseau au sein de cette plage avec les compresseurs ou les pompes Transero.

Dans l'exemple de calcul suivant, le volume d'expansion et le volume nominal ainsi que le débit massique de réalimentation théorique de l'installation d'expansion (pré-maintien de la pression) est calculé de manière exemplaire pour un réseau de chauffage à distance avec 1 MW de puissance installée.

V_N	= Volume nominal [m ³]
ΔV	= Volume réalimenté [m ³]
V_{wv}	= Volume réserve d'eau [m ³]
V_0	= Eau contenue [m ³]; volume d'eau global dans un système fermé
p_0	= Pression de service minimale [bar]; afin d'éviter dépression, évaporation et cavitation.
p_e	= Pression globale réseau [bar]; la pression à la température la plus élevée est déterminante pour la conception.
$\rho(T_x)$	= Densité du fluide à la température de fin [kg/m ³]
ρ_0	= Densité du fluide à la température de départ [kg/m ³]
\dot{M}	= Alimentation ultérieure du débit massique expansion (kg/s)
$\gamma(T_x)$	= Coefficient de variation volumique [1/K]
T_x	= Température de fin [°C]; en règle générale la température la plus élevée (p. ex. température d'amenée maximale)
T_0	= Température de départ [°C]; en règle générale la température la plus basse (p. ex. température de remplissage)

Les pressions sont indiquées comme surpressions.

Exemple de calcul volume d'expansion et quantité réalimentée

Situation initiale – Paramètre d'application pour exemple de calcul

	Températures:	Densité (conformément au Tableau 11.1)
Température de remplissage:	$T_F = 10^\circ\text{C}$	$\rho_F = 1000 \text{ kg/m}^3$
Température d'amenée maximale:	$T_{VL} = 75^\circ\text{C}$	$\rho_{VL} = 975 \text{ kg/m}^3$
Température retour maximale:	$T_{RL} = 45^\circ\text{C}$	$\rho_{RL} = 990 \text{ kg/m}^3$
Limite de sécurité:	$T_S = 90^\circ\text{C}$	$\rho_S = 965 \text{ kg/m}^3$
Capacité thermique spécifique (présumée constante)		$c_p = 4.205 \text{ kJ/(kg K)}$
Pression globale réseau à température d'amenée maximale		$p_e = 12 \text{ bar}$
Pression de service minimale (pression de réserve) $p_0 = 3 \text{ bar}$		

Calculs volume nominal réservoir d'expansion

Eau contenue V_0

La saisie correcte de l'eau contenue V_0 est nécessaire pour les calculs. Celle-ci comprend le volume d'eau global dans le système fermé, auquel l'installation d'expansion est raccordée. Une liste est donnée ici pour exemple.

Chaudière 1 MW		1 pièce	3500 L	=	3500 L
Conduites générateur de chaleur DN 80		100 m	5,35 L/m	=	535 L
Accumulateur de chaleur		1 pièce	27 m ³	=	27 000 L
Echangeur de chaleur générateur de chaleur		0 pièce	0 L	=	0 L
Réservoir intermédiaire expansion		0 pièce	0 L	=	0 L
Conduites VL	DN 100	150 m	9,01 L/m*	=	1352 L
Conduites RL	DN 100	150 m	9,01 L/m*	=	1352 L
Conduites VL	DN 65	350 m	3,88 L/m*	=	1358 L
Conduites RL	DN 65	350 m	3,88 L/m*	=	1358 L
Conduites VL	DN 25	265 m	0,64 L/m*	=	170 L
Conduites RL	DN 25	265 m	0,64 L/m*	=	170 L
Echangeur de chaleur consommateur de chaleur		10 pièces	250 L	=	2500 L
			<i>Volume d'eau V_0 Total</i>	=	39 295 L

*Volume spécifique de la conduite en L/m conformément au Tableau 13.1

Volume d'expansion (température d'amenée de remplissage jusqu'à température d'amenée maximale)

Le calcul du volume d'expansion s'effectue en général pour la température d'amenée maximale et donne un volume de 1008 litres.

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho(T_x)} - 1 \right) = 39295 L \left(\frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{975 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} - 1 \right) \approx 1008 L$$

Réserve d'eau

Le calcul de la réserve d'eau représente un volume d'environ 200 litres.

$$V_{wv} = 0.005 V_0 = 0.005 \times 39295 L \approx 200 L$$

Volume nominal réservoir d'expansion

Le calcul du volume nominal du réservoir d'expansion représente un volume d'environ 2000 litres.

$$V_N = (\Delta V + V_{wv}) \frac{p_e + 1}{p_e - p_0} = (1008 L + 200 L) \frac{12 + 1}{12 - 3} = 1744.9 L \approx 2000 L$$

Calcul débit massique de réalimentation

Dans l'exemple on calcule le débit massique de réalimentation dans le cas d'une défaillance de la puissance installée de 1 MW pour une température d'amenée maximale de 75°C à une température d'amenée de 65°C.

Coefficient de variation volumique

Le calcul du coefficient de variation volumique représente une valeur de $6,12 \times 10^{-4} 1/K$.

$$\gamma(T_x) = - \frac{\rho(T_x) - \rho_0}{\rho_0 (T_x - T_0)} = - \frac{975 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 981 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{981 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (75 - 65) K} = 0.000612 \frac{1}{K}$$

Débit massique de réalimentation

Le calcul du débit massique de réalimentation représente une valeur d'environ 0,52 m³/h.

$$\dot{M} = \gamma(T_x) \frac{\dot{Q}}{c_p} = 0.000612 \frac{1}{K} \frac{1000 \text{ kW}}{4.205 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}} \approx 0.145 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 0.52 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

4 Distribution de chaleur: principes de base

Le présent chapitre décrit les composants, la structure, les méthodes de pose et les situations de pose typiques entrant dans le cadre de la construction d'un réseau de chauffage à distance. La conception et le calcul sont traités au chapitre 7.

4.1 Evolution

L'évolution historique des techniques de distribution dans le domaine du chauffage à distance permet aujourd'hui d'offrir trois générations de méthodes de distribution [3], représentées sur la Fig. 4.1. En voici le détail:

- La première génération repose sur la distribution de vapeur par le biais de conduites posées dans un caniveau en béton.
- La deuxième génération repose sur la distribution d'eau surchauffée ($> 110^{\circ}\text{C}$) par le biais de conduites posées en majorité dans un caniveau en béton. Les méthodes de conduites non fixées et posées en pleine terre, ou celles utilisant des matériaux d'isolation thermique pouvant être remplis, ne se sont jamais imposées.
- La troisième et dernière génération repose sur la distribution d'eau d'une large plage de température (jusqu'à 160°C en exploitation continue) par le biais de conduites posées directement en pleine terre et solidement fixées.

On s'intéresse également, depuis quelques années, à une méthode de distribution de la chaleur à un faible niveau de température, indirectement exploitable, que l'on appelle souvent la quatrième génération.

L'évolution la plus intéressante est celle des systèmes de conduites posées en pleine terre, car il s'agit de la technique la plus employée. Différentes utilisations en ont été faites au cours du siècle dernier, voire même avant. Certaines d'entre elles ont fait leurs preuves et sont désormais utilisées depuis longtemps, tandis que d'autres n'ont pas atteint la durée de vie prévue ou n'ont pas satisfait aux exigences établies en matière d'efficacité énergétique.

L'objectif principal de la poursuite du développement des méthodes de distribution de chaleur est essentiellement de réduire:

- les coûts d'investissement,
- l'encombrement,
- la durée d'installation,
- les coûts d'exploitation et d'entretien.

Certains de ces paramètres dépendent les uns des autres. Diminuer l'encombrement permet en effet de réduire les durées d'installation ainsi que les coûts d'investissement. Autre aspect: plus grande popularité du chauffage à distance si la réduction des durées d'installation réduit également le temps pendant lequel l'espace public est utilisé, et donc restreint pour les usagers.

4.2 Types de distribution à température décroissante

Au-delà du passage de la vapeur à l'eau chaude en passant par l'eau surchauffée, l'évolution historique du chauffage à distance montre une tendance à la baisse des températures d'amenée et par conséquent de la teneur en exergie de la chaleur (Fig. 4.4). Cette tendance se poursuit avec le développement de la distribution de la chaleur à basse température d'amenée.

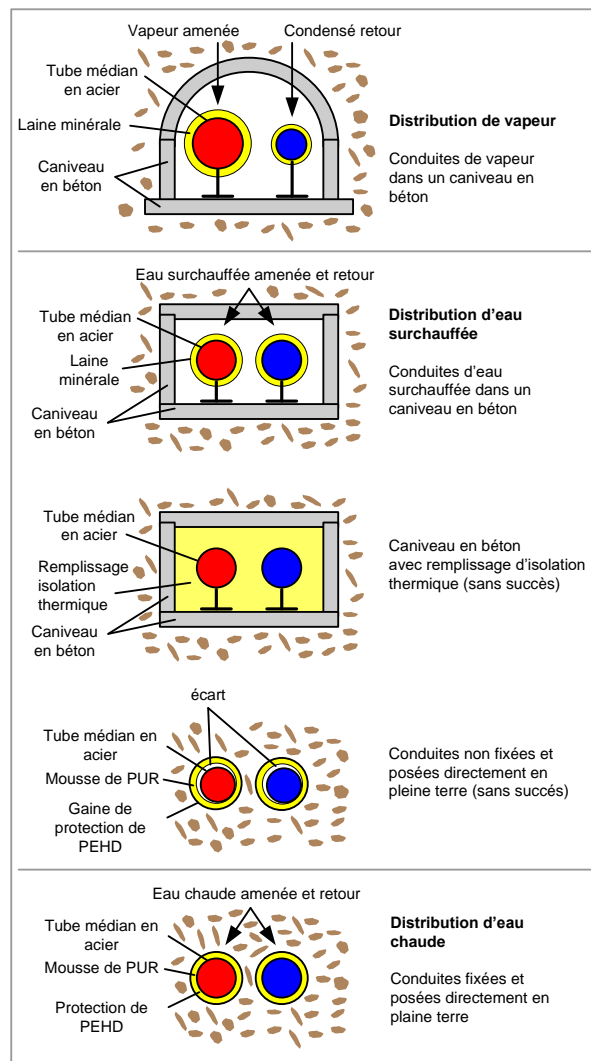


Fig. 4.1 Evolution de la technique de distribution de chaleur au fil des années. La distribution d'eau chaude fonctionne avec des tubes rigides et flexibles ainsi que des tubes doubles (d'après [3]).

4.2.1 Distribution de vapeur

Il y a un peu plus d'un siècle, la vapeur semblait être le choix d'agent caloporteur le plus évident et le plus logique, étant donné que les centrales à vapeur en fournissaient déjà. L'exploitation thermique de la vapeur était ainsi la première forme de couplage chaleur-force.

De nos jours, c'est l'eau le fluide caloporteur le plus répandu sur les réseaux de chauffage à distance d'Europe, bien que des réseaux de vapeur existent encore. Cependant, ces derniers sont peu à peu remplacés par des réseaux à eau. Néanmoins, un marché de niche subsiste encore pour les réseaux de vapeur destinés à des utilisations demandant une teneur en énergie élevée, comme c'est le cas pour certains procédés industriels ou par exemple pour les opérations de stérilisation dans les hôpitaux.

En Allemagne, la part que la vapeur représente sur la distribution totale de chaleur via les réseaux de chauffage à distance n'est que de 11%, avec une tendance à la baisse [3]. Aux Etats-Unis, en revanche, le fluide caloporteur est souvent la vapeur, comme à New York avec l'un des plus grands systèmes de chauffage à distance du monde, pour lequel aucun remplacement par un réseau à eau n'est prévu mais aucune extension ne semble pertinente non plus. D'autres réseaux de vapeur existent dans de nombreuses villes des Etats-Unis, où les réseaux existants continuent d'être exploités et où, lorsque cela s'avère nécessaire, des chaudières à vapeur dernière génération sont d'ailleurs installées.

Les réseaux de vapeur peuvent être à circuit ouvert ou fermé. Dans un système à circuit ouvert, le produit de condensation est évacué et doit être remplacé par de l'eau fraîche. Dans un système à circuit fermé, le produit de condensation est restitué au générateur de vapeur. Le circuit ouvert présente l'avantage de ne pas nécessiter de conduite de retour destinée au produit de condensation. Ceci dit, les pertes énergétiques sous forme de chaleur s'élèvent à env. 15%, et remplacer le produit de condensation demande beaucoup d'efforts.

Mais malgré les avantages de la teneur en énergie de la vapeur, et malgré une température d'amenée plus élevée que sur les réseaux à eau, les réseaux de vapeur présentent des inconvénients non négligeables:

- la vapeur, en se condensant dans les systèmes à circuit ouvert, absorbe de l'oxygène et du dioxyde de carbone, ce qui rend l'eau de condensation très corrosive, exerçant une forte charge sur la conduite de retour;
- dans un système à circuit fermé, chaque consommateur de chaleur (chaque condenseur) nécessite un dispositif de retour du produit de condensation.
- La perte de charge dans le système à vapeur est généralement beaucoup plus importante que dans le système à eau.
- La séparation du produit de condensation requiert des équipements coûteux.

4.2.2 Distribution d'eau surchauffée

La configuration des réseaux de chauffage à distance de deuxième génération est identique à celle de la première, hormis le fait que le fluide caloporteur utilisé est l'eau plutôt que la vapeur. Les conduites sont, là aussi, posées dans des caniveaux. Aux débuts de la distribution du

chauffage à distance par la vapeur, les caniveaux étaient également maçonnés et souvent rendus praticables. Par la suite, les caniveaux ont été réalisés de manière beaucoup plus compacte et en béton, comme on peut le voir sur la Fig. 4.1. On emploie encore aujourd'hui les canaux énergétiques praticables (tunnels...), par exemple dans les grandes villes, où en plus du chauffage à distance sont également utilisés le froid à distance, l'eau et d'autres sources d'énergie circulant via des conduites.

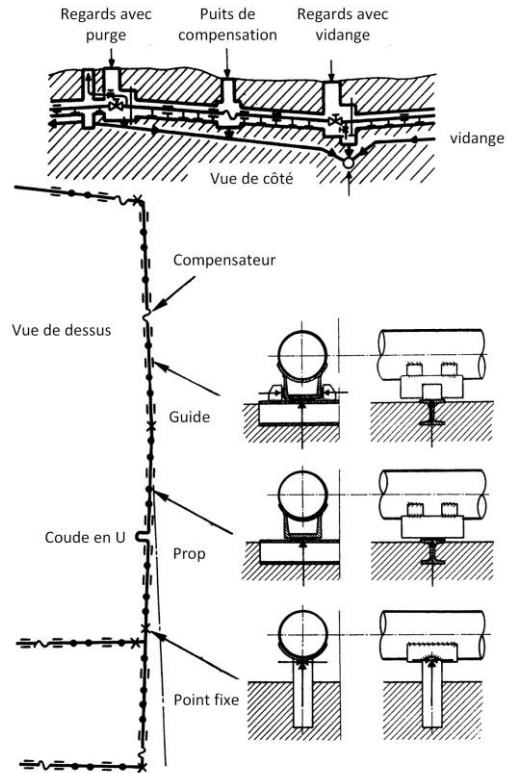


Fig. 4.2 Deuxième génération de systèmes de distribution de chaleur: distribution d'eau surchauffée dans un caniveau en béton [3].

Les caniveaux en béton préfabriqués accélèrent le processus de pose, mais il reste toutefois les regards et puits de compensation à bétonner sur place. La laine minérale servant à l'isolation thermique est directement posée sur place. Afin d'assurer l'efficacité de l'isolation thermique, la laine minérale doit rester sèche, ce qui ne peut pas toujours être garanti en cas de condensation dans le caniveau ou simplement de fuite, car l'isolation thermique n'est nullement protégée de l'humidité.

Afin que les conduites rigides ne souffrent pas de la dilatation et de la contraction thermiques, les conduites sont maintenues par ce que l'on appelle des points fixes. Entre ces points fixes, les conduites doivent être guidées et soutenues. Autres possibilités de compensation thermique: les compensateurs à soufflet métallique ou la pose d'une conduite en U, comme le montre la Fig. 4.2.

On constate par expérience que des réseaux de chauffage à distance de deuxième génération minutieusement planifiés et correctement exploités sont toujours en service et fonctionnent parfaitement.

4.2.3 Distribution d'eau chaude

L'aspect coûteux et chronophage de la technique de pose dans des caniveaux en béton a constitué la raison principale de la poursuite du développement des conduites en elles-mêmes ainsi que des méthodes de pose, et a justifié le passage de la technique caniveau à la pose en pleine terre.

Entre la deuxième et la troisième génération, il y a eu deux étapes intermédiaires, qui ont finalement permis de conduire à cette troisième génération (troisième et quatrième graphiques de la Fig. 4.1). La première étape était une modification de la pose en caniveau, où différents matériaux de remplissage étaient testés comme isolant thermique. La deuxième étape concerne le développement de tubes pré-isolés en plastique ou métal posés en pleine terre, avec une fente entre la conduite du fluide caloporteur et l'isolation thermique pour compenser la dilatation thermique. Ces deux étapes de développement ont été vaines, soit car les coûts se sont révélés trop élevés, soit car la méthode présentait des défauts, comme la corrosion des conduites acier du fluide caloporteur du fait de l'humidité.

Ces expériences ont favorisé la poursuite du développement des tubes pré-isolés en plastique ou métal, dans lesquels la conduite du fluide caloporteur est fixée à l'isolant thermique, lui-même solidement fixé à la gaine de protection (Fig. 4.3). Ce système a largement permis de régler le problème de la corrosion. Les tubes pré-isolés en plastique ou métal sont des tubes préfabriqués et peuvent ainsi être posés sans attendre. Ils existent en version rigide (en barres) ou flexible (en rouleaux et en barres).



Fig. 4.3 Troisième génération de systèmes de distribution de chaleur: tube pré-isolé en métal rigide
Source: Brugg Rohrsystem AG

En fonction de l'utilisation qui doit en être faite, les conduites pour le fluide caloporteur peuvent être en acier, en métal non-ferreux ou en plastique. Actuellement, l'isolation thermique est constituée d'une mousse dure en polyuréthane, formée à l'aide d'un gaz propulseur hautement résistant et respectueux de l'environnement et qui possède de très bonnes propriétés isolantes. La gaine de protection doit pouvoir supporter la grande majorité des composés chimiques présents dans le sol tout en restant

résistante aux chocs et incassable. C'est pour cela que l'on utilise des tubes extrudés sans soudure en polyéthylène haute densité (PEHD).

Les tubes rigides et flexibles sont tous deux utilisés dans le cadre de réalisations simples comme multiples (p. ex. tube double). Dans le cas de réalisations multiples, au moins deux conduites pour fluide caloporteur sont logées dans une seule et même gaine de protection. Les tubes flexibles et les polytuyaux ne sont cependant disponibles que dans de petites plages de diamètres (cf. chapitre 4.3.1.6).

Une des particularités de la troisième génération de méthodes de distribution de chaleur, en plus du système simplifié de pose en pleine terre, est que le nombre de composants nécessaires à la compensation de la dilatation thermique est réduit. Les compensateurs à soufflet métallique n'étant pratiquement plus utilisés, on tire désormais profit de l'élasticité des tubes pour compenser la dilatation thermique, et on favorise cette élasticité grâce à des coudes supplémentaires (changements de direction) sur le tracé.

Une autre caractéristique de la troisième génération est la possibilité d'être averti en cas de fuite. La méthode ne permet pas seulement d'en être informé, mais également de pouvoir la localiser précisément, à quelques mètres près.

4.2.4 Distribution à basse température

On appelle également la distribution de chaleur à basse température «système LowEx», «réseau Anergie» ou encore «chauffage à distance à basse température». Elle peut faire partie d'un réseau bien plus grand, que l'on nomme alors aussi «réseaux d'échanges énergétiques». La distribution de chaleur à basse température peut intervenir en remplacement ou en complément d'un réseau de chauffage à distance classique. Bien que certaines utilisations en soient déjà faites, cette nouvelle méthode, également appelée quatrième génération et représentée sur la Fig. 4.4, n'est encore qu'en phase de développement. Les objectifs de cette méthode sont entre autres les suivants:

- utilisation plus large du chauffage à distance à basse température;
- distribution de chaleur à basse température pour alimenter les pompes à chaleur décentralisées;
- mise en réseau de la production, de la distribution et de la consommation d'énergie;
- chauffage à distance bidirectionnel, dans lequel les consommateurs de chaleur endossent à la fois le rôle de producteurs d'énergie.

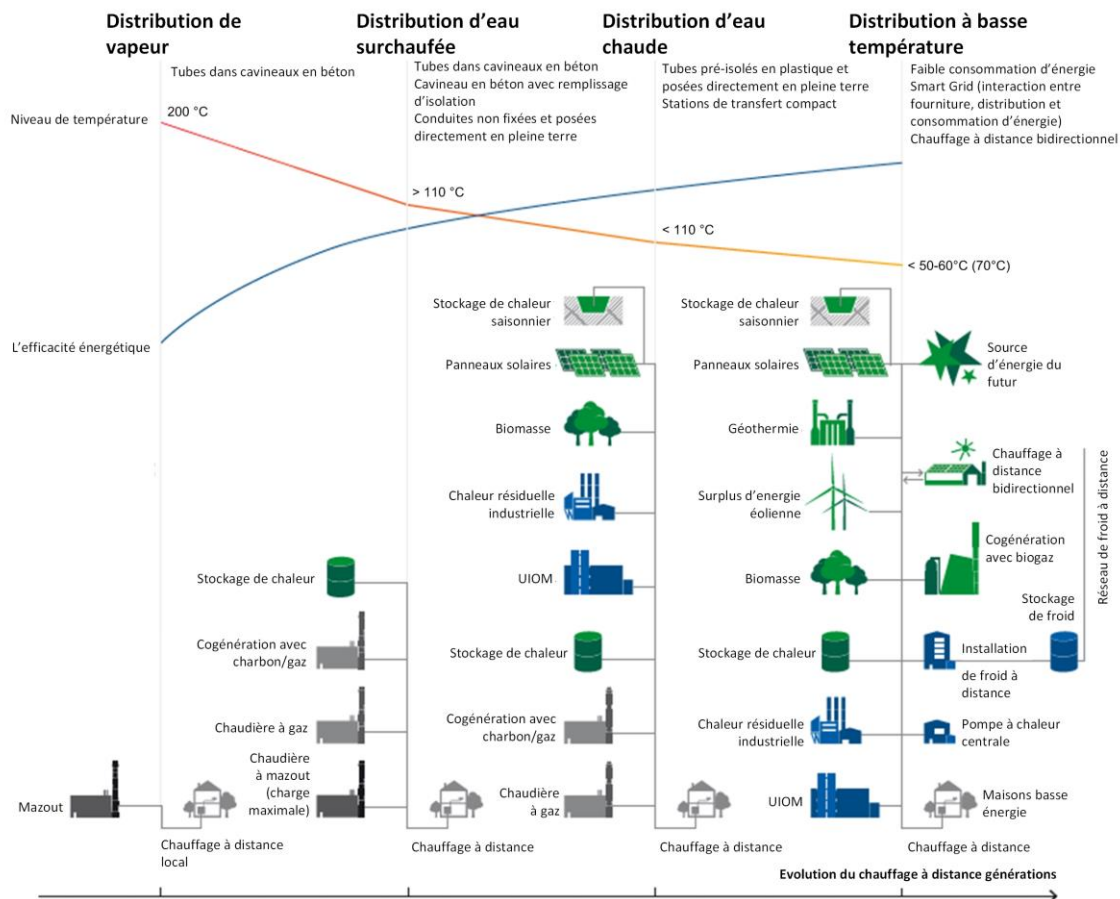


Fig. 4.4 Evolution du chauffage à distance en quatre générations, avec de plus en plus de sources d'énergie disponibles et une complexité croissante alliée à une baisse du niveau de température du flux d'amenée et une augmentation de l'efficacité énergétique (adapté de [42]).

4.3 Composants

4.3.1 Systèmes de conduites

Le choix du système de conduites et de la technique de pose adaptée dépend, au-delà de la température et de la pression du réseau, des exigences en grande partie déterminées par les conditions du site. Il s'agit des:

- conduites de services industriels;
- environnement;
- constructions;
- routes;
- voies;
- passages souterrains;
- nappes phréatiques;
- nature du sol;
- arbres.

Le système de conduites le plus répandu est le tube pré-isolé en métal, du fait de sa standardisation, de sa robustesse et du faible coût de ses matériaux. Pour la distribu-

tion secondaire et les conduites de raccordement domestique, on utilise principalement aussi les systèmes de conduites flexibles, comme les tubes médians en plastique et les tubes médians en métal. D'autres systèmes de conduites existent par ailleurs: les tubes pré-isolés avec enveloppe en acier et les tubes en PRV (fibre de verre).

4.3.1.1 Tubes pré-isolés en métal

Les tubes pré-isolés en métal (Métal pré-isolé) sont les conduites de chauffage à distance les plus courantes. Leur grande stabilité thermique et à la pression permettent de les employer dans de nombreuses situations. Les tubes pré-isolés en métal rigides se composent d'un tube médian en acier relié à une couche isolante de mousse dure en polyuréthane. La gaine de protection est en polyéthylène à haute densité (PEHD) (Fig. 4.3). Chaque matériau est relié aux autres de manière solidaire. Il s'agit donc d'un système de tubes sans compensation automatique, raison pour laquelle la dilatation thermique est répartie sur l'ensemble du système de conduites.

La charge continue maximum pour une durée de vie de 30 ans est assurée jusqu'à une température de 120°C, conformément à la norme SN EN 253 [96]. Selon les instructions du fabricant, sont garanties des températures

d'exploitation continue pouvant atteindre 140°C à une pression de 25 bar max. Les fabricants doivent dans ce cas tester cette durée de vie thermique de 30 ans, conformément à l'Annexe C de la norme SN EN 253 [96].

Afin d'absorber les contraintes et les dilatations qui surviennent, une statique du réseau de conduites complexe de même que des mesures de compensation appropriées doivent impérativement être mises en place. Suivant les profils d'exigences, la pose des tubes pré-isolés en métal se fait avec ou sans préchauffage, avec compensateurs à utilisation unique ou longue durée, ou à froid. L'objectif de ces méthodes de pose est d'absorber la dilatation thermique des conduites en acier, afin de ne pas dépasser les contraintes admissibles des tubes en acier. La méthode de pose doit être appropriée et correspondre aux éléments de conception et d'aménagement du tracé, ainsi qu'aux calculs de la statique du réseau de conduites. La fiche technique FW 401 de l'AGFW [100] simplifie la planification de la statique du réseau de conduites en permettant une conception optimale grâce à des graphiques, et en réduisant la vérification mathématique détaillée à quelques cas particuliers. La pose à froid de conduites de DN 400 max. est en même temps également autorisée par une étude de la statique.

Dans le cas d'un aménagement du tracé complexe et dans des conditions moins évidentes (conduites de service industrielles, etc.), de nombreuses pièces spéciales se révèlent parfois nécessaires, ce qui rend le prix de la pose relativement élevé. Toutefois, étant donné que les matériaux sont abordables et que la sécurité de fonctionnement est élevée, les tubes pré-isolés en métal se sont largement imposés comme la solution standard, et ce notamment pour les diamètres supérieurs à DN 100.

Généralement, les conduites sont réalisées en soudant les tubes entre eux. Outre des soudeurs certifiés, cette opération exige également un certain investissement pour contrôler les soudures (épreuve de résistance et rayons X), un effort à ne pas sous-estimer. En alternative au soudage, les tubes de faible diamètre nominal (DN 100 max.) peuvent également être raccordés les uns aux autres par pression (système Haelok p. ex.).

4.3.1.2 Tubes médians en plastique

Les tubes médians en plastique (Flexible plastique) flexibles se composent d'un tube médian en polyéthylène réticulé (PER) ou en polybutène (PB). L'isolation thermique et la gaine sont conçues de la même manière que celles des tubes pré-isolés en métal. Les tubes médians en PER et PB possèdent une barrière de diffusion à l'oxygène.

La température d'exploitation est limitée à 95°C max. et la limite de pression est de 6 bar pour le chauffage et de 10 bar pour l'eau chaude sanitaire et l'eau potable. Pour une durée de vie de 30 ans, la température d'exploitation continue est de 80°C et la pression max. de 6 bar. En se limitant à 70°C et 6 bar, la durée de vie théorique est portée à 50 ans, tandis qu'une exploitation continue à la température maximum de 95°C la réduit considérablement.

Chaque section de tube est reliée aux autres par des raccords à sertir, assemblés à l'aide d'outils spécifiques. Les tubes en polybutène (PB) peuvent également être soudés. Les raccords domestiques sont effectués avec des tés. Il n'est cependant pas possible de réaliser d'autres raccords qu'en gelant ou en écrasant la conduite, et non en la piquant comme un tube pré-isolé en métal. Il est donc recommandé d'anticiper, en intégrant dès le départ d'autres tés destinés à d'éventuels futurs raccords.

L'utilisation de tube médian en plastique se limite aux petits et moyens réseaux de chauffage à distance, du fait des paramètres d'exploitation relatifs à la température et à la pression. L'avantage par rapport aux tubes pré-isolés en métal est la simplicité de l'aménagement du tracé, qui peut être adapté aux conditions locales telles que la topographie, les traversées de secteurs ou les conduites tierces. Comparés aux tubes médians en métal évoqués au point suivant, les tubes médians en plastique sont moins chers et plus faciles à cintrer, et permettent d'ailleurs des angles plus aigus. De plus, ils exigent moins de personnel de construction et de montage.

Ce sont ces avantages qui font que l'on privilégie les tubes médians en plastique plutôt que les tubes médians en métal, dans la mesure où la stabilité thermique et à la pression le permet. Quelques inconvénients tout de même: le coût relativement élevé des pièces usinées, la technique de raccordement ultérieure complexe, le fait qu'il n'existe aucun système d'avertissement en cas de fuite, et le coût élevé des matériaux, augmentant plus que proportionnellement au diamètre.

4.3.1.3 Tubes médians en métal

Afin de garantir la flexibilité des tubes médians en métal (Flexible métal), ce sont généralement des tubes en cuivre ou acier annelé ou, pour les petits diamètres, des tubes droits en acier ou cuivre recuit. L'isolation thermique et la gaine sont conçues de la même manière que celles des tubes pré-isolés en métal.

Les tubes médians en métal peuvent être utilisés en exploitation continue jusqu'à une température de 160°C et une pression de 25 bar.

Les systèmes de conduites ondulées possèdent une compensation automatique totale et sont proposés sous forme de rouleaux jusqu'à DN 150. Les systèmes de conduites droites possèdent une compensation automatique partielle et ne sont produits sous forme de rouleaux que pour les petits diamètres, car les tubes sont soumis à une déformation trop importante avec les diamètres plus grands. Ces deux systèmes ne nécessitent donc aucune mesure de compensation et permettent un aménagement du tracé en toute flexibilité. Les tubes médians en métal sont donc utilisés de préférence pour les conduites de raccordement domestique, parce que cette flexibilité y représente un avantage considérable et qu'aucune pièce usinée ni aucun dérivateur ne s'avère nécessaire.

En matière de travaux de génie civil, les exigences sont les mêmes que pour la pose de tube médian en plastique.

La pose est toutefois plus complexe du fait du poids du système et des efforts que le cintrage nécessite.

Les ondulations des tubes entraînent une augmentation des pertes de charge, ce qui justifie parfois que le diamètre nominal des tubes ondulés soit plus important que celui des tubes lisses. Un autre inconvénient est celui du raccordement ultérieur, qui n'est possible que par l'utilisation de tés supplémentaires, qui ne peuvent être installés que lorsque le réseau est hors service. Les avantages de ce système sont par ailleurs sa simplicité de pose et le peu de travaux de génie civil requis. Le coût des tubes médians en métal flexibles étant plus élevé que celui des tubes médians en plastique flexibles, ils ne sont mis en place que si le réseau requiert une stabilité thermique et à la pression plus importante.

4.3.1.4 Tubes en plastique renforcé de fibres de verre (tubes en PRV)

Un tube en PRV est constitué d'un tube rigide en résine époxy renforcée de fibres de verre. Comme un tube pré-isolé en métal, il est pourvu d'une couche isolante en mousse dure en polyuréthane et d'une gaine en PE. Les tubes en PRV sont légers et leur principal point fort est leur résistance à la corrosion, ce qui explique pourquoi ils sont principalement utilisés pour les fluides corrosifs tels que l'eau de source géothermique. La limite de charge s'élevé à 160°C et 16 bar.

Le raccordement de chaque tube et des pièces usinées s'effectue par collage. Les raccordements ultérieurs ne peuvent être réalisés que sur une conduite vidangée, permettant d'intégrer des tés ou de renforcer le tube principal à l'aide d'un manchon et de le percer. La statique du réseau de conduites est plus facile à apprécier qu'avec les tubes pré-isolés en métal. Selon la longueur du tube, il peut s'avérer nécessaire de réaliser des culées en béton aux changements de direction. À côté de cela, les travaux de génie civil et le dimensionnement du fossé sont les mêmes que pour la pose de tube pré-isolé en métal. En raison du coût élevé de leurs matériaux, les tubes en PRV ne sont employés qu'en cas d'exigences particulières, notamment si des fluides corrosifs sont utilisés.

4.3.1.5 Tubes pré-isolés avec enveloppe en acier (SMR)

À la différence des tubes pré-isolés en métal, dans les tubes pré-isolés avec enveloppe en acier (SMR), la gaine de protection elle aussi est constituée d'acier. Cela permet d'atteindre des températures supérieures à 300°C et des niveaux de pression jusqu'à 64 bar. Etant donné les coûts qu'entraînent les SMR, ces derniers ne sont utilisés que sur de très grands réseaux de chauffage à haute température, ou à des fins industrielles. L'isolation thermique est principalement assurée par le vide que constitue l'espace entre la gaine de protection et les tubes accueillant le fluide. Une couche de fibre minérale est également utilisée pour réduire le rayonnement. L'isolation sous vide permet des rejets de chaleur nettement inférieurs à ceux des autres systèmes. Chaque section de tube est soudée à la suivante et le vide peut être contrôlé

afin de détecter les éventuelles fuites du tube intérieur ou de la gaine de protection.

4.3.1.6 Modèle à tube double

Les systèmes de tube pré-isolé en métal, tube médian en métal et tube médian en plastique sont également disponibles en modèle à double tube (auxquels on ajoute alors le terme *Duo*) pour les faibles plages de diamètres nominaux (

Tableau 4.1 et Tableau 4.2). Dans certains domaines d'application, les tubes pré-isolés avec enveloppe en acier peuvent être à tube double ou multiple. Par rapport aux systèmes de conduites simples, les systèmes à tube double ou à polytuyau présentent les avantages suivants:

- réduction du coût de pose (rétrécissement de la largeur du fossé);
- diminution des rejets de chaleur spécifiques;
- division par deux du nombre de raccords à manchons;
- division par deux du nombre d'avant-trous à percer et de joints d'étanchéité murale nécessaires au raccordement de bâtiments;
- réduction du nombre de coudes de dilatation.

Il faut en revanche veiller, grâce à l'isolation thermique du tube double, à ce que le transfert de chaleur de la conduite d'amenée à la conduite de retour reste minime et que la température de retour n'augmente pas si cela n'est pas souhaité. Les tubes doubles se prêtent particulièrement bien à la pose de tube médian en métal et tube médian en plastique de maison à maison, car aucun dérivateur n'a besoin d'être installé dans le sol.

Lors de l'utilisation de tubes doubles sur des tubes pré-isolés en métal, il est indispensable de connaître les dérivateurs avec précision afin de pouvoir utiliser les pièces usinées nécessaires. L'installation ultérieure d'un dérivateur engendre des coûts importants. L'ensemble des conduites doit être excavé avec soin, car les tubes pré-isolés en métal à tube double sont très rigides. L'idéal est un tracé horizontal, car la liberté de pose est ainsi limitée à un certain degré. Les différences d'inclinaison exigent également des pièces usinées d'une extrême précision. Le système le plus intéressant est celui de tubes pré-isolés en métal à tube double dans le cas de conduites de transport droites et sans dérivateur, de même qu'une inclinaison constante du tracé. En cas de pression insuffisante (surtout sur les longues distances), un tube double à faible diamètre peut aussi être posé.

4.3.1.7 Choix du système de conduites

Lors de la réalisation d'un réseau de chaleur à distance avec centrale thermique et réseau de chauffage à distance, les coûts d'investissement du réseau représentent souvent plus de 50% (donc la majorité) des coûts totaux. L'optimisation des coûts du réseau de chauffage à distance joue donc un rôle crucial dans la rentabilité globale, il faut donc tenir compte des charges financières issues de l'investissement et des charges d'exploitation. Il faut dans un premier temps définir les zones d'approvisionnement possibles puis déterminer plusieurs lieux appropriés possibles pour la centrale thermique. Après une présélection appropriée des conditions limites du réseau, il est important de choisir et de concevoir le système de conduites. Les principaux critères de sélection du système de conduites, ou d'un système de conduites à combiner au sein d'un réseau, sont les paramètres suivants:

- a) Température d'exploitation
- b) pression de service (pressions statique et dynamique);
- c) surveillance des fuites
- d) coût des rejets de chaleur;
- e) densité de consommation;
- f) offre de diamètres nominaux, notamment de diamètres de tubes max.;
- g) type de pose;
- h) espaces de génie civil disponibles;
- i) projets d'expansion.

Point a: la **température d'exploitation** maximale d'un réseau de chauffage à distance détermine si des tubes médians en plastique peuvent être envisageables, ou si des tubes médians en acier doivent être utilisés. Si l'exploitation respecte la température d'exploitation continue spécifiée par le fabricant, la durée de vie garantie est d'au moins 30 ans.

Point b: la **pression de service** maximale d'un réseau de chauffage à distance dépend des pertes de pression du réseau (qui doivent être compensées par les pompes du réseau) et de la topographie (écart entre le point le plus haut et le point le plus bas du réseau de chauffage à distance). Il est alors possible d'en déduire les matériaux et la pression nominale pour lesquels opter. En principe, différentes pressions nominales peuvent également intervenir sur le réseau. Afin de déterminer si cela est plus économique, il convient de comparer les différents cas possibles.

Point c: c'est le choix du système de conduites qui détermine la présence de l'option de **surveillance des fuites**.

Point d: le choix de l'**épaisseur** de l'isolant thermique doit reposer sur un calcul de rentabilité, en comparant les charges financières par différentes épaisseurs d'isolation

au coût des rejets de chaleur. Cette évaluation dépend donc, entre autres, de la durée d'utilisation calculée et de l'intérêt du capital, ainsi que des coûts de revient de la chaleur.

Pour e: la **densité de consommation** (et donc le nombre de dérivations sur le réseau de chauffage à distance) peut avoir un impact sur le système de conduites choisi, étant donné que les systèmes à tube double et les systèmes de conduites flexibles par exemple sont peu avantageux si les dérivations sont nombreuses, à cause de la complexité des systèmes de raccordement.

Pour f: il ne faut pas oublier que certains systèmes de conduites ne permettent de couvrir qu'une plage de diamètres de conduites restreinte et que le **diamètre de tube maximum** peut se voir être limité.

Pour g: on distingue en principe plusieurs méthodes de **pose**. Chaque méthode de pose doit être examinée afin de déterminer si l'installation du système de conduites sélectionné est possible et si des modifications doivent éventuellement y être apportées.

Pour h: si l'on sait déjà que les **espaces de génie civil disponibles** font l'objet de restrictions (notamment dans le cas de systèmes posés en pleine terre), il faut vérifier que ce n'est pas le cas pour le système de conduites choisi.

Pour i: lors du choix d'un système de conduites, l'installation finale du projet doit être prise en compte, car les paramètres ci-dessus peuvent évoluer au fil du processus d'**extension du réseau**. Ainsi un réseau de chauffage à distance pourrait-il par la suite nécessiter d'être exploité à des niveaux de température et de pression plus élevés par exemple, en raison d'un nombre croissant de consommateurs ou d'une densification qui n'avait pas été prévue.

Le Tableau 4.1 montre un aperçu de chaque système de conduites.

Le Tableau 4.2 liste les diamètres nominaux disponibles de série pour les systèmes des tubes pré-isolés en métal (Métal pré-isolé), en tubes médians en métal (Flexible métal) et tubes médians en plastique (Flexible plastique) de plusieurs fournisseurs.

Tableau 4.1 Aperçu des systèmes de conduites.

Système de conduites	Domaine d'application				Longueurs disponibles		Modèle à tube double jusqu' à DN	Spécificités
	Température d' exploitation maximum autorisée	Température d' exploitation continue	Pression nominale PN	Diamètre nominal DN	Barres	Rouleaux		
	°C	°C	bar	-	m	m		
Métal pré-isolé	160	jusqu'à 140	25	20 à 1000	6/12/16*	-	DN 150	Système de conduites le plus employé, du fait de sa standardisation et de sa robustesse.
Flexible métal	180	jusqu'à 160	25	20 à 150	12*	jusqu'à 1000	DN 50	Relativement chers → justifiés si les conditions de pose l'exigent.
Flexible plastique	95	80	6	20 à 150	12*	jusqu'à 780	DN 50	Relativement abordables → stabilité thermique et à la pression limitées.
PRV	160	160	16	25 à 1000	6*	-	-	Relativement chers → uniquement en cas d'exigences particulières en matière de résistance à la corrosion.
SMR	400	400	jusqu'à 64	25 à 1200	16*	-	**	Relativement chers → uniquement si les conditions de pression, de température ou de pose l'exigent.

* Longueurs standard/s, autres longueurs disponibles sur demande. ** Adaptations spécifiques disponibles sur demande (p. ex. modèle à tube multiple).

Tableau 4.2 Diamètres nominaux disponibles de série (en gris) pour les systèmes de Métal pré-isolé, en Flexible métal et Flexible plastique, avec des informations quant à l'épaisseur d'isolation et la possibilité d'une version à double tube. L'ensemble reprend les offres des entreprises Brugg pipesystems, Isoplus et Logstor.
 EI: épaisseur d'isolation pour les Métal pré-isolé, par ordre croissant de 1 à 3.
 S: isolation standard pour les Flexible métal et Flexible plastique; R: isolation renforcée pour les Flexible métal et Flexible plastique.

DN	Métal pré-isolé			Métal pré-isolé Duo			Flexible métal		Flexible métal Duo		Flexible plastique		Flexible plastique Duo	
	EI1	EI2	EI3	EI1	EI2	EI3	S	R	S	R	S	R	S	R
20														
25														
32														
40														
50														
65														
80														
100														
125														
150														
200														
250														
300														
350														
400														
450														
500														
600														
700														
800														
900														
1000														

4.3.2 Surveillance des fuites

Suivant la technique de pose et le système de conduites, les réseaux de chauffage à distance peuvent être conçus avec ou sans dispositifs de surveillance des fuites. La surveillance électrique est très largement utilisée avec les **tubes pré-isolés en plastique ou métal** et est considérée comme solution comprise dans l'état de la technique [5]. Il a été constaté qu'une surveillance continue avec localisation centralisée des fuites augmentait la sécurité de l'alimentation d'un réseau, et qu'elle minimisait ainsi les préjudices en termes de temps et de rentabilité que causeraient des dommages. Il est donc en principe recommandé de mettre en place un dispositif de surveillance des fuites. La surveillance du réseau de chauffage à distance doit être effectuée en continu à partir des points de mesure prévus à cet effet.

La **thermographie** permet également de localiser d'éventuelles fuites. Cette méthode est employée lorsqu'aucune surveillance électrique n'a été intégrée aux conduites de chauffage à distance à la construction.

En cas de **pose en caniveau**, le contrôle visuel du puits est considéré comme suffisant, et des dispositifs automatiques de surveillance du puits sont à utiliser si cela se révèle nécessaire. Les lignes aériennes ne sont en règle générale pas équipées de dispositif de surveillance.

Les **systèmes de surveillance des fuites** actuels mesurent soit la résistance électrique de l'isolation thermique entre deux câbles électriques, soit entre un seul et le tube médian. Si l'humidité pénètre l'isolation thermique ou l'indicateur, la résistance diminue fortement. Utiliser deux câbles permet de former un circuit de surveillance. Surveiller ce circuit garantit que l'ensemble du circuit est contrôlé. Il faut veiller, en choisissant un système de surveillance des fuites, à ce que le principe de mesure permette une détection précoce d'éventuels dommages (pénétration d'humidité dans l'isolant en raison d'une détérioration de la gaine externe ou du tube médian de la conduite de chauffage à distance) et une localisation précise de ces dommages, afin que les travaux de maintenance puissent commencer le plus rapidement possible.

4.3.2.1 Systèmes de surveillance

La surveillance des fuites sur un réseau peut se faire de la manière suivante, à l'aide d'instruments de mesure numériques ou analogiques:

- **surveillance centralisée:** toutes les données et valeurs relatives à cette surveillance ainsi qu'à d'autres circuits de surveillance sont enregistrées en un endroit unique et centralisé;
- **surveillance décentralisée:** les dispositifs de surveillance sont installés sur site et intégrés au circuit de surveillance. Les données sont interrogées de façon périodique ou, si besoin, une alerte est transmise;
- **surveillance manuelle:** les valeurs d'état momentanées sont contrôlées à intervalles réguliers par des dispositifs de surveillance portables.

Dans les systèmes de surveillance décrits ci-dessous, on entend par système les câbles utilisés dans l'isolation des conduites de chauffage à distance.

Système Brandes (câble NiCr)

Le système Brandes se compose de deux câbles n'étant pas en contact l'un avec l'autre. Un câble de détection NiCr en isolation perforée (80% Ni et 20% Cr) et un câble de retour de cuivre entièrement isolé. La perforation permet de détecter l'humidité dans la mousse. À chaque extrémité de la conduite, les deux câbles sont reliés et forment ainsi un circuit de surveillance. L'avantage de la résistance élevée des câbles de détection est qu'elle permet d'en déduire directement la longueur des conduites ou des câbles de détection raccordés, ce qui garantit une localisation précise des points d'humidité. Autre avantage, l'utilisation et le câblage uniformes par tous les fabricants et fournisseurs de conduites de chauffage à distance.

Système Nordic (câbles cuivre)

Le système Nordic utilise deux câbles de cuivre n'étant pas en contact l'un avec l'autre et qui peuvent être conçus différemment selon les fournisseurs: il s'agit de câbles nus, étamés et isolés. Ces dernières années, l'utilisation de deux câbles nus est devenue relativement majoritaire (les câbles étamés sont également considérés comme nus). L'un des principaux avantages du système Nordic est le prix d'acquisition relativement avantageux des câbles. Il n'est toutefois pas recommandé de mélanger les différents types de câbles. Les inconvénients que présente une localisation précise des points d'humidité grâce à la technique de mesure de référence de résistance ci-dessous peuvent quasiment être éliminés en soudant les raccords sur les tubes. Comme avec le système Brandes, les câbles sont reliés entre eux à toutes les extrémités de conduites afin de former un circuit de surveillance.

Système hiérarchique

Le système d'indicateurs intègre deux câbles de cuivre isolés et à paires torsadées à son isolation thermique. La détection se fait par des indicateurs posés aux points de soudure; il s'agit par exemple de deux plaquettes de cuivre isolées l'une par rapport à l'autre grâce à un non-tissé en céramique inorganique et maintenues dans des grilles en plastique. En cas d'humidité, la résistance d'isolation du non-tissé en céramique chute. La fluctuation de la résistance sert donc de critère de surveillance. Si la longueur totale de la conduite doit être contrôlée, il est nécessaire d'installer des câbles de surveillance appropriés dans l'isolation thermique; les mesures ne sont toutefois plus exemptes de potentiel. Les dérivations de ce système, qui se compose d'un maximum de quatre hiérarchies, sont reliées entre elles par des séparateurs. Au sein de chaque hiérarchie, le nombre de dérivations peut être choisi librement. Le réseau peut être élargi sans impact sur les installations existantes. Il est important de surveiller les éventuels points d'humidité de l'intégralité des conduites raccordées ainsi que de la conduite principale; pour cette dernière, il faut également surveiller toute rupture de fil. Ce système peut également être

utilisé pour les tubes médians n'étant pas en métal. Inconvénients: documentation complexe des différentes hiérarchies, utilisation de composants électroniques (sensibles à la surtension) et surveillance de l'humidité des conduites uniquement au niveau des manchons.

4.3.2.2 Technique de localisation

Technique de mesure de référence de résistance

Avec la technique de mesure de référence de résistance (également appelée technique de mesure de résistance), la localisation d'un point d'humidité s'effectue selon le principe du diviseur de tension à vide et s'emploie en grande majorité dans le cadre du système Brandes, bien qu'elle puisse aussi parfois avoir lieu dans le cadre du système Nordic. À l'aide d'un pont de mesure, on effectue une comparaison des deux sections partielles (du début du circuit au défaut ainsi que de la fin du circuit au défaut) afin de déterminer la position du défaut grâce à un pourcentage. Plus le degré d'humidité est élevé et la longueur des sections de mesure réduite, plus la localisation est précise. L'inconvénient est que plusieurs points d'humidité sur une même section de mesure ne peuvent être reconnus comme tels. Dans ce cas, une seule valeur moyenne sera générée.

Technique de mesure du temps de propagation de l'impulsion

La technique de mesure du temps de propagation de l'impulsion se sert de l'impédance caractéristique des câbles de surveillance, comme c'est le cas pour la localisation des défauts avec la technique des câbles. Les impulsions envoyées par l'appareil de localisation sont réfléchies plus ou moins intensément à des endroits présentant une «résistance» différente, à savoir pénétration d'humidité ou rupture de câbles. La mesure utilisée afin de localiser le défaut est le temps que met l'impulsion à se propager jusqu'au défaut. Pour localiser un point d'humidité, cette technique nécessite une pénétration d'humidité bien plus évidente qu'avec la technique de mesure de référence de résistance. La technique de mesure du temps de propagation de l'impulsion est idéale pour localiser les coupures de câbles.

Les principales caractéristiques de chaque système de surveillance des fuites figurent dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Comparaison des systèmes de surveillance des fuites.

Critère	Système Nordic	Système d'indicateurs	Système Brandes (NiCr)
Câble de détection	Deux câbles de cuivre non isolés et n'étant pas en contact l'un avec l'autre	Deux câbles de cuivre isolés et à paires torsadées, avec des indicateurs posés aux points de soudure servant à la détection	Un câble NiCr en isolation perforée en Téflon Un câble de cuivre
Techniques de mesure	Technique de mesure du temps de propagation de l'impulsion et Principe du diviseur de tension à vide	Technique de mesure du temps de propagation de l'impulsion	Principe du diviseur de tension à vide et Technique de mesure du temps de propagation de l'impulsion
Détection des défauts	Humidité dans l'isolation thermique Court-circuit au niveau des câbles Coupures de câbles	Humidité dans les indicateurs (par point de soudure ou section de tube) Court-circuit au niveau des câbles Coupures de câbles	Humidité dans l'isolation thermique Court-circuit au niveau des câbles Coupures de câbles
Tolérance d'affichage	1 à 3% de la section de mesure (p. ex. circuit de surveillance) Le réglage répété de la section de mesure permet de localiser la fuite de manière suffisamment précise.	< 1 m (par indicateur)	± 0.2% de la section de mesure (p. ex. circuit de surveillance) Le réglage répété de la section de mesure permet de localiser la fuite de manière suffisamment précise.
Options de surveillance	Centralisée Décentralisée Manuelle	Centralisée Décentralisée Manuelle	Centralisée Décentralisée Manuelle
Localisation simultanée de plusieurs dommages	Possible dans certaines circonstances, si le circuit est divisé	Possible, en cas de division, 1 ^{er} défaut visible dans la hiérarchie	Possible dans certaines circonstances, si le circuit est divisé
Longueur du circuit de surveillance	Dépend des appareils (possibilité de circuits atteignant les 6'000 m de longueur) Longueur des sections de surveillance recommandées comprise entre 800 et 1'000 m différents circuits interconnectables	Distribution secondaire hiérarchique des sections de localisation, max. 4 hiérarchies (0-3) 0. Hiérarchie 1000 m 1 à 3. Hiérarchie 1000 m Nombre de dérivations par hiérarchie illimité	Dépend des appareils (possibilité de circuits atteignant les 1'500 m de longueur) Longueur des sections de surveillance recommandées comprise entre 800 et 1'000 m Différents circuits interconnectables

4.3.2.3 Documentation et contrôle

Documentation

Afin d'optimiser l'utilisation d'une installation de surveillance et de localisation, il est indispensable de disposer d'une documentation détaillée et mise à jour relative au réseau de chauffage à distance. Elle doit idéalement également contenir les schémas de câblage, schémas électriques et schémas des circuits, les informations relatives à l'emplacement et la disposition des capteurs et des autres composants, ainsi que le procès-verbal de réception contenant des renseignements sur les contrôles et les mesures. Il faut également veiller à ce que les différents types de conduites utilisées y apparaissent.

Contrôle

Après avoir raccordé les câbles d'avertissement de fuites pendant la fabrication des raccords à manchons, il est nécessaire de vérifier la longueur, les coupures, les contacts métalliques et les tensions externes des circuits de détection à l'aide d'un appareil de contrôle du montage. Un nouveau test d'isolation doit être effectué environ quatre semaines après la mise en service des conduites de chauffage à distance. La résistance d'isolement des conduites posées doit se mesurer en mégahoms.

4.3.3 Robinetterie

Les robinets installés sont des éléments d'arrêt. Ils permettent de limiter les coupures d'exploitation en cas d'extension du réseau ou de travaux de réparation. La robinetterie est également utilisée pour vidanger et purger les conduites. Les robinets d'arrêt doivent satisfaire les exigences suivantes [5]:

- faible perte de charge/pression;
- fermeture étanche à chaque extrémité;
- étanchéité du passage du corps;
- coûts d'entretien réduits;
- faible encombrement;
- faibles bruits d'écoulements;
- remplacement possible;
- isolation (thermique) possible;
- robustesse du matériau du corps;
- également adaptés à des applications rares.

Certaines de ces exigences ont un impact sur d'autres, il est donc impossible de répondre à toutes ces exigences en même temps: des critères de priorité doivent donc éventuellement être fixés. Il est important de noter que les robinets d'arrêt ne sont pas prévus pour servir de commandes.

Les robinets peuvent émettre des bruits désagréables. De nombreux conseils sont donnés par la directive VDI 3733 [91] pour les réduire. Lorsque le robinet est complètement ouvert, le niveau d'émissions sonores est généralement négligeable tant que la vitesse d'écoulement ne dépasse pas un certain seuil.

Dans une installation de chauffage à distance, on utilise les quatre éléments de base: robinets-vannes, vannes, robinets et robinets à papillon. En fonction du corps, elles peuvent être moulées, forgées ou soudées. Au vu des rapports de température et de pression, il est indispensable d'utiliser des matériaux robustes. La robinetterie est raccordée aux conduites par des soudures ou des brides.

4.3.3.1 Robinets-vannes

Les différentes caractéristiques de construction permettent d'établir les désignations des robinets-vannes d'arrêt présentés au Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Types de robinets-vannes [5].

Caractéristique	Désignation
Élément d'arrêt	Robinet-vanne à coin
	Robinet-vanne guillotine double pelle
	Robinet-vanne guillotine à coin
	Robinet-vanne d'obturation
Forme du raccord/corps	Robinet-vanne plat
	Robinet-vanne ovale
	Robinet-vanne rond

Le coin fixe ne convient pas aux trop fortes pressions et températures. Les robinets-vannes à coin élastique ou les robinets-vannes guillotine à coin conviennent pour toutes les charges. Les robinets-vannes à sièges parallèles sont disponibles avec plaques d'obturation fendues et non fendues. Les robinets-vannes à surfaces d'étanchéité parallèles non fendues ne sont pas utilisés avec les conduites de chauffage à distance. On utilise plutôt les plaques d'obturation fendues, avec coins d'écartement pressant ces plaques contre le corps peu avant la fin du processus de fermeture.

Autre élément important: la broche, par laquelle l'obturateur est actionné. Suivant le mouvement de la broche, une répartition est possible, comme le montre le Tableau 4.5.

Les matériaux du robinet-vanne dépendent du domaine d'application. La fonte à graphite lamellaire (fonte grise) peut être utilisée pour l'eau chaude jusqu'à 110°C et 16 bar. Pour des pressions et températures plus élevées, il convient d'utiliser des matériaux plus résistants, tels que la fonte à graphite sphéroïdal (fonte GS), l'acier moulé ou l'acier forgé.

Dans la plupart des cas, outre la pression interne, s'appliquent également à la robinetterie des forces et des moments résultant de la dilatation thermique des conduites. Ces contraintes expliquent l'utilisation d'un matériau résistant pour la robinetterie. La norme DIN 4757 exige que les corps de l'ensemble de la robinetterie placée dans des conduites d'eau surchauffée supérieures à DN 50 soient réalisés dans des matériaux appropriés et aux propriétés de résistance suffisantes, quand bien même la fonte ou la fonte malléable aurait été autorisée dans les conditions d'exploitation définies.

En cas d'utilisation de constructions soudées ou en acier moulé, l'absorption de la force peut considérablement augmenter. Les robinets-vannes jusqu'à DN 250 sont de préférence forgés creux dans la matrice. Au-delà de DN 50, les robinets-vannes peuvent également être utilisés dans des constructions soudées en tôle d'acier, grâce à leurs propriétés de résistance élevées. Les robinets-vannes doivent, du fait de leur forme, être suffisamment rigides pour que les surfaces de montage ne subissent aucune contrainte de compression ni aucune déformation due aux forces exercées sur les conduites, et que l'étanchéité ne soit pas altérée.

Les robinets-vannes destinés aux conduites de chauffage à distance présentent généralement les caractéristiques de conception suivantes:

- coin flexible ou guillotine double pelle; le coin du robinet-vanne guillotine double pelle n'est sensible ni à la déformation due aux forces et aux moments des conduites, et est facile à réparer;
- broche externe si l'espace disponible le permet, mais broche interne également courante. Il est alors essentiel de prêter une attention toute particulière au joint du presse-étoupe. Une broche interne ne se révèle pertinente qu'à partir de DN 200.
- surfaces d'étanchéité métalliques;
- taux de fuite 1 d'après la norme DIN 3230 partie 3;
- dureté et épaisseur du blindage suffisantes au niveau des surfaces d'étanchéité;
- possibilité d'ajouter un entraînement électrique par la suite.

Tableau 4.5 Répartition des robinets-vannes suivant le mouvement de la broche [5].

Critère	Broche interne	Broche externe	
Mouvement de la broche	Mouvement rotatif	Mouvement de levage axial et mouvement rotatif	Mouvement de levage axial
Mouvement du volant	Non montant	Montant	Non montant
Avantages	Faible hauteur de construction, que le robinet-vanne soit ouvert ou fermé. Pas d'encrassement du filetage de la broche.	Conception simple. Meilleure protection du filetage de la broche contre le fluide. Réduction des forces d'actionnement. Double guidage de la broche. Contrôles visuels de la position de la broche. Position du volant correspondant à la position du coin.	Conception simple. Meilleure protection du filetage de la broche contre le fluide. Réduction des forces d'actionnement. Double guidage de la broche. Contrôles visuels de la position de la broche. Position de la broche correspondant à la position du coin. Faible encombrement.
Inconvénients	Filetage de la broche en contact avec le fluide et échappant au contrôle visuel. Dépôt possible.	Plus encombrant et moins pratique d'utilisation, car la position du volant change. Encrassement possible du filetage en raison de facteurs extérieurs.	Dépenses de fabrication plus nombreuses, donc ensemble plus coûteux. Encrassement possible du filetage en raison de facteurs extérieurs.

4.3.3.2 Vannes

Différents types de vannes sont utilisés suivant le modèle de conception et selon le domaine d'application, comme le montre le Tableau 4.6. Contrairement aux robinets-vannes, les surfaces de montage des vannes ne coulissent pas l'une contre l'autre.

Tableau 4.6 Types de vannes [5]:

Caractéristique	Désignation
Type de montage	Soupape-champignon
	Soupape à siège conique
	Soupape à piston
Position	Robinet droit
	Robinet oblique
Assemblage de couvercle	Vanne de prélèvement
	Vanne à chapeau
	Vanne sans couvercle
Sens d'écoulement	Vanne à passage droit
	Vanne à passage équerre

Les vannes présentent certains avantages que les robinets-vannes n'ont pas, ce qui explique que l'on les privilégie dans le cas de diamètres nominaux faibles:

- construction simple, donc coûts de fabrication réduits;
- bonne étanchéité, même à hautes température et pression;
- siège facile à rectifier en cas de dommage.

Les points suivants sont toutefois négatifs:

- diamètre nominal limité à cause des forces d'actionnement élevées juste avant la fermeture, plus élevées qu'avec les robinets-vannes et les robinets à papillon;
- flux plus fort avec une vanne qu'avec un robinet-vanne ou un robinet, les pertes de charge sont donc plus importantes.

Les corps de vanne existent en différentes formes, suivant le but recherché. Pour certaines tâches de régulation, des cônes paraboliques se révèlent nécessaires.

4.3.3.3 Robinets

Les robinets offrent certains avantages grâce à leur mode de construction simple et robuste, leur faible encombrement, leurs pertes de charge réduites en cas de section d'ouverture construite favorablement à l'écoulement et leurs courtes durées de commutation. Le passage facilité évite l'accumulation de saleté. Dans les robinets, les surfaces d'étanchéité glissent les unes contre les autres au moment de l'ouverture ou de la fermeture.

Les surfaces d'étanchéité encrassées ou endommagées se remettent facilement en état, en rectifiant simplement les sièges ou en les ré-étanchéifiant. La section de passage des robinets correspond en règle générale au moins à la section de la conduite de même diamètre nominal.

Afin d'actionner les robinets, il est nécessaire, à partir d'env. DN 200, de placer des réducteurs dans des boîtes d'engrenages ouvertes ou fermées.

Un exemple typique de robinet employé est le **robinet à tournant sphérique**. Si l'on schématise, un robinet à tournant sphérique se compose de trois parties: le tournant sphérique, le joint du passage et le corps. En voici les avantages:

- passage identique à la conduite, dans la mesure où la section n'est pas comprimée;
- forme compacte;
- grande stabilité face aux forces internes et externes;
- sans produit d'étanchéité;
- sans entretien;
- grande étanchéité assurée même en cas de faible force d'étanchéité;
- emplacement sûr des joints.

Le corps et la sphère des robinets à boisseau sphérique sont généralement fabriqués en acier ou en acier inoxydable. Jusqu'à PN 16, le corps et ses éléments peuvent également être en fonte à graphite sphéroïdal (fonte GS) voire, à partir de PN 25, en acier moulé.

Les entraînements peuvent être raccordés à des rallonges de tige, afin de permettre une bonne isolation thermique de la conduite et de la robinetterie.

Les **robinets à tournant cylindrique** doivent être pourvus d'un produit d'étanchéité. Les robinets doivent impérativement être ré-étanchéifiés à intervalles réguliers et ce, peu importe les conditions d'exploitation et la fréquence d'utilisation. Le produit d'étanchéité a certes une fonction d'étanchéité, mais aussi une fonction de protection contre la corrosion.

Un joint torique en Perbunan ou PTFE est installé entre la partie supérieure du corps et le tournant afin d'assurer l'étanchéité du dispositif. Aucune garniture de presse-étoupe n'est donc nécessaire. Le produit d'étanchéité est pressé contre les rainures du tournant et ainsi réparti sur les surfaces d'étanchéité. De plus, le corps des robinets, au-delà de DN 200, est lui aussi pourvu d'orifices de remplissage. Afin d'éviter que le produit d'étanchéité ne soit expulsé par le fluide, chaque orifice est sécurisé par une vanne anti-retour à bille. Pendant l'étanchéification, le robinet doit être ouvert; néanmoins, le tournant doit de temps à autre être déplacé à plusieurs reprises pour obtenir une bonne répartition du produit d'étanchéité.

4.3.3.4 Robinets à papillon

Les robinets à papillon sont des éléments d'arrêt dont l'obturateur prend la forme d'une plaque pivotant autour d'un axe à l'intérieur d'un corps cylindrique. Elles sont compactes, ce qui présente l'avantage de nécessiter moins de place que d'autres éléments d'arrêt, tout en étant également faciles à utiliser. Les robinets à papillon sont parfois conçus de sorte à pouvoir pivoter dans les deux sens.

L'épaisseur de la plaque circulaire (ou presque circulaire) dépend de la pression de service du fluide. Une plaque pivotante dont l'axe est décalé par rapport à son centre peut permettre d'éviter les interruptions du joint d'étanchéité.

La plaque du robinet à papillon est déplacée par l'arbre d'entraînement guidé unilatéralement dans le corps à l'aide d'un entraînement intégré, et la position de la plaque est donnée par un dispositif indicateur à transmission mécanique.

Le corps est fabriqué soit avec des embouts à souder, soit avec des brides de raccordement. Il peut également s'agir d'un corps de robinet à papillon sans brides à serrer entre deux brides de conduite. Les modèles ayant déjà fait leurs preuves pour la construction du corps sont les constructions soudées. Si la bague de montage du joint de la plaque a été soudée dans le corps du robinet à papillon, c'est alors la plaque qui porte le joint. À l'inverse, le joint profilé peut également être posé sur le corps.

La Fig. 4.5 représente les variantes actuellement les plus courantes en matière de position de la plaque dans le corps du robinet à papillon.

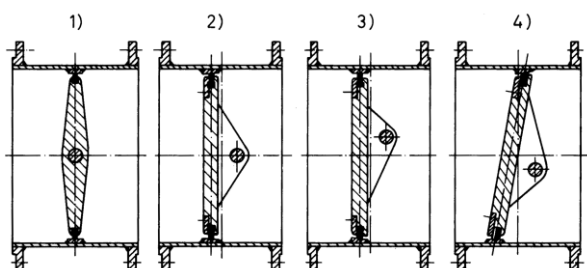


Fig. 4.5 Disposition des plaques d'un robinet à papillon [5]:
 1 Centrée
 2 Excentrée
 3 Doublement excentrée
 4 Doublement excentrée (joint métallique).

Les robinets à papillon peuvent certes être actionnés par des cylindres de commande pneumatiques et hydrauliques, mais également par des entraînements, qui sont généralement bridés sur le corps du robinet à papillon et directement raccordés à l'arbre d'entraînement de la plaque de celui-ci. Les entraînements doivent être auto-bloquants et conçus de manière à correspondre au couple maximum des robinets à papillon d'arrêt tout en respectant un facteur de sécurité. Avec de grands moteurs et pour de longues durées d'obturation, il est possible de monter des réducteurs à engrenages cylindriques en amont. Les mécanismes à vis sans fin, à broche filetée et à bielle et manivelle sont les mécanismes les plus fréquemment utilisés.

4.3.3.5 Champs d'application

Le Tableau 4.7 présente les champs d'application des robinets d'arrêt par ordre de diamètre nominal. La dimension peut avoir un impact conséquent sur le coût des différentes conduites.

Puisque pour un même robinet, plusieurs des différents types énoncés peuvent généralement convenir, le Tableau 4.8 permet de comparer les propriétés essentielles de chacun de ces éléments.

Tableau 4.7 Domaines d'application des robinets d'arrêt selon leur diamètre nominal [5].

Diamètre nominal	Type de robinet
DN 40-100	Applications principales: vannes, robinets, principalement robinets à boisseau sphérique, également robinets-vannes
DN 100-200	Zones de chevauchement: vannes, robinets-vannes, robinets, également robinets à papillon
DN 200-350	Applications principales: robinets-vannes et robinets à papillon, également robinets
> DN 400	Applications principales: robinets à papillon et robinets-vannes, également robinets

Tableau 4.8 Comparaison qualitative des propriétés essentielles des robinets [5].

Critères de comparaison	Robinetts-vannes	Vannes	Robinetts à tournant	Robinetts à boisseau sphérique	Robinetts à papillon
Siège (taille de la surface)	2 paires de bagues de siège larges	1 paire de bagues de siège étroites	Grand siège	Grand siège	1 bague de siège étroite
Longueur totale	faible	grande	grande	moyenne	faible
Hauteur totale	grande	moyenne	faible	faible	moyenne
Résistance à l'écoulement	faible	élevée	moyenne	faible	élevée
Durée d'ouverture/obturation	grande	grande	courte	courte	courte
Fréquence d'actionnement	faible à moyenne	faible	moyenne	forte	moyenne
Adéquation avec les changements de direction de l'écoulement	bonne	mauvaise	bonne	bonne	bonne
Champs d'application	moyens à grands DN	petits DN	petits à moyens DN	petits à grands DN	moyens à grands DN
Adéquation avec les forces et moments externes	insensibles robinets-vannes ronds: conviennent particulièrement à l'absorption des forces et moments élevés robinets-vannes plats: robinets-vannes les plus sensibles	sensibles aux fortes charges externes	prescriptions en matière de charges limites auxquelles l'actionnement est encore possible en cas de dépassement de charge, de serrage ou de fuite	insensibles sans brides (p. ex. si soudées)	peu sensibles idéal pour l'absorption de forces élevées, sans impact sur l'étanchéité
Sécurité de fonctionnement	actionnement au moins 1x par an nécessaire	actionnement au moins 1x par an nécessaire	actionnement au moins 1x par an nécessaire	actionnement au moins 1x par an nécessaire	actionnement au moins 1x par an nécessaire
Longévité	moyenne/grande (40 à 60 ans)	moyenne (20 à 40 ans)	moyenne/grande (40 à 60 ans)	grande (60 à 80 ans)	moyenne/grande (30 à 60 ans)
Coût du robinet	faible	faible	moyen	élevé	faible (robinets à papillon à serrage) moyen
Coût du robinet plus installation	moyen élevé (pour les grands DN)	faible	moyen élevé (pour les grands DN)	moyen faible (pour les grands DN)	faible (robinets à papillon à serrage) moyen

4.3.3.6 Conditions d'exploitation

Dans les conduites principales de chauffage à distance et les conduites de transport, des contournements ou des by-pass sont installés. Ils servent à équilibrer la pression, à éviter les coups de bélier et à faciliter l'ouverture des robinets. L'actionnement de la robinetterie doit respecter la norme DIN EN 12266, partie 1 [114]. Il est également indiqué de consulter le fichier de travail W-332 de la DVGW [90].

Actionneurs

Dans le cas de pressions différentielles élevées et de diamètres nominaux importants, il est indispensable d'avoir recours à des broches pour pouvoir atteindre des couples impossibles à obtenir manuellement. La limite pour les robinets-vannes et robinets se situe au niveau de

la plage de diamètre nominal DN 200. Pour les robinets-vannes, cette limite peut être repoussée grâce à l'emploi de roulements à billes. Le couple peut être diminué en installant des engrenages de transmission.

On recommande l'emploi d'actionneurs électriques dans les cas suivants:

- robinets imposants, pour lesquels l'actionnement manuel se révèle trop complexe;
- robinets impossibles à actionner manuellement dans les délais imposés;
- risque pour la vie ou l'intégrité corporelle d'individus;
- présence d'une commande centralisée;
- actionnement automatique via des régulateurs de pression, de température ou de niveau (par impulsion);
- utilisation de procédures d'exploitation spécifiques.

La robinetterie peut également être commandée à distance par des actionneurs hydrauliques, parfois même pneumatiques.

Forces et moments externes

Le sujet de l'absorption des forces et des moments par le corps de robinetterie est traité dans la norme DIN 3840.

La robinetterie ne doit dans la mesure du possible pas être située dans une zone de fortes charges externes et ne doit pas non plus être un point fixe de la conduite. Il peut être bon, afin de soulager la charge qui s'applique aux robinets, de prendre des mesures constructives concernant les conduites. Les forces et moments à prévoir à l'endroit de l'installation doivent faire l'objet d'un calcul statique ou dynamique afin d'obtenir des indications fiables.

Chaque robinet réagit différemment aux forces et moments externes. La répartition des robinets figure dans le Tableau 4.8.

Durées d'obturation et coups de bélier

Toute modification des capacités de débit entraîne des variations de pression dans une conduite en surpression, variations qui se propagent à une rapidité égale à la vitesse du son (coup de bélier). Etant donné que de telles fluctuations de débit sont fréquentes en cours d'exploitation, il est crucial de tenir compte des répercussions des variations de pression. Les cas de charges extrêmes sont déterminants dans le dimensionnement des conduites; ils peuvent se produire en cas d'arrêt d'urgence ou de panne soudaine des pompes.

Par expérience, les durées d'obturation sont de l'ordre de quelques minutes. Chaque conception de robinet présente des durées d'ouverture et de fermeture différentes. Il faut également éviter autant que possible des ouvertures et fermetures trop rapides pour les diamètres nominaux inférieurs à DN 150.

Sécurité de fonctionnement

Pour garantir leur bon fonctionnement, il est recommandé d'actionner les robinets d'arrêt une fois par an.

4.3.3.7 Marquage et documentation

La robinetterie doit impérativement, de façon claire et permanente, porter les marquages suivants:

- pression nominale à laquelle toutes les pièces sont soumises;
- température d'exploitation maximum autorisée;
- sens d'écoulement si nécessaire;
- fabricant, type et numéro de série.

Les entraînements doivent être immatriculés d'une plaque signalétique:

- sens de rotation de l'arbre d'entraînement;
- type de protection;
- couple ou puissance d'entraînement conforme DIN;
- fabricant, type et numéro de série.

Le fabricant est tenu de mettre à la disposition de l'exploitant les documents suivants:

- prescriptions de montage;
- notice d'utilisation;
- prescriptions d'entretien;
- liste des pièces détachées et d'usure;
- preuves des essais de matériaux et des tests produits.

4.4 Structure du réseau

Le terme réseau de chauffage à distance désigne le lien entre le générateur de chaleur et le consommateur de chaleur. Le choix de la structure du réseau, de l'aménagement du tracé, du système de conduites et de la méthode de pose est influencé par de nombreux facteurs. Outre la structure de l'habitat, il existe également d'importants critères de décision techniques, géologiques, économiques et de sécurité, mais également architecturaux et juridiques. La zone d'installation ainsi que la taille d'un réseau de chauffage à distance ne sont donc pas figées d'emblée et peuvent en effet évoluer au fil du temps.

Le réseau de chauffage à distance est généralement divisé en conduites principales, de dérivation et de raccordement domestique (Fig. 4.6). La conduite principale correspond à la première conduite sortant de la centrale thermique. Pour les grands générateurs de chaleur éloignés des zones d'approvisionnement, cette conduite principale est également appelée conduite de transport. Les conduites de dérivation, ou conduites de distribution, bifurquent des conduites principales et sont utilisées dans le cadre de la distribution secondaire, menant vers chacune des zones d'approvisionnement. Les conduites de raccordement domestique servent à raccorder un consommateur de chaleur à une conduite principale ou de dérivation.

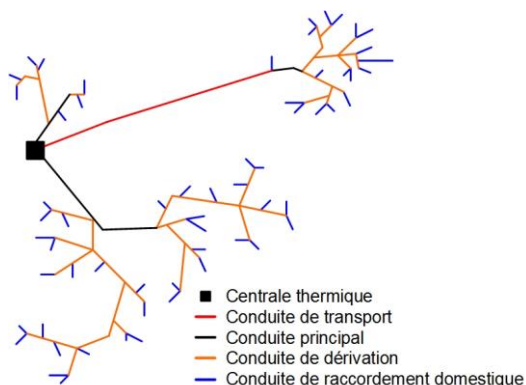


Fig. 4.6 Structure du réseau et types de conduites.

4.4.1 Subdivision selon le nombre de conduites

Les réseaux modernes de chauffage à distance sont presque exclusivement exploités en tant que **systèmes à double conduite** à circuit fermé, avec de l'eau pour fluide caloporteur et dotés chacun d'une conduite d'amenée et d'une conduite de retour (Fig. 4.7). Les systèmes à triple et quadruple conduite [43] restent des exceptions.

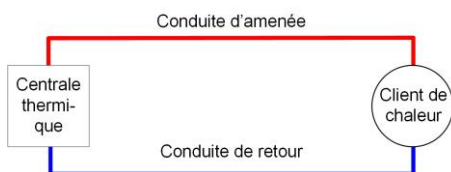


Fig. 4.7 Systèmes à double conduite.

Le **système à triple conduite** (Fig. 4.8) se compose de deux conduites d'amenée et d'une de retour, ou d'une conduite d'amenée et de deux de retour. En cas de système à deux conduites d'amenée, il est par exemple possible de moduler l'installation de chauffage du client selon la température extérieure à l'aide d'une première conduite d'amenée pendant que l'eau chaude est mise à sa disposition à température constante par la seconde conduite d'amenée. Avec un système à deux conduites de retour, il est par exemple possible de regrouper les basses températures de retour dans une ligne de retour en utilisant une installation à condensation.

Les systèmes à triple conduite offrent de meilleures possibilités de régulation en fonction de la consommation et des rejets de chaleur réduits grâce à l'amenée modulable. La troisième conduite augmente cependant le coût de la pose. En outre, en raison du soutirage discontinu depuis la deuxième conduite d'amenée, le débit massique peut fluctuer dans la conduite de retour, à tel point que le point de fonctionnement de l'installation change et que les installations des clients ne sont pas alimentées par le même débit massique. Autre inconvénient : à la mi-saison, la température de retour commune peut être supérieure à la température d'amenée modulable, ce qui peut provoquer un réchauffement involontaire des pièces chez les clients ainsi qu'une hausse de la consommation d'énergie.

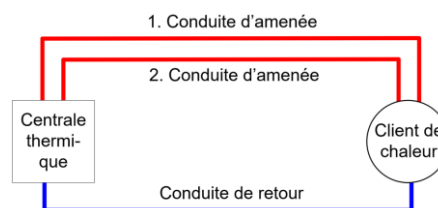


Fig. 4.8 Systèmes à triple conduite.

Les systèmes à triple conduite sont également utilisés dans le cadre de la production d'énergie solaire thermique décentralisée, accompagnés d'un réservoir saisonnier. Le système à double conduite est ainsi élargi d'une conduite supplémentaire, qui sert d'amenée solaire au réservoir central. Les capteurs solaires décentralisés sont alimentés par la conduite de retour du chauffage à distance ([6], [43], [56]).

Le **système à quadruple conduite** (Fig. 4.9) se compose de deux systèmes à double conduite distincts. Par exemple, l'un peut être alimenté par une température d'amenée constante, et l'autre par une température d'amenée modulable. La régulation dépendant de la consommation peut ainsi être améliorée et les rejets de chaleur réduits. Les systèmes à quadruple conduite étant coûteux, ils ne sont mis en place que si les deux réseaux présentent des pressions, températures ou fluides caloporteurs différents.

Le système d'alimentation en énergie solaire thermique décentralisée et le réservoir saisonnier central utilisent également un système à quadruple conduite, dans lequel un système à double conduite sert à la distribution du

chauffage à distance et un autre à l'amenée et au retour du système solaire ([6], [43], [56]).

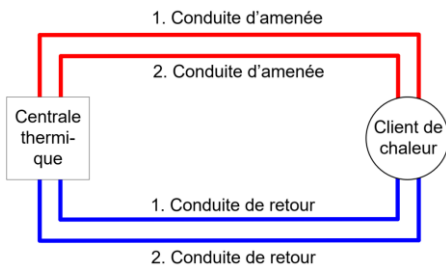


Fig. 4.9 Systèmes à quadruple conduite.

4.4.2 Distribution principale

On distingue deux types de base pour le réseau principal, à savoir le réseau en étoile et le réseau maillé [43].

En règle générale, les réseaux de chauffage à distance sont tout d'abord conçus comme des **réseaux en étoile** (Fig. 4.10). L'amenée et le retour sont d'ordinaire dimensionnés de la même manière (symétriquement). Le diamètre des conduites est le plus large au niveau du générateur de chaleur et réduit en s'en éloignant. La hauteur de refoulement de la pompe est conçue de manière que la pression différentielle du réseau convenue soit aussi disponible à l'extrémité du réseau, chez le dernier client. Il résulte des longueurs de tracé réduites et du faible diamètre une réduction des coûts de construction ainsi que des rejets de chaleur. L'inconvénient réside dans le fait que tout élargissement ultérieur du réseau pose problème sur le plan hydraulique et que la sécurité de l'approvisionnement n'est plus garantie à 100%, car l'ensemble de la ligne doit être coupée en cas d'incident sur le réseau.

Le **réseau linéaire** (Fig. 4.11) est un type particulier de réseau en étoile; il ne se compose que d'une ligne principale avec de courtes conduites de raccordement domestique ([6], [43], [56]).

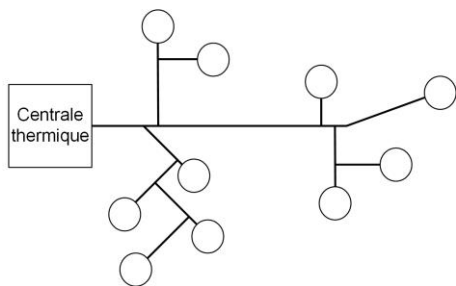


Fig. 4.10 Réseau en étoile avec centrale thermique.

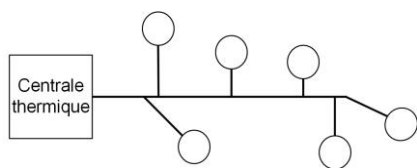


Fig. 4.11 Réseau linéaire avec centrale thermique.

La croissance et la densification d'un réseau, ainsi que le regroupement de plusieurs réseaux de chaleur à distance,

peuvent créer des **réseaux maillés** (Fig. 4.12). Ceux-ci se caractérisent par une grande sécurité d'approvisionnement due à la multiplication des voies d'acheminement. Dans les grandes zones d'approvisionnement urbaines, ils résultent souvent d'un élargissement et d'un renforcement constants du réseau de chauffage à distance. Les réseaux maillés sont souvent équipés de plusieurs centrales thermiques et sont exploités en parallèle. Les réseaux maillés purs restent cependant rares, car des réseaux en étoile sont souvent raccordés en périphérie.

Le **réseau en boucle** (Fig. 4.13) est un type particulier de réseau maillé; il s'agit en effet d'un système d'approvisionnement formant une boucle (maillage) avec les conduites de raccordement domestique concernées ([6], [43], [56]).

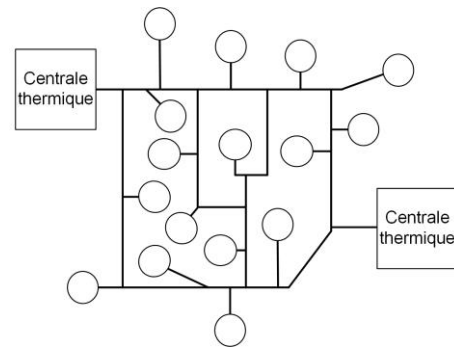


Fig. 4.12 Réseau maillé avec deux centrales thermiques.

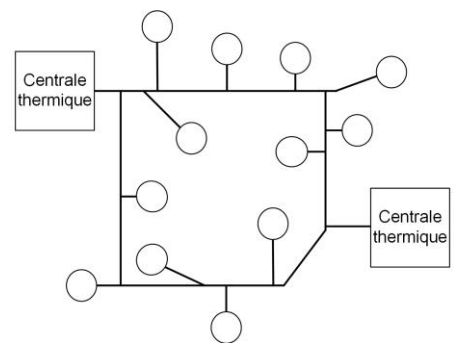


Fig. 4.13 Réseau en boucle avec deux centrales thermiques.

4.4.3 Sous-distribution et raccordements domestiques

Dans le cadre d'un **aménagement du tracé standard**, comme le montre la Fig. 4.14, tous les consommateurs sont raccordés de manière séparée à la conduite principale ou à la conduite de dérivation. Souvent utilisé, cet aménagement du tracé dans les voies publiques offre une flexibilité maximum et permet le raccordement d'autres clients. Toutefois, en cas de densités de raccordement moindres ou de conduites de raccordement domestique longues, les conduites peuvent se révéler plus longues que pour d'autres types d'aménagement du tracé. Pour cette raison, et du fait des dérivations et des pièces usinées nécessaires en cas d'urbanisation dense, les coûts d'investissement peuvent être élevés.

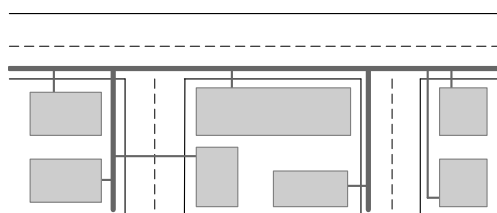


Fig. 4.14 Aménagement du tracé standard

Dans un **aménagement du tracé de maison à maison**, les maisons sont regroupées et seule une maison est raccordée à la conduite principale ou de dérivation. Les autres maisons sont raccordées à celle-ci de manière que seul un faible nombre de dérives de la conduite principale ou de dérivation soit nécessaire. Etant donné que les conduites traversent des propriétés privées et des bâtiments, les propriétaires doivent accorder des droits de conduite.

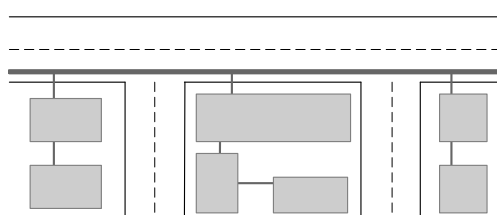


Fig. 4.15 Aménagement du tracé de maison à maison.

En cas de construction de maisons mitoyennes, l'aménagement du tracé de maison à maison se transforme alors en **pose en sous-sol**. La pose en sous-sol fait partie des méthodes de pose les plus abordables financièrement. Dans le cadre d'une pose en sous-sol simple, aucun travail de génie civil n'est nécessaire, et aucune conduite spéciale de chauffage à distance ne demande à être posée. Les fuites éventuelles peuvent être découvertes très rapidement et localisées précisément. La pose en sous-sol ne peut toutefois se faire que si les maisons ou les garages souterrains sont adjacents et que le raccordement entre les sous-stations peut être court. Si ce n'est pas le cas, une forme mixte alliant pose de maison à maison et pose en sous-sol est également possible. Inconvénients: une coordination plus complexe de chacune des étapes de construction et des droits de conduite à obtenir par les propriétaires.

Une autre technique, plus rarement employée, est celle de l'**aménagement du tracé monoboucle**, qui ne se base sur aucune structure de réseau (ni en étoile ni maillé) mais qui relie tous les bâtiments par un aménagement du tracé de maison à maison. Cette technique permet d'éviter en grande partie les raccords de canalisations posés en pleine terre et les dérivateurs. L'élargissement ultérieur du réseau est cependant quasiment impossible s'il n'a pas été prévu. Cette méthode monoboucle n'est donc avantageuse que dans le cas de petits

réseaux de chauffage à distance équipés de systèmes de canalisations flexibles.

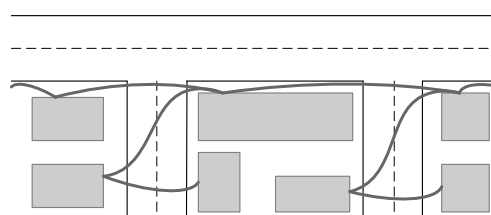


Fig. 4.16 Aménagement du tracé monoboucle

Une solution économique est souvent celle de l'association d'un aménagement du tracé standard et d'un aménagement de maison à maison, qui combine les avantages des deux systèmes.

4.4.4 Développement de la structure du réseau

La zone d'approvisionnement et la puissance de raccordement des réseaux de chauffage à distance résultent souvent d'un processus de développement pouvant durer des années, voire des décennies. La Fig. 4.17 présente les stades classiques du développement d'un réseau de chauffage à distance. Les chiffres se rapportent aux étapes caractéristiques et illustrent les situations qui suivent.

- 1) On construit souvent en premier lieu un seul réseau de chauffage à distance présentant une structure arborescente (cf. réseau en étoile). Dans de nombreux cas, de petits réseaux se forment également dans d'autres parties de la ville, et alimentent en chaleur un certain groupe de bâtiments, zones ou territoires similaires.
- 2) Un ou plusieurs petits réseaux de chauffage à distance sont raccordés à un réseau central. Une centrale thermique peut ainsi être intégrée comme unité de charge de base, de même que des centrales thermiques externes comme unités de charge de pointe.
- 3) Certaines paires de conduites d'amenée et de retour sont reliées entre elles. Il s'agit typiquement des lignes principales les plus importantes, qui forment ensuite un circuit. Ce réseau en boucle permet alors de raccorder de plus en plus de consommateurs.
- 4) Le raccordement d'autres extrémités des différentes ramifications de la structure principale et de la structure fine du réseau entraîne la constitution d'une structure maillée. Les conduites principales suivent généralement la structure de la voirie, tandis que cela n'est pas impératif pour les conduites de dérivation ou de raccordement domestique.

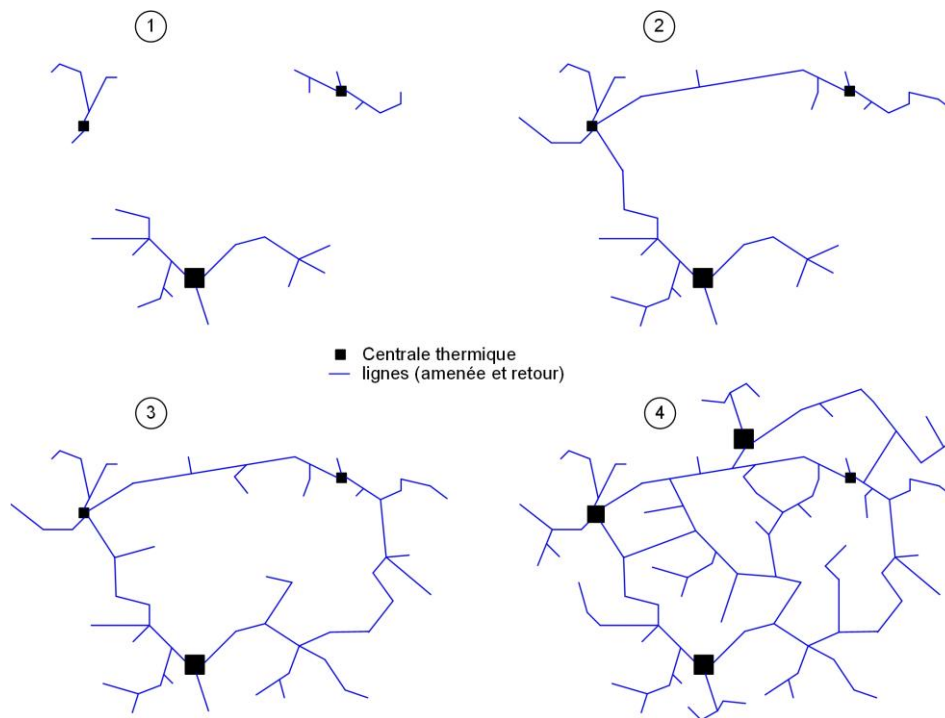


Fig. 4.17 Quatre structures de réseau différentes représentant le processus de développement des réseaux de chauffage à distance. 1) réseau en étoile 2) premier raccordement 3) réseau en boucle 4) réseau maillé.

4.4.5 Purge et vidange

Pour les réseaux de chauffage à distance de grande ampleur et très étendus, il doit être possible de vidanger la conduite par tronçons lors du montage ultérieur de dérivateurs et de raccordements domestiques ou lors de réparations. Le réseau de chauffage à distance doit être subdivisé grâce à des robinets d'arrêt de manière que chaque tronçon puisse être rapidement vidangé et que seule une quantité réduite d'eau traitée soit nécessaire au remplissage des conduites.

Les éléments utilisés pour la vidange sont des vannes ou des robinets. Les modèles exposés au chapitre 4.3.3 concernent également ces dispositifs. Il est recommandé de munir les dispositifs de vidange de raccords de tuyaux normalisés. Les emplacements de vidange doivent être conçus comme des bassins de décantation.

Si les conduites de chauffage à distance sont vidangées dans des canalisations d'eaux usées, la température d'arrivée de 35°C généralement admissible ne doit pas être dépassée. On l'obtient en ajoutant de l'eau froide. Lors de l'exploitation, les dispositifs de vidange doivent être sécurisés à l'aide de brides pleines, de bouchons ou de caches.

Pour remplir et vidanger les conduites de chauffage à distance, l'air doit pouvoir s'échapper et affluer. Pour ce faire, des dispositifs d'aération doivent être mis en place au niveau des points les plus hauts de la conduite et entre deux robinets d'arrêt. Si des conduites de dérivation posées à plat ne présentent aucune pente importante,

l'air peut également être amené vers la conduite de raccordement domestique et y être évacué.

4.4.6 Dispositifs de mesure

Les rapports de pression dans le réseau de chauffage à distance doivent pouvoir être contrôlés. Des vannes d'arrêt et des vannes d'arrêt manométriques avec valve de contrôle pour manomètres répondant à la norme DIN 16271 [110] doivent donc être placées à des endroits clés, tout en restant facilement accessibles. Les conduites de vidange et d'aération peuvent elles aussi servir à mettre en place des points de mesure de pression.

Il est en outre recommandé d'installer des manchons de mesure de température répondant à la norme DIN 43772 [111] à des endroits appropriés. Il peut être indiqué, dans le cadre de la télétransmission des données mesurées, de poser les câbles correspondants lors de la construction du réseau.

4.5 Méthodes de pose

4.5.1 Pose de surface

Une pose de surface est économique et intéressante d'un point de vue fonctionnel, mais son utilisation est néanmoins limitée du fait des exigences en matière d'architecture et d'aménagement de paysage, par exemple pour les applications relatives au franchissement des ponts. De plus, il convient de tenir compte des conditions météorologiques (rayonnement ultraviolet, gel, corrosion) ou même du vandalisme lors de la mise en place, et de prendre les mesures qui s'imposent.

La pose à privilégier est celle sur pieds, ou suspendue à des poteaux pendulaires. Les supports de tuyauterie sont fortement sollicités par la masse du fluide et les forces engendrées par la dilatation thermique. La libre dilatation doit être absorbée ou, le cas échéant, compensée. La pose sur pieds et sur ponts pour canalisations se limite aux sites industriels et aux zones ne nécessitant pas d'aménagement spécifique.



Fig. 4.18 Conduites de chauffage à distance de surface à Iéna (Stadtwerke Energie Jena-Pössa).

4.5.2 Pose en pleine terre dans un caniveau

La pose dans un caniveau impraticable est une construction robuste à longue durée de vie. Les inconvénients de cette méthode sont les coûts de construction élevés et l'importante surface nécessaire aux mesures de génie civil, ce qui explique pourquoi les tracés posés dans un caniveau ne sont que rarement utilisés, raison pour laquelle ils ne seront pas détaillés dans les points qui viennent.

4.5.3 Pose en pleine terre dans un fossé

La mise en place dans un fossé de conduites munies de gaines de protection est devenue la méthode de pose la plus employée, du fait de ses avantages en matière de coûts et de rapidité d'exécution. En voici les avantages :

- investissement moindre dans les prestations de génie civil par rapport aux autres types de poses en pleine terre;
- travaux de puits coûteux en majorité éliminés, à l'exception de la robinetterie qui n'est pas directement intégrée au système de gaine de protection;
- utilisation possible sur des sols en mauvais état, par exemple sur une zone comportant une nappe phréatique;
- durée d'installation réduite grâce à une préfabrication optimale des composants;
- grande flexibilité en matière d'aménagement du tracé grâce aux pièces usinées préfabriquées.

Une attention particulière doit être portée à la fabrication et à l'isolation thermique des raccords dans des conditions de chantier, et c'est pourquoi ces travaux sont proposés comme des prestations de services par les principaux fournisseurs de systèmes ou par des entreprises spécialisées.



Fig. 4.19 Conduites de chauffage à distance installées dans le fossé [51].

4.5.4 Pose sans tranchée

La traversée souterraine d'objets (routes, voies ferrées, cours d'eau) est réalisée grâce à des techniques de creusement telles que le forage au jet, le pousse-tube, le siphon et le percement de tunnel. Dans le cadre de techniques de pose sans tranchée, on distingue processus de compactage du sol et processus de soutirage du sol. Ceux-ci se divisent en techniques dirigées et techniques non dirigées. En ce qui concerne les techniques non dirigées, l'orientation du forage doit être suffisamment précise dès le début. Les conduites acheminant les fluides sont généralement insérées au moyen d'un tube de protection.

Pour le pousse-tube, des outils spéciaux ultra productifs sont nécessaires.

4.5.4.1 Processus de compactage du sol

A l'aide d'une fusée pneumatique enfoncée dans le sol, on creuse une cavité dans laquelle la conduite est ensuite glissée. Cette technique est appliquée jusqu'à un DN 200. La force est exercée soit par le biais d'une fusée pneumatique dans le sol, soit à l'aide d'un forage horizontal dans le puits de départ.

4.5.4.2 Processus de soutirage du sol

La terre est retirée à l'aide d'une tête de forage rotative ou d'un tube ouvert enfoncé à l'horizontale, puis transportée de manière mécanique, hydraulique ou pneumatique dans le puits de départ (technique du forage dirigé, Fig. 4.20). Des tubes en plastique ou en acier peuvent être insérés à travers les tubes ainsi formés.

Avec la technique du pousse-tube, des tubes allant jusqu'à 4 m de diamètre et 150 m de longueur sont

pressés du puits de départ jusqu'au puits de sortie à l'aide d'une presse hydraulique. Aux points de départ et de sortie, il est nécessaire de prévoir des puits destinés à recevoir les appareils de forage ainsi qu'à apporter et installer les tubes.

Le perçage est également possible à longue distance, à l'aide d'une tête de forage dirigée ou en employant la technique du forage dirigé, dans des sédiments meubles ou semi-solides d'une granulométrie maximum de 63 mm. Les résidus sont rincés par l'eau sortant des têtes de forage ou par une suspension argileuse (bentonite). Lorsque la tête de forage ressort, la conduite est introduite dans le canal de perçage compacté. Pour les sols rocheux, il est conseillé de créer d'un microtunnel en béton à l'aide d'une machine à creuser commandée à distance. Le microtunnel est ensuite rempli d'eau, le tube pouvant être utilisé en tant que corps flottant.



Fig. 4.20 Utilisation d'une machine de forage dirigé.

Avec cette technique, les conduites peuvent être posées avec une grande précision sous les routes, les remblais de voies ferrées, les fleuves ou les bâtiments. Si possible, on utilise de grands rayons pour les changements de direction. Pour la réhabilitation des conduites existantes, il est d'usage d'employer des techniques d'éclatement de conduites, dans le cadre desquelles les anciennes conduites sont détruites et compactées dans la terre avant d'être remplacées par de nouvelles.

4.5.4.3 Siphon

Les siphons sont des ouvrages de franchissement de route, de tunnel, de fleuve ou de voie ferrée (par une conduite). Ils sont d'ailleurs surtout utilisés pour croiser des cours d'eau. Les siphons sont relativement simples pour de petits cours d'eau étroits. L'élasticité de la conduite suffit souvent à diriger cette dernière à travers les eaux, nécessitant toutefois un ancrage et un recouvrement. Lorsque cela n'est pas possible, une tranchée destinée à accueillir les canalisations (un conduit de siphon) est créée dans le sol du cours d'eau. La conduite prémontée est installée dans le conduit de siphon à l'aide de grues mobiles tout en respectant les mesures prises en matière de protection de l'isolation thermique et de protection contre la poussée ascensionnelle.



Fig. 4.21 Siphon préfabriqué amené dans le conduit de siphon puis poussé dans le lit de la rivière sur des rouleaux [51].

Les grands siphons destinés aux cours d'eau sont préfabriqués au sol. Les mêmes prescriptions s'appliquent alors aux coudes, soudures, protections anticorrosion et contrôles de pression qu'avec les conduites posées en pleine terre. Il existe plusieurs méthodes de pose du siphon préfabriqué dans le conduit de siphon, les voici :

- technique d'injection: le siphon est injecté par vibration dans le sol du cours d'eau (pour des tubes flexibles de petits diamètres);
- technique d'abaissement: le siphon préfabriqué est abaissé dans le conduit de siphon à l'aide de grues, sur bateau ou sur la terre ferme;
- technique d'introduction: le siphon est prémonté au sol sur des glissières situées sur un convoyeur à patins, dans le prolongement du siphon. Le siphon est ensuite tiré, depuis la rive opposée, dans le conduit de siphon prévu à cet effet (Fig. 4.21).

Les siphons sont enveloppés de béton ou de fibre-ciment pour les protéger des dommages mécaniques. Cette gaine sert également de protection contre la poussée ascensionnelle. La pose dans un conduit de siphon ouvert laisse de plus en plus sa place au procédé de forage horizontal dirigé (Directionally Controlled Horizontal Drilling). Cette méthode est certes rentable mais exige une bonne préparation et une installation précise.

4.6 Situations fréquentes d'installation

Les mises en œuvre suivantes présentent des situations fréquentes d'installation de systèmes de tuyauteries, avec leurs avantages et inconvénients. Il convient de noter que certains systèmes de tuyauteries ne peuvent convenir à toutes les conditions de pression et de températures ainsi qu'à tous les diamètres.

4.6.1 Surfaces avec revêtement

Le tracé des réseaux de chauffages à distance en milieu urbain est préférable sur voie publique. Les sociétés d'exploitation de chauffage à distance acquièrent un droit de pose (droit de passage) sur la voie publique ou concluent des contrats de concession avec les municipalités [6].

En général, les conduites principales sont mises en œuvre dans des portions routières isolées de la circulation (espaces verts, trottoirs), facilement accessibles en cas de dysfonctionnement. Les traversées de voirie sont à limiter au maximum. Pour la pose sous voirie ou sous surface non goudronnée, les tuyauteries pré-isolées se sont largement imposées. Les techniques de pose dans des caniveaux bétonnés ne sont aujourd'hui utilisées que dans certains cas particuliers. Les tuyauteries pré-isolées sont un argument en faveur de normalisation, de solidité du système d'installation, de faible largeur de pose, et de faibles coûts d'installation [6].

Dans le cas où aucun réseau existant ou autre obstacle n'est à franchir, la détermination du tracé ne pose généralement pas de problèmes. Pour les tuyauteries pré-isolées, il est également possible de souder les conduites sur de longues sections et de les mettre en œuvre suivant une méthode de pose dite de pipeline [43]. D'autre part, les systèmes de conduites flexibles ont l'avantage de pouvoir être installées à partir de bobine et d'auto-compenser la dilatation [43]. Dans le cas de croisement de conduites existantes, une mise en œuvre avec des systèmes de conduites rigides peut être fastidieuse et peut faire appel à l'emploi de raccords supplémentaires pour les tuyauteries pré-isolées, par ex. un coude à 90° [43].

4.6.2 Surfaces sans revêtement

Pour les conduites sous des surfaces sans revêtement (par exemple: terres cultivées), le tracé peut être largement optimisé selon le système de tuyauterie choisi et être réalisé à moindre coût.

4.6.3 Installation en bordure de terrain prédéfini

Il est souvent possible de mettre en œuvre des réseaux de chauffage à distances et d'autres conduites d'alimentation le long d'une route, d'une voie de chemin de fer ou d'un cours d'eau, ce qui est déjà en partie pris en compte dans le plan de zonage. Cette utilisation nécessite l'accord du propriétaire concerné [6].

Dans le cas de franchissement de cours d'eau, d'autoroutes ou de voies ferrées, les conduites peuvent être mises en œuvre dans un fourreau ou dans un ouvrage spécifique, par exemple sous un pont ferroviaire. Cependant, le recours à des ouvrages spécifiques comporte le risque de devoir apporter des efforts considérables d'ajustement en cas de modifications. Pour les traversées de voirie, des techniques de pose sans tranchée peuvent s'avérer efficaces [6].

4.6.4 Terrain privé

Pour chaque conduites mise en œuvre sur une propriété privée, la disposition de la parcelle doit être officialisée. Cela peut être un enregistrement de servitude ou un accord entre l'opérateur du réseau et le propriétaire (droit de passage) [6].

4.6.5 Consommateurs raccordés ultérieurement

Lors de la mise en œuvre d'un réseau de chauffage à distance, si de nouvelles constructions sont prévues dans l'avenir ou que des consommateurs potentiels souhaitent se raccorder au réseau ultérieurement, il est préférable d'installer au préalable un départ de branchement. Les conduites de raccordement peuvent être par exemple acheminées jusque dans un jardin et être équipées d'un vanne-embout à boisseau ou d'un embout acier avec possibilité d'un perçage en charge [43].

Dans le cas d'une conduite acier pré-isolée, un branchement ultérieur peut également être réalisé en effectuant un perçage en charge de la conduite de distribution sous pression. Dans le cas d'une conduite PE pré-isolée, un raccord en T peut être mise en place ultérieurement par congélation de tuyauterie et sertissage ou par une mise hors service partielle de la conduite.

4.6.6 Prise en compte d'autres réseaux de distribution

Les explications de mise en œuvre du paragraphe 4.6.6 se basent sur les travaux "Bau von Fernwärmenetzen" publiés par l'AGFW [5] et décrivent la prise en compte des autres réseaux de distribution. Une distance minimale entre réseaux existants (gaz, eau, électricité doit être maintenue. Outre ces directives en vigueur, les réglementations locales doivent être respectées. Les recommandations essentielles sont énumérées ci-dessous.

4.6.6.1 Câbles d'alimentation électrique et de télécommunication

La puissance de transmission des câbles d'alimentation haute tension dans le sol diminue avec une hausse de la température du sol [5]. Les distances minimales recommandées entre les tuyaux de chauffage à distance et les câbles d'alimentation électrique et de télécommunication sont listées dans le Tableau 4.9.

En cas de pose parallèle de câbles haute-tension et de conduites de chauffage à distance, il convient de prévoir un espace suffisant entre réseaux pour d'éventuels

travaux de câblage. Une attention particulière doit être accordée aux regards de visite dépassant le profil normal de la conduite de chauffage à distance [5].

Les lignes électriques à courant continu ou systèmes similaires peuvent, en raison de leurs courants de fuite, présenter un risque de corrosion pour les conduites de chauffage à distance enterrées [5].

Tableau 4.9 Distance minimum entre les conduites de chauffage à distance et les câbles électriques et de télécommunications en cas de croisement et de guidage parallèle [5].

Croisement et guidage parallèle jusqu'à 5 m de longueur	Distance minimum [cm]
Câble de signal 1 kV ou câble de mesure	30
Câble 10 kV ou câble 30 kV	60
Plusieurs câbles 30 kV ou câble de plus de 60 kV	100
Guidage parallèle de plus de 5 m de longueur	Distance minimum [cm]
Câble de signal 1 kV ou câble de mesure	30
Câble 10 kV ou câble 30 kV	70
Plusieurs câbles 30 kV ou câble de plus de 60 kV	150

4.6.6.2 Conduites de gaz et d'eau potable

En cas de pose parallèle de conduites de chauffage à distance et de conduites de gaz ou d'eau potable, une distance minimale de 40 cm est requise entre celles-ci. Dans le cas des conduites de gaz, il convient néanmoins de garder le plus grand intervalle possible, dans la mesure où des dangers considérables peuvent survenir en cas de conduites gaz défectueuses. Les conduites de gaz ne doivent en aucun cas traverser des caniveaux béton ou des regards de visites équipés de conduites de chauffages sans protection. Dans le cas de croisement avec d'autres réseaux, un intervalle minimal, de préférence comprise entre 20 et 30 cm, doit également être maintenu (Tableau 4.10).

Si l'acheminement de conduites à travers des caniveaux en béton est inévitable, il convient d'utiliser des fourreaux de protection ou d'autres mesures constructives [5].

Tableau 4.10 Distance minimum entre les conduites de chauffage à distance et les conduites de gaz et d'eau en cas de croisement et de guidage parallèle [5].

Croisement	Distance minimum [cm]
Conduite de gaz	la plus grande possible, mais toujours ≥ 30
Conduite d'eau	20 à 30
Guidage parallèle	Distance minimum [cm]
Conduite de gaz	la plus grande possible, mais toujours ≥ 40
Conduite d'eau	≥ 40

4.6.6.3 Conduites d'eaux usées et d'eaux pluviales

Les canalisations d'eaux usées se situent généralement à une profondeur plus importante que celle des conduites de chauffage à distance. Néanmoins, ces dernières ne devraient pas être mise en œuvre parallèlement et directement au-dessus des canalisations d'égouts, afin de ne pas être endommagées lors d'éventuelles réparations et ou de ne pas constituer un obstacle pour d'éventuels travaux ultérieurs.

Le tracé au-dessus d'une canalisation d'égout ne peut être envisagé uniquement si celle-ci, en cas de dommages, peut être réparée de l'intérieur et qu'une excavation par le haut n'est plus nécessaire [5].

Pour la mise en œuvre d'une conduite superposée au-dessus d'une autre, les caractéristiques statiques de l'ensemble sont à prendre en compte [5].

Lors de la planification d'un réseau de chauffage à distance, il convient de prendre en compte la présence d'ouvrages souterrains environnants, telles que les regards d'accès, les chambres de visite et les bassins de rétention.

Il est donc nécessaire d'ouvrir toutes les plaques d'égout pour déterminer la configuration de ces ouvrages souterrains. Les conduites principales d'eaux usées peuvent souvent caractériser un obstacle. Lors de la phase d'étude, il est préférable de ne pas envisager le réseau de chauffage à distance à proximité de ces canalisations, les coûts de déviation de celles-ci s'avérant être élevés [5].

4.7 Génie civil

Les travaux de génie civil liés à la mise en place de conduites de chauffage à distance concernent les fossés, pour la pose de conduites en pleine terre, ainsi que la remise en état ultérieure de la surface. S'ajoutent à cela des caniveaux pour la technique de pose de conduites correspondante, les travaux de puits pour les purges, vidanges, travaux de traction de câble, subdivisions en sections, stations de pompage, séparations de réseau et stations de transfert de chaleur ainsi que les creusements sans tranchée ou les percements de tunnels lors du franchissement d'objets. Le présent chapitre offre un aperçu des techniques de génie civil, des normes, directives et ouvrages complémentaires portant sur le génie civil. Il décrit les processus et exigences en matière de conception conforme des installations de chauffage à distance. L'accent est mis sur les méthodes de pose en pleine terre directe couramment utilisées de nos jours. Les procédés spéciaux, tels que la pose dans un caniveau ou un puits en béton coulé en place ne sont pas traités, ou alors de façon marginale. Les connaissances complètes du planificateur sont nécessaires à la planification et l'exécution de travaux de génie civil, en particulier dans les zones à forte densité de population.

4.7.1 Généralités

Aucun réseau de chauffage à distance ne peut être construit sans travaux de génie civil. Bien au contraire, les conditions limites posées par le génie civil ont un impact crucial sur le tracé des conduites et sur la profondeur des conduites. Ainsi, la voie publique est souvent déjà accaparée par des conduites de service industrielles et le chauffage à distance doit s'accommoder de l'espace disponible restant. Ailleurs, les bâtiments ne peuvent pas être exploités directement car les rues très fréquentées ou les espaces récemment rénovés ne le permettent pas. Le planificateur doit connaître ces conditions limites et en tenir compte.

La majeure partie des coûts d'investissement et d'exploitation d'un réseau de chaleur à distance, généralement environ 60%, est dédiée au réseau de conduites [15], dont de nouveau 60% des coûts pour la mise en place de conduites (génie civil et conduites). Sur ces coûts de mise en place de conduites, environ 60% sont encore utilisés pour les travaux de génie civil. Une planification minutieuse du tracé des conduites participe à l'amélioration de la rentabilité d'un projet. Il faut en effet par exemple éviter un tracé le long des routes principales.

Une des bases essentielles de la planification du tracé, réalisée au plus tard en même temps que le projet de construction, est l'inventaire de l'ensemble des conduites de service industrielles existantes. La plupart des services techniques des villes possèdent en outre leurs propres prescriptions techniques, dont il faut tenir compte lors de la planification. Enfin, l'évaluation de la statique des conduites a également son importance pour le tracé. En cas de systèmes de conduites rigides, en particulier pour des dimensions inférieures à DN 80, la fabrication de profils longitudinaux est recommandée dans les zones bâties.

Il est de plus conseillé de prendre en compte le plus tôt possible la logistique du chantier et la gestion du trafic lors de la phase de construction (éventuellement en se basant sur les plans de phases de travaux) ainsi que de chercher à contacter les autorités compétentes des communes, des cantons ou de la Confédération.

Afin de garantir une longue durée de vie des conduites de chauffage à distance posées en pleine terre, un standard d'exécution élevé est nécessaire.

4.7.2 Planification du tracé

4.7.2.1 Systèmes de conduites rigides

Lors de la planification du tracé, il convient en principe de veiller à ce que les conduites soient les plus courtes possible jusqu'aux clients. Il faut éviter que le tracé présente de longues conduites de raccordement domestique. Une fois la situation horizontale déterminée, il faut définir la profondeur. Il faut tenir compte du fait qu'outre la conduite principale, les raccordements domestiques doivent également être établis, et ceux-ci doivent idéalement bifurquer vers le haut. Les rues étant déjà souvent très accaparées par des conduites de service industrielles, une pose à la même profondeur que

les conduites d'eau existantes semble la solution la plus simple à mettre en place (voir aussi chapitre 0).

En cas de changements de direction, il convient d'accorder une attention toute particulière à la statique des conduites (chapitre 7.5). Les changements de direction et les coudes de dilatation sont essentiellement utilisés dans les cas suivants:

- ruptures de pente;
- obstacles;
- changements de direction;
- enfoncements.

Les Fig. 4.22 à Fig. 4.25 représentent les planifications recommandées pour ces changements de direction.

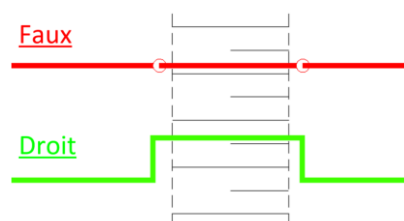


Fig. 4.22 Rupture de pente

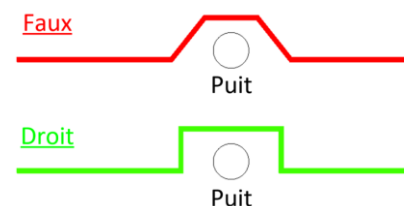


Fig. 4.23 Obstacle

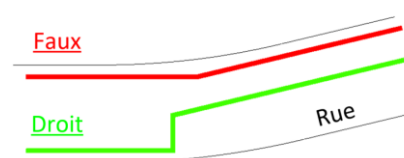


Fig. 4.24 Changement de direction (raccord coudé ou, éventuellement, cintrage élastique)

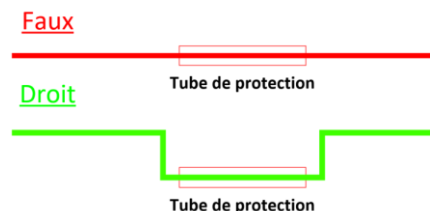


Fig. 4.25 Enfoncement

Afin d'optimiser le tracé des conduites en cas de changement de direction, il est également possible de cintrer les tubes composites droits par déformation à froid, et d'utiliser les raccords coudés (Fig. 4.24). Lors du cintrage, il convient de veiller à ce qu'aucune tension ni aucune déformation (ovalisation) non admissible n'aient lieu dans le tube médian en acier, dans l'isolant, dans la

gaine de protection ni au niveau des câbles du système de surveillance des fuites. Les raccords soudés peuvent être fabriqués d'usine ou sur le chantier, à l'aide d'outils de cintrage appropriés. Ce faisant, la gaine de protection doit être protégée de tout dommage. Les rayons de cintrage minimum pour les raccords soudés sur le chantier sont indiqués dans la fiche technique FW401 partie 9 de l'AGFW. La partie 10 comprend d'autres indications relatives à la statique.

L'ensemble des points hauts doivent impérativement pouvoir être purgés et doivent pouvoir être bloqués au moyen de robinets d'arrêt sur l'ensemble des lignes. Les conduites de chauffage à distance supérieures à DN 100 doivent en outre pouvoir être vidangées. On utilise des puits en béton coulé en place ou en produits préfabriqués. Les travaux de puits sont réalisés même en présence de robinets d'arrêt et de chambres de tirage pour les systèmes de conduites et de surveillance des fuites. De nombreux fournisseurs de chaleur disposent déjà des prescriptions portant sur la disposition de ces puits. Alternative nettement moins coûteuse: l'injection d'air comprimé dans la conduite à travers les robinets destinés à la vidange et la purge (par exemple).

Etant donné que les tubes pré-isolés en métal sont souvent des systèmes rigides et généralement de gros diamètres, que les tracés incluant des pentes doivent être équipés, que la statique complique la manière d'éviter des obstacles (p. ex. bloc de tubes électriques), etc., la création d'un profil longitudinal est plus adaptée. Voici quelques arguments en faveur d'un profil longitudinal:

- plus grande sécurité de planification;
- détection de l'emplacement des purges et vidanges;
- base pour les appels d'offres en matière de génie civil (le Catalogue des articles normalisés CAN [78] distingue différentes profondeurs de tranchée);
- détection des profondeurs critiques (recouvrement trop important ou trop faible);
- détection des points de conflit avec les conduites de service industrielles existantes;
- profondeur de pose à connaître pour pouvoir effectuer une vérification statique;
- corrélation entre la hauteur du terrain et celle du sous-sol établie pour les raccordements domestiques.

L'aménagement des fossés dépend des dimensions des tubes, des profondeurs de tranchée et du terrain (rue ou espace vert). Il est indispensable que la largeur libre des fossés soit plus grande pour permettre le montage dans les zones de dilatation. On distingue les tranchées blindées (étayées) et les tranchées talutées.

Les tranchées blindées sont en principe surtout employées pour la voie publique, et les tranchées talutées au contraire dans les espaces verts. Le type de fossé doit être également choisi en vertu de l'Ordonnance sur les travaux de construction de la Confédération (OTConstr) [77] et conformément à la norme DIN 4124 [109].

4.7.2.2 Systèmes de conduites flexibles

La planification du tracé pour les conduites flexibles est nettement plus simple que pour les conduites rigides. A l'exception de la zone de frontière entre les tubes flexibles et rigides, aucune condition limite du tracé relative à la statique des conduites n'est en règle générale à prendre en compte. En cas d'utilisation de tubes médians en PEX, la statique des conduites n'a aucune importance.

L'utilisation de systèmes de conduites flexibles a eu tendance à se généraliser jusqu'à DN 100. Le principal domaine d'utilisation concerne cependant les tubes de dimensions plus réduites, pour la distribution fine et pour le raccordement domestique. Les tubes de dimensions plus importantes sont par exemple employés pour surmonter les pentes particulièrement raides ou franchir un ruisseau.

Lors de la planification, il est très important que les angles de pose soient suffisamment grands. Les angles minimum indiqués par les fabricants sont trop aigus, notamment pour les grandes dimensions, et doivent être atténués, comme l'illustre l'exemple ci-dessous (Fig. 4.26).



Fig. 4.26 Angles de pose d'un système de conduites flexibles.

Un avantage conséquent des conduites flexibles est leur construction bien plus rapide, étant donné que le fossé peut être plus étroit et surtout non étayé. Les travaux de pose des tubes durent normalement une journée, suivie d'un jour supplémentaire pour la pose des manchons.

4.7.2.3 Procédures d'autorisation

Un autre élément de la planification du tracé concerne l'autorisation. Sur le plan économique, il peut être intéressant de poser une conduite d'approvisionnement de chauffage à distance sur un terrain privé non construit. Dans ce cas, la servitude doit cependant être réglée avant d'entreprendre toute autre étape de la planification, telle que la procédure d'autorisation ordinaire ou l'appel d'offres.

Il faut également procéder aux clarifications nécessaires avec les autorités par rapport à la façon dont la procédure d'autorisation doit être effectuée. Les différences entre les communes et les cantons sont parfois considérables, même en ce qui concerne la durée de la procédure. Ainsi, une simple demande de creusement peut suffire dans certains cantons, tandis que dans d'autres, toute une procédure d'autorisation de construire formelle doit être entreprise.

Il convient de définir si les routes peuvent être traversées ou occupées et de déterminer la façon dont elles doivent être remises en état. Il est en outre recommandé d'effectuer un sondage auprès des autres propriétaires

de conduites de service industrielles, qui peuvent profiter des mesures de construction prévues pour le chauffage à distance pour coordonner d'autres travaux. Cela peut entraîner une réduction des frais de construction pour le chauffage à distance.

4.7.3 Déroulement de la construction

Les travaux de construction pour les conduites de chauffage à distance se divisent en principe en 4 phases:

- creusement de tranchées (dont passages muraux et travaux de puits);
- construction des conduites;
- remblayage des tranchées;
- remise en état de la surface.

Du point de vue de l'entrepreneur du génie civil, des interruptions de plusieurs jours peuvent avoir lieu, voire même de plusieurs mois dans le cas de la remise en état. Il incombe au planificateur d'établir un calendrier-cadre qui permet à l'entrepreneur du génie civil de travailler avec le moins d'interruptions possible.

Sur le plan de la construction des canalisations, il est souhaitable que les étapes soient les plus longues possible, et ce indépendamment du système de pose ou du type de tube choisi. Principaux avantages des longues étapes (entre autres): réduire le nombre d'essais de pression, rendre possibles les précontraintes, éviter d'utiliser des manchons avec les tubes flexibles ou encore éviter également de ne devoir assembler que de petites quantités. Tous ces points ont un impact sur les coûts de construction et sur la durée globale des travaux.

Avant le début des travaux, la direction des travaux doit effectuer une visite à laquelle participent, outre l'entrepreneur en génie civil, le constructeur de tubes et éventuellement les représentants des autorités responsables du trafic. Au-delà des sites d'installation pour le génie civil, il faut également définir les sites de stockage provisoire des tubes, les ouvertures d'introduction des tubes dans l'étaillage de tranchée ainsi que l'approvisionnement en électricité et en eau. Les fiches techniques FW401 parties 12 et 18 de l'AGFW [100] doivent également être respectées.

4.7.3.1 Creusement de tranchées

Si aucune prescription du maître d'ouvrage ou des centrales (le cas échéant) n'est donnée, les prescriptions des fournisseurs de conduites s'appliquent au creusement de tranchées. Dans tous les cas, les prescriptions de la SUVA [87] et [86], l'OTConstr [77] et la norme DIN 4124 [109] priment sur les prescriptions indiquées précédemment. La **largeur libre de la tranchée** peut être déduite des figures suivantes.

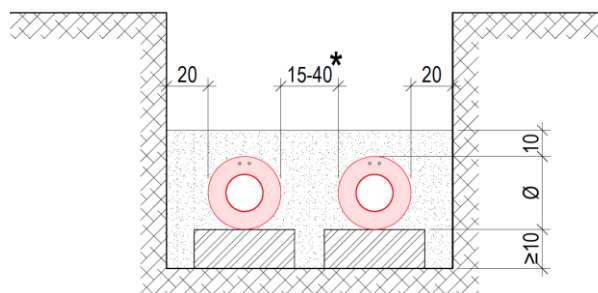


Fig. 4.27 Faible largeur de tranchée non talutée (*selon les instructions du fabricant; mesures en cm).

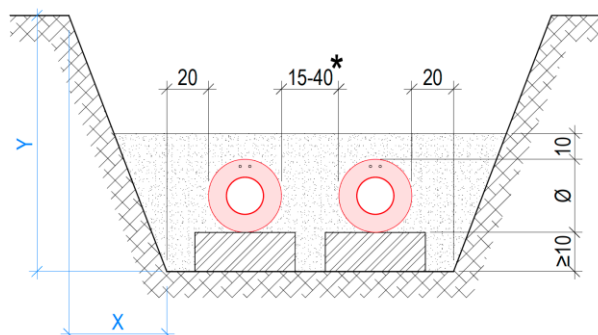


Fig. 4.28 Faible largeur de tranchée talutée (*selon les instructions du fabricant; mesures en cm).

En cas de matériau très compact et résistant (tel que l'argile), il est possible de se passer d'un étaillage jusqu'à une profondeur de tranchée de 1.50 m (Fig. 4.27). Pour des raisons de sécurité, les fossés doivent impérativement être étayés ou talutés à partir d'une profondeur de tranchée de 1.50 m. En raison de la mise en œuvre longue et souvent simultanée de plusieurs étapes de creusement, il faut tenir compte du fait qu'on utilise de nombreux étais que l'entrepreneur en génie civil doit tenir à disposition.

Le rapport X:Y pour les tranchées talutées (Fig. 4.28) dépend des matériaux d'excavation. Ainsi, le rapport d'inclinaison du talus est de 1:3 dans un terrain solide tel que l'argile, tandis qu'il est de 1:1 dans un terrain éboulé tel que le cailloutis.

Que les **matériaux d'excavation** soient mis de côté ou évacués vers une décharge de chantier n'a aucune incidence sur la pose des conduites. Cependant, comme un matériau de recouvrement des conduites sera ensuite apporté, une grande partie des matériaux d'excavation doivent de toute façon être évacués.

Les **conduites de service industrielles** nues doivent être sécurisées et protégées conformément aux conditions posées par les propriétaires des conduites.

Dans le cas d'un système de conduites flexibles, le fossé doit être couvert d'une épaisseur d'au moins 10 cm de matériau de recouvrement avant la pose de toute conduite.

Les **passages muraux** sont généralement utilisés dans le cas de raccordements domestiques, lorsque les conduites d’approvisionnement traversent des garages souterrains ou en cas de travaux de puits avec béton coulé en place. Les exigences concernent généralement l’étanchéité des conduites, du sol aux bâtiments (étanchéité à l’eau). L’étanchéité au gaz est parfois aussi exigée. Pour satisfaire ces exigences, il est impératif qu’aucun mouvement latéral, axial, ni radial au niveau des conduites ne perturbe le passage. Le tracé doit être planifié en conséquence.

Les passages sont normalement définis à l’aide de carottages. Il faut alors déterminer au préalable comment les passages doivent être étanchéifiés. A cet effet, on utilise des joints muraux en Néoprène qui sont glissés sur les conduites, ou des joints annulaires. Le Tableau 4.11 présente les différents dimensionnements de carottage. Le facteur le plus important est le diamètre de la gaine (p. ex. la gaine de protection en PE dans le cas de tube pré-isolé en métal).

Tableau 4.11 Diamètres de carottage en mm en fonction des dimensions de la conduite et du type de joint.

Diamètre du carottage	Diamètre de la gaine (p. ex. gaine de protection pour des tubes pré-isolés en métal)											
	110	125	140	160	180	200	225	250	280	315	355	400
Joint mural	200	200	250	250	300	300	350	350	400	400	450	500
Joint annulaire	200	200	200	250	250	300	300	350	350	400	450	500

Les joints muraux (joints les plus simples) trouvent leur utilisation dans les zones où les sols sont bien perméables et où le passage est en **côte**. Dans toutes les autres zones, de même qu’en cas d’inclinaison, d’eau stagnante ou de passage en **pente**, on utilise des joints annulaires. Il convient de noter qu’en cas d’utilisation de joints annulaires, ceux-ci ne doivent pas être plâtrés à l’intérieur des bâtiments, car ils doivent pouvoir être réajustés si nécessaire. Dans le secteur des nouvelles constructions existent également des raccordements de bâtiment multisectoriels (Fig. 4.29) avec étanchéification indépendante de chaque canalisation (eau, chauffage à distance, électricité, etc.).

Il est essentiel de suivre les instructions du fabricant et de se référer à la fiche technique FW 401 [100] partie 7 de l’AGFW. Les exigences en matière d’étanchéité des bâtiments sont définies par la norme DIN 18195 [105] et doivent également être respectées.



Fig. 4.29 Exemple de raccordement de bâtiment multisectoriel. Source: DOYMA GmbH.

En ce qui concerne les **travaux de puits**, on distingue les puits praticables des puits non praticables. En raison de leur taille, les puits praticables sont en principe fabriqués en béton coulé en place. Leur exécution doit satisfaire aux exigences minimum de la fiche technique FW 433 de l’AGFW [103] ainsi qu’aux prescriptions de la SUVA ([87]

et [86]) et de l’OTConstr [77]. Ces prescriptions comportent notamment les éléments suivants:

- hauteur minimum de l’intérieur des puits pour permettre l’utilisation de la robinetterie (1.8 m) et surface minimum pour les opérations de service (1.5 m²), largeurs minimum (1 m), allées de service (min. 500 mm);
- aération du puits (circulation naturelle);
- fond équipé d’un puisard d’aspiration ou d’un siphon d’écoulement au sol;
- trou d’homme (min. 0.8 m, resp. 0.6 m) et équipement.

Dans le cas des puits non praticables (p. ex. anneaux pour puits), il est très important de prêter une attention particulière aux fondations, en particulier sur la voie publique.

4.7.3.2 Pose de canalisations

Au cours de cette phase, les travaux de génie civil sont interrompus. L’entreprise de génie civil peut toutefois aider à l’insertion des conduites, aux travaux d’étaieement ou à la mise en place de points fixes de précontrainte.

Les chapitres 4.4 à 0 traitent les sujets de la structure du réseau, des différentes méthodes de pose et des situations typiques de pose. Le présent guide de planification n’intègre néanmoins pas plus de détails sur la construction de canalisations, comme la réalisation de travaux de soudure, la pose de manchons, le contrôle d’étanchéité, etc.

Des informations plus complètes sur la construction de canalisations figurent notamment dans les réglementations et autres publications de la commission AGFW e.V. (*Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft*), telles que le Manuel technique du chauffage à distance (*Technisches Handbuch Fernwärme*)[6], ou le Manuel de montage (*Montage-Handbuch*)[8] du Bundesverband Fernwärmeleitungen e.V., qui fournit des renseignements

détaillés sur les différentes étapes et processus de la construction de conduites.

En principe, seules les entreprises capables de prouver leur expertise peuvent être mandatées pour la pose des conduites. Il est d'usage, en Suisse (et souvent obligatoire lorsqu'il s'agit d'un appel d'offres public), de demander à l'entreprise chargée de la construction de canalisations de fournir des références prouvant leur adéquation avec la prestation. En principe, la référence en matière de construction de canalisations est deux installations similaires de taille équivalente. L'entreprise doit ensuite par exemple prouver que les soudeurs employés possèdent les certificats de soudage nécessaires (classe de qualité du soudage B). En Allemagne et en Autriche, les appels d'offres publics exigent également de l'entreprise qu'elle présente un certificat de conformité à la fiche technique FW 601[106] de l'AGFW.

Une fois les travaux de soudure terminés, leur conformité avec les éléments convenus entre le donneur d'ordre et le mandataire et exigés par la description du projet doit être contrôlée. En règle générale, on effectue un contrôle visuel (conformément à la norme DIN EN ISO 17637) suivi d'un contrôle non destructif des soudures, afin qu'elles correspondent aux exigences et conditions fixées. En cas de contrôle radiographique, il est important de respecter la classe de contrôle B de la norme DIN EN 1435. Les contrôles doivent être effectués conformément aux normes suivantes: essai de pénétration DIN EN 571-1, contrôle par ultrasons EN 1714, magnétoscopie DIN EN ISO 17638, courants de Foucault DIN 54141.

Succède aux contrôles non destructifs le contrôle d'étanchéité et/ou de résistance, conformément à la fiche technique FW 602 de l'AGFW. Les procédures d'inspection visuelle à l'air sont à privilégier par rapport à celles à l'eau, dans lesquelles les soudures sont humidifiées à l'aide d'un agent moussant. Si dans un laps de temps d'au moins une minute, aucune bulle ne s'est formée, on considère que l'ensemble est effectivement étanche. Avec la méthode par surpression d'air interne, la pression d'essai se situe entre 0.2 et 0.5 bar, et par dépression d'air externe (pompe à vide) 0.6 bar max., en termes absolus. Un essai de pression avec de l'eau froide sur les conduites purgées doit être effectué conformément à la fiche technique G 469 méthode A1 de la DVGW. La pression d'essai s'élève à 1.3 fois la pression de service au point le plus haut et doit être maintenue pendant 3 heures.

4.7.3.3 Remblayage des tranchées;

Une fois la construction des canalisations effectuée (pose des manchons et montage des coussins de dilatation en dernière étape), le tracé doit être validé par un conducteur de travaux responsable avant que le lit de sable puisse être constitué.

Le recouvrement des conduites avec un matériau à grain fin est réalisé à l'aide de limon (grain 0-0.75 mm) ou de gravier rond lavé (grain 0-4 mm, matériau concassé non

autorisé!). Dans le cas de systèmes rigides, il faut veiller à ce que les conduites soient **remplies** proprement. Afin d'éviter les cavités, il faut veiller à conserver un espacement entre chaque conduite. Ces espacements doivent être comprimés séparément afin d'éviter les tassements et glissements ultérieurs. Au cours de ces travaux, les éventuels supports auxiliaires utilisés doivent également être retirés, excepté s'il s'agit de sacs de sable à éventrer ou de supports en mousse dure. Cette étape doit toujours être réalisée à la main. Le recouvrement des conduites à l'aide d'un **coulis n'est pas autorisé!** Les conduites doivent être recouvertes par au moins 10 cm de ce matériau fin. Il est recommandé de poser, sur le recouvrement et pour chaque conduite, un ruban d'avertissement de tracé.

S'il ne peut être exclu, en cas de conditions défavorables, que le lit de sable soit anéanti lors des travaux de génie civil, par la pluie par exemple, cette zone doit être recouverte d'un géotextile. Il est important d'y veiller notamment en cas de terrain incliné voire de forte pente, en raison de l'action drainante du profil des tranchées. Lorsque de l'eau s'infiltré dans le sable, sa teneur en eau dépasse la teneur optimale et ne suffit alors pas pour atteindre le degré de compaction ($D_{Pr} \geq 97\%$) requis. Les différentes tailles de grain sont dissociées et les coefficients de frottement nominaux des tubes pré-isolés en métal ne sont pas atteints; cela crée ce que l'on appelle un «effet tunnel». C'est entre autres pour ces raisons qu'utiliser du sable sous forme de coulis n'est pas considéré comme une solution comprise dans l'état de la technique selon la fiche technique FW 401 partie 12 de l'AGFW.

En cas de constitution du lit à l'aide de matériaux fluides tels que des mélanges de sable autostabilisés ou un mortier de sol, il convient de noter qu'il n'existe aucune expérimentation à long terme permettant de donner des informations sur l'élimination de ceux-ci au moyen d'équipements simples. Personne ne dispose non plus de résultats de contrôle fiables et de longue durée en matière de caractéristiques mécaniques, telles que le comportement de friction à long terme. Ces matériaux de remplissage n'ont pas encore été homologués de façon généralisée comme matériaux de construction routière par l'association allemande FGSV (*Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen*, Association pour la recherche en matière de trafic routier). Ils ne sont pas non plus évoqués dans les bases de la statique des conduites faisant l'objet des parties 10 et 11 de la fiche technique FW 401 de l'AGFW.

Les matériaux de substitution comme les granulés de verre mousse, le sable de concassage, les matériaux recyclés ou d'autres produits similaires ne sont en principe pas autorisés au niveau de la conduite comme lit de sable ou autres matériaux pour former le lit.

Si des **mesures de protection** des conduites se révèlent nécessaires en raison d'une hauteur de recouvrement trop haute ou trop basse par rapport à la hauteur admissible, celles-ci doivent être mises en place après avoir recouvert les conduites. Si la hauteur de recouvrement

maximum est supérieure à ce que les spécifications du fournisseur de canalisations mentionnent, il est recommandé d'avoir recours à des profilés en U préfabriqués, en béton. Si, sur la voie publique, la hauteur de recouvrement est inférieure à 60 cm, il est possible de mettre en place, sur le recouvrement, des **plaques de répartition de charge** destinées à réduire la pression de la roue (Fig. 4.30).

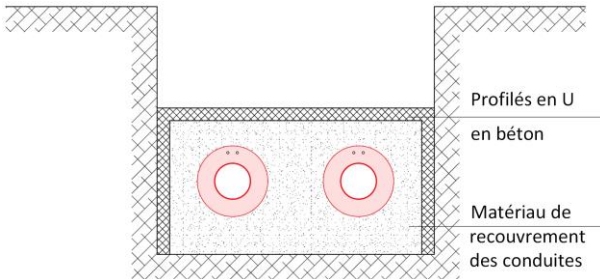


Fig. 4.30 Exemple de mesures de protection en cas de dépassement de la hauteur de recouvrement maximum: plaques de répartition de charge en profilés en U préfabriqués, en béton.

Dans les herbages et les jardins, on recommande généralement la pose de **dalles de jardin** en béton pour les recouvrements inférieurs à 65 cm (Fig. 4.31). Cette mesure permet de protéger les conduites d'éventuels dommages mécaniques (p. ex. en plantant des pieux).

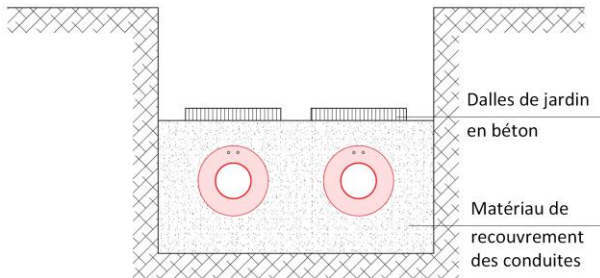


Fig. 4.31 Exemple de mesures de protection contre les dommages mécaniques: dalles de jardin en béton.

Ce n'est qu'après avoir recouvert les conduites que l'on passe au remblayage des tranchées à proprement parler, à l'aide de remblai ou de matériau suffisamment compactable (p. ex. un mélange de gravier 0/45 résistant au gel). Le matériau doit être appliqué en couches de 30 à 50 cm d'épaisseur environ puis compacté à l'aide d'un équipement approprié. Les conduites de service industrielles existantes posées à l'air libre doivent être consolidées à l'aide de béton maigre. Il faut toutefois respecter également les prescriptions qui s'appliquent à chaque installation. C'est à cette étape que les éventuels supports posés pour soutenir le fossé peuvent être retirés. Selon la profondeur de la tranchée, il est possible de poser, au premier niveau intermédiaire, des conduites de câbles destinées aux systèmes de contrôle ou de surveillance des fuites. Il est très important de s'assurer que le compactage est effectué de façon adéquate; des travaux mal réalisés peuvent provoquer des dommages

ultérieurs, et plus particulièrement lorsqu'il s'agit de la voie publique.

La partie supérieure du fossé est constituée du sol superficiel (pour les herbages) ou du coffre de chaussée et du revêtement (pour les routes et les trottoirs). Le coffre de chaussée et le revêtement doivent être réalisés dans le respect des dispositions cantonales ou communales ou du document SN 640535C [92].

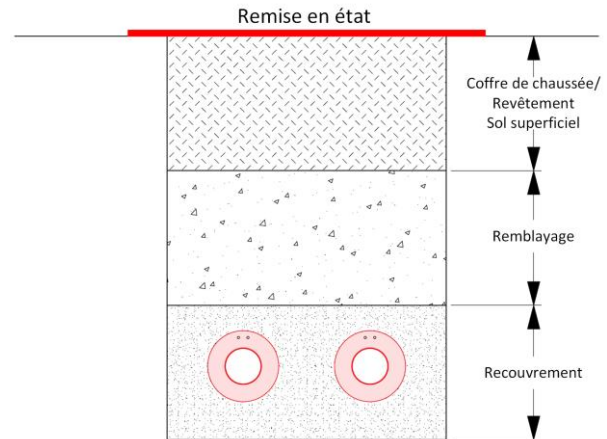


Fig. 4.32 Représentation schématique (par couches) du remblayage des tranchées.

4.7.3.4 Remise en état

On entend par remise en état la réfection de la surface, afin qu'elle retrouve son état initial (avant le début des travaux). La mise en place la plus simple est de loin celle des terres cultivables. Elle devient plus complexe dans les jardins où une pelouse doit être ressemée, des arbustes replantés ou des allées redéplacées. Sur la voie publique, ce sont les autorités locales (chef cantonnier) qui déterminent généralement l'étendue du revêtement à refaire.

Souvent, les travaux de remise en état ne suivent pas directement la fin des travaux de génie civil. En effet, dans les jardins, ce sont par exemple les entreprises paysagistes qui s'occupent des nouvelles plantations, et non l'entreprise de génie civil. Autre exemple: les travaux de réfection de la chaussée, qui ne peuvent pas être réalisés pendant les mois d'hiver.

4.8 Qualité de l'eau

Afin d'éviter des dommages dus à la corrosion, à l'érosion ou à une contrainte matérielle excessive dans les installations, l'eau exploitée par le chauffage à distance doit satisfaire certaines exigences, qui dépendent en outre de la production de chaleur. La réglementation FW 510 de l'AGFW [6] et la directive SICC BT102-01 [91] en font par ailleurs une description détaillée. Les points suivants en résument les éléments les plus importants.

4.8.1 Types d'eau

Le présent chapitre définit brièvement les termes couramment employés en technique du bâtiment et en technique du chauffage à distance pour désigner les différents types d'eau. L'accent a surtout été mis sur le terme eau chaude, très courant en technique du bâtiment et en technique du chauffage à distance. Dans ce document, les termes eau chaude sanitaire et production d'eau chaude sanitaire (PECS) ont en effet été utilisés pour désigner l'eau chaude (eau potable chaude).

Les différentes catégories de liquides selon la SSIGE font également l'objet d'une explication [88]. Selon ces catégories de liquides, l'eau de circulation du réseau de chauffage à distance (circuits primaire comme secondaire) correspond généralement aux groupes III et IV.

4.8.1.1 Termes en technique du bâtiment

Eau potable:

Selon la législation suisse sur les denrées alimentaires, l'eau potable est définie comme eau, soit en l'état, soit après traitement, destinée à la boisson, à la cuisson, à la préparation de denrées alimentaires ou au nettoyage d'objets usuels [67]. On entend également par eau potable l'eau utilisée pour les soins corporels et l'hygiène (eau des douches et bains).

Eau froide:

Eau froide potable dont la température n'a pas pour vocation d'être augmentée.

Eau chaude (eau chaude sanitaire):

Eau potable chaude dont la température a été relevée par un apport de chaleur. A ne pas confondre avec l'eau chaude utilisée en technique du chauffage à distance. Dans le présent document, les termes eau chaude sanitaire et production d'eau chaude sanitaire (PECS) sont utilisés pour désigner l'eau chaude (eau potable chaude).

Eaux industrielles:

Eau destinée à un usage industriel ou domestique qui n'a pas besoin d'être potable.

4.8.1.2 Termes en technique du chauffage à distance

Eau brute:

Eau disponible avant son passage en usine de traitement, indépendamment de tout autre traitement antérieur externe.

Eau douce:

Eau exemptée de métaux alcalino-terreux (eau adoucie) par échange d'ions.

Eau déminéralisée:

Eau en grande partie exemptée de substances hydro-solubles dissociées par échange d'ions, caractérisée par une conductivité électrique inférieure à 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une teneur en acide silicique inférieure à 0.5 mg/l.

Eau intégralement déminéralisée:

Eau exemptée de substances hydrosolubles dissociées par échange d'ions (également appelée eau déionisée), caractérisée par une conductivité électrique inférieure à 0.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une teneur en acide silicique inférieure à 0.02 mg/l.

Eau de remplissage et d'appoint:

Eau traitée destinée aux remplissages initial, suivant et partiel des réseaux de chauffage à distance.

Eau de circulation:

Eau circulant dans les réseaux de chauffage à distance par le générateur de chaleur, le réseau de chauffage à distance et, éventuellement, les radiateurs ou les stations de transfert de chaleur. Le terme s'applique non seulement aux réseaux primaires, mais également à l'eau de réseaux secondaires.

Eau chaude:

Eau de circulation d'une température inférieure à 110°C. N'a pas besoin d'être potable. A ne pas confondre avec l'eau chaude en technique du bâtiment.

Eau surchauffée:

Eau de circulation d'une température supérieure à 110°C.

4.8.1.3 Catégories de liquides

Les liquides susceptibles d'entrer en contact avec l'eau potable sont divisés en cinq catégories [88]:

Catégorie I:

Eau destinée à la consommation humaine directement prélevée d'une installation d'eau potable et conforme aux dispositions de la législation sur les denrées alimentaires.

Catégorie II:

Liquides ne présentant aucun risque pour la santé humaine. Liquides propres à la consommation humaine, notamment l'eau issue d'une installation d'eau potable et susceptible de présenter une altération de son goût, de son odeur, de sa couleur ou de sa température (liquide chaud ou froid).

Exemples: eau potable chaude, jus de fruits, soupes, café, eau des aliments cuits, etc.

Catégorie III:

Liquide présentant un risque pour la santé humaine du fait de la présence d'une ou plusieurs substances toxiques.

Exemples: eau de chauffage (sans additifs), eau avec agent antigel, eau de rinçage de vaisselle et d'ustensiles de cuisine, eau de chasse d'eau, eau sur poste de travail dentaire, etc.

Catégorie IV:

Liquide présentant un risque pour la santé humaine du fait de la présence d'une ou de plusieurs substances toxiques voire particulièrement toxiques, ou encore d'une ou plusieurs substances radioactives, mutagènes ou cancérogènes.

Exemples: eau de chauffage avec additifs, eau avec agents tensioactifs, eau avec agents désinfectants, eau avec algicides, etc. La délimitation entre les catégories III et IV est de LD50 = 200 mg/kg de poids du corps.

Catégorie V:

Liquide présentant un risque pour la santé humaine du fait de la présence d'agents microbiens ou viraux de maladies transmissibles. Exemples: eau de pluie, eau de piscine, eau de machine à laver, eau des toilettes, eau d'abreuvoirs animaliers, etc.

4.8.2 Recommandations relatives à la qualité de l'eau en technique du chauffage à distance

Les recommandations formulées au présent chapitre concernent les eaux de circulation des réseaux de chauffage à distance (circuits primaire et secondaire) et visent à prévenir les dommages subis par l'eau du fait de la corrosion et des dépôts et ainsi qu'à garantir une grande efficacité énergétique. L'eau de circulation des réseaux de chauffage à distance correspond en règle générale aux catégories de liquides 3 et 4. Les différentes applications sont déterminées selon la température d'exploitation de l'eau de l'installation, mais aussi en partie selon la taille de l'installation. Si la qualité de l'eau brute diffère des valeurs indicatives, des mesures correctrices doivent être prises (traitement et épuration de l'eau).

Plus d'informations quant aux grandeurs de mesure, au traitement et à l'épuration de l'eau en annexe, au chapitre 12.

4.8.2.1 Eau chaude jusqu'à 110°C

Le Tableau 4.12 présente les valeurs indicatives de l'eau de remplissage et d'appoint et le Tableau 4.13 celles de l'eau de circulation. Outre ces valeurs indicatives, il est également capital de respecter les exigences des fabricants des composants.

Il est recommandé de pratiquer un contrôle annuel de l'eau de circulation.

Tableau 4.12 Exigences en matière d'eau de remplissage et d'appoint en dessous de 110°C [91].

Désignation	Unité	Référence
Conductivité électrique	mS/cm	< 100
pH	-	6.0-8.5
Dureté totale	mmol/l	< 0.1

Tableau 4.13 Exigences en matière d'eau de circulation en dessous de 110°C [91].

Désignation	Unité	Référence
Conductivité électrique	mS/cm	< 200
pH	-	8.2-10
Dureté totale	mmol/l	< 0.5
Chlorures	mg/l	< 30
Sulfates	mg/l	< 50
Oxygène	mg/l	< 0.1
Fer dissout	mg/l	< 0.5
Teneur en carbone organique total COT	mg/l	< 30

4.8.2.2 Eau surchauffée au-delà de 110°C

Deux méthodes hydrochimiques sont couramment utilisées dans les installations de chauffage à distance lorsque la température de l'eau de circulation dépasse les 110°C:

- méthode avec faible teneur en sel;
- méthode avec forte teneur en sel.

Le Tableau 4.14 liste les valeurs indicatives de l'eau de remplissage et d'appoint et le Tableau 4.15 celles de l'eau de circulation au-delà de 110°C. Outre ces valeurs indicatives, il est également capital de respecter les exigences des fabricants des composants.

Il est recommandé de pratiquer un contrôle trimestriel de l'eau de circulation.

Tableau 4.14 Exigences en matière d'eau de remplissage et d'appoint au-delà de 110°C [91].

Désignation	Unité	Valeurs prévues Méthode hydrochimique		
		Faible teneur en sel		Forte teneur en sel
Généralités		Incolore, claire, exempte de toute substance non dissoute		
Conductivité électrique	mS/cm	10-30	> 30-100	100-1500
pH		8.0-10	8-10.5	8.5-10.5
Dureté totale	mmol/l	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Oxygène	mg/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1

Tableau 4.15 Exigences en matière d'eau de circulation au-delà de 110°C [91].

Désignation	Unité	Valeurs prévues Méthode hydrochimique		
		Faible teneur en sel		Forte teneur en sel
Généralités		Incolore, claire, exempte de toute substance non dissoute		
Conductivité électrique	mS/cm	10-30	> 30-100	100-1500
pH		9.0-10.0	9.0-10.5	9.5-10.5
Dureté totale	mmol/l	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Oxygène	mg/l	< 0.1	< 0.05	< 0.02
K _{S8,2} (valeur p)*	mmol/l	–	0.1-0.5	0.5-5
Phosphate	mg/l	3-6	5-10	5-15

La capacité acide K_{S8,2} indique la quantité d'acide qu'un échantillon d'eau peut absorber avant d'atteindre le point de virage de l'indicateur u phénolphtaléine (pH 8,2). Cette mesure apporte des renseignements intéressants sur l'alcalinité de l'eau et est donnée en mg/l. Cette mesure doit également être prise dans la zone de la chaudière à vapeur.

5 Transfert de chaleur: principes de base

Ce chapitre présente la façon dont une installation domestique est raccordée à un réseau de chauffage à distance. En principe, n'importe quel bâtiment peut être raccordé à un réseau de chauffage à distance, à condition qu'il soit équipé d'une installation domestique adaptée à ce type de chauffage et éventuellement d'une installation de chauffage de l'eau chaude ou de ventilation, ou que cette installation soit prévue. La nature, l'étendue et les détails techniques d'un raccordement à un réseau de chauffage sont donc précisés dans un contrat de fourniture de chaleur.

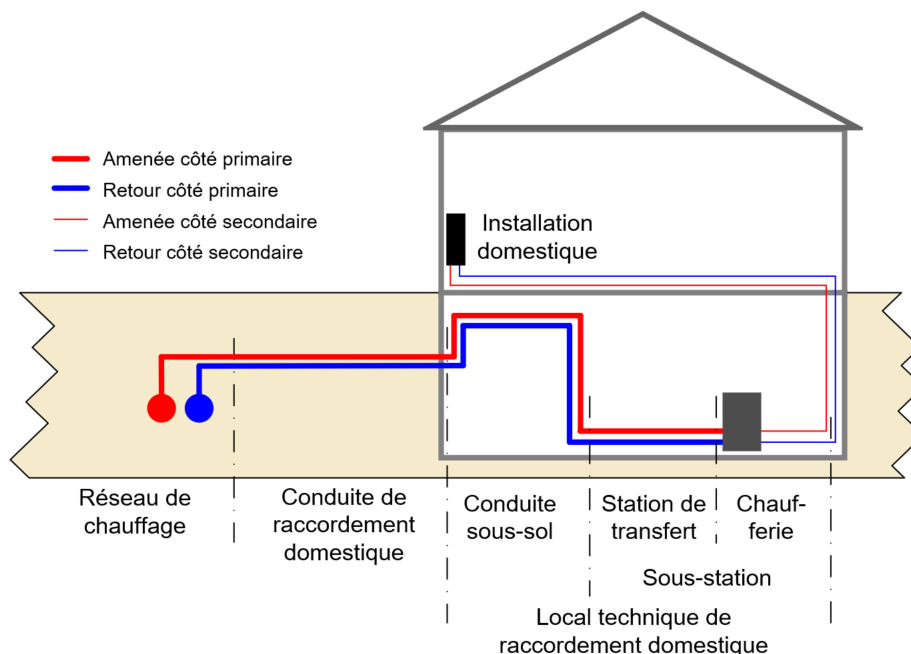


Fig. 5.1 Aperçu du raccordement domestique.

5.1 Termes

La Fig. 5.1 présente les termes les plus importants en matière de transfert de chaleur, conformément à la norme DIN 4747-1 [78], à la directive VDI 2036 [116] et aux précisions données dans [6] et [56].

5.1.1 Conduite de raccordement domestique

La conduite de raccordement domestique relie le réseau de chauffage à distance à la station de transfert et appartient généralement aux installations d'exploitation du fournisseur d'énergie. La conception et la réalisation sont assurées par le fournisseur d'énergie. L'acheminement des conduites jusqu'à la station de transfert doit être déterminé par les personnes concernées. On appelle la conduite de raccordement domestique située à l'intérieur du bâtiment (de la percée jusqu'à la station de transfert) conduite sous-sol. Elle est équipée d'un robinet d'arrêt.

5.1.2 Local technique de raccordement domestique

Les équipements de raccordement et d'exploitation requis sont installés dans un local technique de raccordement domestique. Leur emplacement et leurs

dimensions doivent faire l'objet d'un accord préalable avec le fournisseur d'énergie. Les bases de planification sont définies par la norme DIN 18012 [112]. Celle-ci mentionne également le fait que le local technique de raccordement domestique n'est pas une obligation dans le cas d'une maison individuelle ou à deux appartements. La configuration du local technique de raccordement domestique doit répondre aux exigences ci-dessous.

- Idéalement, le local doit se trouver à proximité du point d'entrée de la conduite de raccordement domestique.
- Il doit pouvoir être fermé à clé et, si possible, rester accessible à tout moment.
- En raison du bruit que les installations génèrent, le local ne doit pas être situé à proximité de pièces sensibles au bruit telles que les chambres à coucher.
- Le local doit être suffisamment ventilé.
- Un éclairage suffisant doit être prévu pour faciliter les travaux d'entretien et de réparation.
- La sous-station nécessite un raccordement électrique.
- Le local doit être doté d'un système d'évacuation des eaux, assez grand pour permettre la vidange de l'installation pendant les travaux d'entretien et de réparation si cela s'avérait nécessaire. Cela nécessite également de prévoir une prise d'eau froide.

5.1.3 Station de transfert de chaleur

La norme DIN 4747-1 [78] définit la station de transfert de chaleur comme le lien entre la conduite de raccordement domestique et la chaufferie. La station de transfert de chaleur (ou plus simplement station de transfert) permet de transmettre la chaleur ou plutôt le fluide caloporteur à la chaufferie, et ce à des conditions de pression, de température et de débit conformes à l'utilisation prévue.

Généralement, la station de transfert de chaleur n'est pas considérée comme une unité indépendante mais est associée au fonctionnement de la chaufferie; on appelle alors l'ensemble une station compacte. Ceci dit, la station de transfert représente habituellement la limite de propriété entre le fournisseur d'énergie et le consommateur de chaleur.

Le fournisseur d'énergie établit les conditions de configuration de la station de transfert conformément aux prescriptions techniques de raccordement applicables au contrat de fourniture de chaleur. Les combinaisons possibles au niveau de la chaufferie doivent également être déterminées avec le fournisseur d'énergie, et ce plus particulièrement pour les stations compactes. Certaines fonctions sont toutefois utilisées par les deux partenaires, comme les vannes de réglage, qui protègent l'installation du client grâce à leur fonction d'arrêt d'urgence.

Le chapitre 8.1 aborde l'aspect hydraulique et la technologie des stations de transfert ainsi que des équipements nécessaires.

5.1.4 Chaufferie

La chaufferie fait le lien entre la station de transfert et l'installation domestique. Elle sert à ajuster les caractéristiques de la chaleur fournie à l'installation domestique, en matière de pression, de température et de débit.

On distingue deux types de chaufferies: celles à raccordement direct (Fig. 5.2) et celles à raccordement indirect (Fig. 5.3). Dans le cas d'un raccordement indirect, le fluide caloporteur du consommateur de chaleur est séparé de celui du fournisseur d'énergie par un échangeur de chaleur. L'installation domestique (conduites de distribution dans le bâtiment, les surfaces chauffantes) peut donc dans ce cas être conçue indépendamment. Les possibilités de raccordement direct de la chaufferie permettent d'autres distributions secondaires de l'installation, avec ou sans mise en commun. Le raccordement du système de chauffage de l'eau chaude offre lui aussi différentes possibilités, comme notamment les réservoirs, chauffe-eaux instantanés ou accumulateurs de chaleur, avec ou sans circuit prioritaire.

5.1.5 Sous-station

La sous-station regroupe la station de transfert et chaufferie, et peut être conçue pour un raccordement

direct ou indirect. Le type de raccordement est généralement défini par le fournisseur d'énergie. Auparavant, on fixait généralement la limite de propriété et de responsabilité entre le fournisseur d'énergie et le consommateur de chaleur au niveau de la sous-station, souvent la station de transfert et la chaufferie. Il s'agissait en effet d'ensembles de construction séparés qui avaient été acquis, installés, exploités et entretenus par toutes les parties concernées; tel est toujours le cas pour les installations de grande ampleur.

Aujourd'hui, dans le cas de petites et moyennes installations, on ne met en place presque que des stations compactes, dans lesquelles la station de transfert et la chaufferie ne forment qu'une seule et même unité. Du fait du mode de construction et des différents modèles d'exploitation, les limites de propriété et de responsabilité d'une sous-station sont quelque peu floues. Sur le plan technique, les fonctions restent les mêmes que sur les unités séparées.

Dans la mesure du possible, une transmission des données directe ou indirecte à la centrale thermique (connexions bus, p. ex. Modbus, etc.) doit être intégrée à la sous-station, ce qui permet essentiellement de simplifier la facturation, la détection des dysfonctionnements et l'optimisation de l'installation.

5.1.6 Station compacte

À l'époque, les stations de transfert étaient fabriquées à partir de pièces détachées que l'on soudait puis que l'on équipait des robinets vissés à brides; ces stations étaient très encombrantes. Dans une station compacte, toutes les pièces de la station de transfert de chauffage à distance et toutes celles de la chaufferie (y compris l'installation électrique) sont assemblées puis montées sur châssis, afin d'être livrées prêtes à l'emploi et installées sans difficulté. Sur place, il suffit alors de les raccorder au réseau de chauffage à distance et à l'installation domestique par les conduites d'approvisionnement. Puisque le branchement électrique se fait par une fiche CEE, il ne reste plus qu'à raccorder un capteur de température extérieure. Ce mode de conception a largement fait ses preuves pour les stations allant jusqu'à env. 400 kW. Pour les stations plus petites, il existe des formats plus adaptés faciles à loger dans un espace fonctionnel et qui, grâce à une bonne configuration, ne gênent quasiment pas.

5.1.7 Installation domestique

Un bon approvisionnement en chaleur exige un équilibre entre chaleur fournie et exploitation de la chaleur. Le fournisseur d'énergie doit donc connaître l'installation technique du bâtiment des consommateurs de chaleur. L'installation domestique, dernier maillon de la chaîne et servant ainsi de point de jonction, a pour mission de fournir de la chaleur sous la forme souhaitée. L'installation domestique est généralement la propriété du bâtiment, à qui la responsabilité en matière d'installation, d'exploitation et de maintenance revient.

5.2 Options de raccordement

Outre le mode opératoire du réseau, le type de réseau en lui-même et les paramètres d'exploitation, le type de raccordement influe lui aussi sur la conception de la sous-station. Le fournisseur d'énergie fixe les exigences de conception relatives au raccordement au réseau de chauffage à distance conformément aux prescriptions techniques de raccordement applicables au contrat de fourniture de chaleur. En principe, on distingue entre les raccordements domestiques direct et indirect.

La solution la plus simple pour les petites installations est de contrôler ou de réguler le raccordement au chauffage à distance par des régulateurs simples. Pour les moyennes et grandes installations, il faut envisager de mettre en place un système de contrôle. Cette solution de surveillance centralisée permet de détecter les erreurs de paramétrage des différents régulateurs et de mettre en avant des possibilités d'optimisation. De plus, en enregistrant chaque compteur d'énergie thermique, plus besoin de se rendre sur site pour relever les compteurs.

5.2.1 Raccordement direct

Dans le cas d'un raccordement direct, l'eau surchauffée du réseau de chauffage à distance circule dans l'ensemble de l'installation domestique (Fig. 5.2), ce qui implique différentes choses au niveau de la construction et l'exploitation de la chaufferie et de l'installation domestique.

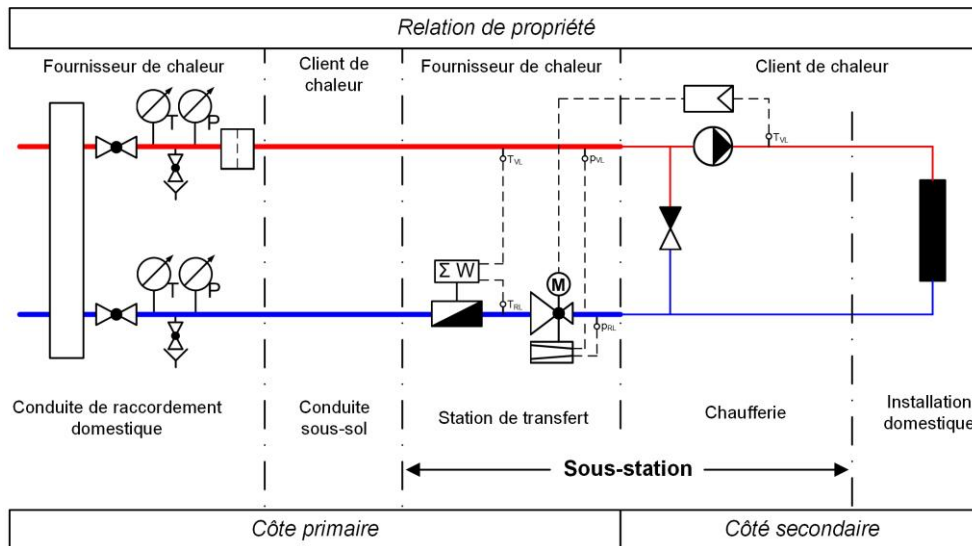


Fig. 5.2 Raccordement domestique à transfert de chaleur direct.

5.2.2 Raccordement indirect

Dans le cas d'un raccordement indirect, l'eau du réseau de chauffage à distance ne circule pas dans l'ensemble de l'installation domestique: il y a séparation hydraulique entre l'eau de chauffage et le fluide caloporteur au moyen d'un échangeur de chaleur situé dans l'installation domestique (Fig. 5.3). Ce procédé est capital si les

- La qualité de l'eau est régulée et contrôlée par le fournisseur d'énergie, ce qui est simple à réaliser et efficace. Il faut toutefois y faire attention lors du choix des matériaux de la chaufferie et de l'installation domestique, afin d'éviter la corrosion.
- La pose d'un système de maintien de la pression n'est pas nécessaire, car la pression requise par l'installation est garantie par le fournisseur d'énergie. Si la pression d'amenée maximum du réseau est inférieure à celle admissible pour l'installation domestique, aucun système de limitation de pression n'est plus nécessaire. Dans le cas contraire, il est impératif de prévoir un système de limitation de pression (avec protection).
- Le mélange au circuit de retour permet une adaptation précise du mode de fonctionnement aux exigences de l'installation domestique, en un minimum de moyens.
- On réduit ces moyens au maximum lorsque la température d'amenée maximum du réseau est inférieure à la température d'amenée admissible de l'installation domestique. Dans ce cas, il est possible de ne pas avoir recours au principe de mélange au circuit de retour, ni à un éventuel dispositif de limitation de température.

Le raccordement direct n'est en principe possible que si la pression d'équilibre et la pression de retour du réseau de chauffage à distance sont toutes deux inférieures à la pression admissible de l'installation domestique.

caractéristiques du réseau de chauffage à distance (pression, température, qualité de l'eau) ne sont pas adaptées à l'installation domestique. Ce procédé présente les aspects suivants.

- Le raccordement indirect implique deux circuits de chauffage. La partie dans laquelle circule l'eau du réseau de chauffage à distance est appelée circuit

primaire, et celle dans laquelle circule le fluide caloporteur de l'installation domestique le circuit secondaire.

- Le niveau de pression et la pression nominale des composants de l'installation domestique peuvent être déterminés quasi librement. Cela permet d'appliquer à l'installation domestique une pression nominale plus basse et que celle-ci coûte moins cher dans certaines conditions, ce qui justifie dans de nombreux cas une sous-station un peu plus complexe.
- La protection destinée à la pression et la température dépend de l'installation domestique. Les anciennes installations, dont la pression nominale ou l'ancienneté semble inadaptée, peuvent ainsi elles aussi être

raccordées sans que cela ne présente de risque majeur.

- La circulation de l'eau du réseau de chauffage à distance et la compensation des variations de volume dues aux températures doivent être initiées dans la centrale thermique.
- Le choix des matériaux et des éléments de raccordement sur le circuit secondaire n'a aucun lien avec la qualité de l'eau du réseau de chauffage à distance.
- Il est important de tenir compte de la pression et de la température maximum possibles du réseau de chauffage à distance lors de la conception des pièces rentrant dans la composition de l'installation du circuit primaire.

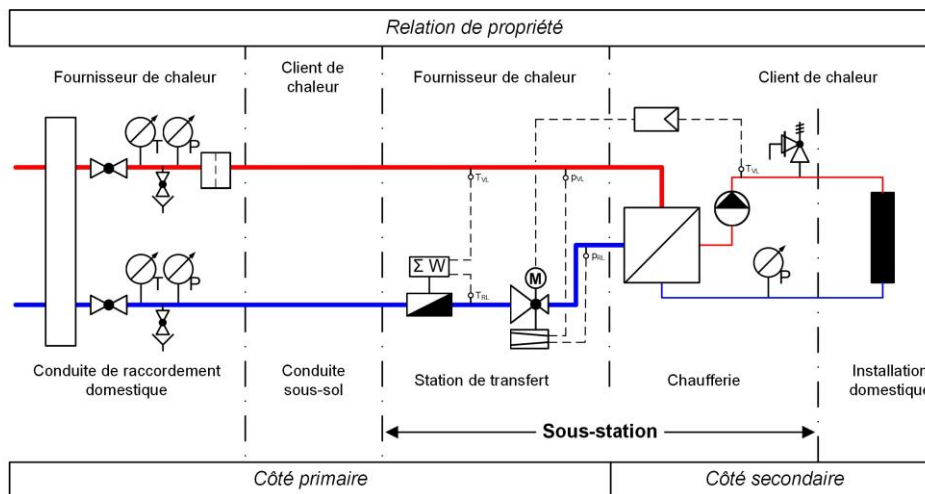


Fig. 5.3 Raccordement domestique à transfert de chaleur indirect. Dans le cas de faibles puissances, la sous-station est souvent une unité modulaire; on l'appelle alors station compacte.

5.3 Contrat de fourniture de chaleur

Un contrat de fourniture de chaleur établit un partenariat à long terme entre le fournisseur d'énergie et le consommateur de chaleur. Il traite essentiellement de points juridiques et techniques, qui peuvent avoir des conséquences économiques considérables pour les deux parties. Il est donc recommandé de consulter un expert ou d'utiliser un modèle de contrat lors de son élaboration. Les possibilités de rédaction sont nombreuses, de même que les contrats de fourniture de chaleur. Les parties au contrat doivent traiter les points suivants lors de la rédaction:

- structure du prix de l'énergie et estimation de la concrétisation future des valeurs numériques;
- contenu des conditions techniques de raccordement et puissance de raccordement du consommateur de chaleur;
- étendue et nature de la chaleur fournie, utilisation et limites de propriété;

- redondance/sécurité de l'approvisionnement et procédure en cas de défaillance de la source de chaleur principale;
- durée prévue du contrat, conditions de résiliation, procédure en cas de transfert de propriétaire;
- cadre juridique de la production d'énergie et de l'aménagement du tracé;
- possibilités de financement.

Différents modèles de contrats de fourniture de chaleur existent et permettent de guider l'élaboration de ces contrats, notamment ceux de Energie-bois Suisse [55] et de C.A.R.M.E.N. [52], qui servent de base à l'explication des éléments qui suivent. Le contrat de fourniture de chaleur doit définir et convenir des points suivants:

- parties;
- éléments contractuels et ordre de priorité;
- objet;
- durée du contrat;
- raccordement au réseau d'approvisionnement en chaleur:
 - construction, exploitation, entretien;
 - points de jonction, propriété;

- puissance de raccordement.
- prix (généralement hors TVA);
- relevés de compteurs, acomptes, échéances;
- service de dépannage;
- dispositions finales.

Si le contrat de fourniture de chaleur ne les contient pas déjà, les documents suivants doivent y être annexés:

- conditions générales du contrat de fourniture de chaleur (CG);
- prescriptions techniques de raccordement
- fiche de tarifs

5.3.1 Conditions générales (CG)

Les conditions générales (CG) constituent la base de nombreux contrats et servent à définir les points suivants:

- termes;
- construction, exploitation, entretien et propriété;
- obligation de fournir et d'exploiter la chaleur;
- limitation et prévention des interruptions de service (responsabilité du fournisseur d'énergie);
- obligation de réduire le dommage;
- réglementation de la fourniture de chaleur à des tiers;
- droits de conduite, d'accès et d'usage;
- modification de la puissance de raccordement;
- réglage de la chaleur fournie (responsabilité du consommateur de chaleur);
- transfert de propriété;
- procédure en cas d'erreur de mesure;
- résiliation anticipée du contrat;
- modifications contractuelles.

5.3.2 Prescriptions techniques de raccordement

Les prescriptions techniques de raccordement font partie intégrante du contrat de fourniture de chaleur et servent de cadre au fournisseur d'énergie ainsi qu'au consommateur de chaleur afin de garantir que les aspects techniques relatifs à la planification, la mise en œuvre et l'exploitation soient respectés. Les prescriptions techniques de raccordement réglementent les points suivants:

- domaine d'application, termes et fluide caloporteur;
- plombage;
- pressions et températures;
- échangeur de chaleur;
- production de l'eau chaude sanitaire;
- station de transfert de chaleur et chaufferie;
- raccordement et contrôle hydraulique;
- matériaux/raccords;
- limitation de température et de débit;

- montage, contrôle et mise en service;
- entretien.

La fiche technique FW 515 de l'AGFW – Conditions techniques de raccordement – Eau surchauffée [105] détaille plus précisément ces prescriptions.

Il est recommandé de joindre les schémas suivants aux prescriptions techniques de raccordement:

- températures d'amenée et de retour du chauffage à distance (circuit primaire) en fonction de la température extérieure;
- schéma hydraulique de la sous-station;
- schéma hydraulique de la production de l'eau chaude sanitaire.

5.3.3 Fiche de tarifs

La fiche de tarifs fait partie intégrante du contrat de fourniture de chaleur et fait état des parts des coûts définies par le contrat de fourniture de chaleur. Le contrat de fourniture de chaleur comporte généralement plusieurs facteurs contribuant au prix de la chaleur, qui couvrent ainsi les différents facteurs de coût. Il est intéressant de séparer les coûts qui dépendent de la consommation et ceux qui n'en dépendent pas. Les investissements tout comme les frais de mise en service et de maintenance ne dépendent par exemple absolument pas de la consommation. Les coûts dépendant de la consommation sont plutôt ceux correspondant à la consommation de courant et de combustible. Les prix du chauffage à distance doivent en règle générale être composés de trois éléments:

- **frais de raccordement** en CHF, une seule fois, correspondant à la participation du consommateur de chaleur aux frais de construction et de raccordement domestique. Le règlement s'effectue généralement une fois le raccordement domestique terminé;
- **prix de base** en CHF par kW de puissance de raccordement et par an pour couvrir les frais fixes;
- **prix de la consommation** en CHF par kWh de chaleur fournie.

La fiche de tarifs permet généralement de réglementer les points suivants:

- observation préliminaire;
- système tarifaire;
- prix/clause d'adaptation des prix:
 - frais de raccordement;
 - prix de base;
 - prix de la consommation.
- conditions de raccordement particulières.

Dans les contrats de fourniture de chaleur, l'adaptation des composantes de coût est généralement régulée par des indices qui reflètent l'évolution des prix, par exemple de l'énergie (servant par exemple de base de comparaison pour le bois d'énergie ou le mazout), et qui sont importants pour les coûts de production de chaleur. Il existe de nombreuses recommandations et de nombreux exemples de clauses d'adaptation des prix. L'association C.A.R.M.E.N.e.V. et la commission AGFW

(*Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft*) ont donné beaucoup d'informations pratiques à ce sujet, dans leur fiche de travail sur les clauses d'adaptation des prix et les indices de prix (*Preis Anpassungsklauseln und Preisindizes*) [53] et leur guide de calcul des prix du chauffage à distance et des modifications (*Leitfaden zur Kalkulation und Änderung von Fernwärmepreisen*) [54], respectivement.

Selon le type de production de chaleur, son niveau de température peut considérablement influencer les coûts de revient de la chaleur. Ainsi, la consommation d'énergie des pompes à chaleur, centrales thermiques et centrales à bois à condensation augmente nettement dans le cas de fortes températures d'amenée, et encore plus lorsque les températures de retour le sont également. C'est la raison pour laquelle on peut imaginer qu'à l'avenir, des conditions de niveau de température seront également prévues au contrat, ou qu'elles seront prises en compte dans le cadre du remboursement.

Une autre approche est celle de tenir compte, sur une période de calcul, du volume consommé plutôt que de l'énergie consommée. On incite de cette façon les clients à planifier et installer une installation domestique efficace, ou alors, en cas de rénovation, à adapter leur ancienne (de basses températures de retour impliquent un volume également réduit).

Planification et calculs

6 Déroulement du projet

6.1 Aperçu

Le système global d'un réseau de chauffage à distance comprend le générateur de chaleur, la distribution de chaleur et la restitution de chaleur aux clients. Le déroulement de projet suivant décrit les tâches de planification pour le **réseau de chauffage à distance**, donc la distribution de chaleur à partir du générateur de chaleur jusqu'à et avec la restitution de chaleur chez les clients. La Fig. 6.1 montre un aperçu du déroulement du projet. La **phase de planification** se distingue de la **phase d'exploitation**.

La **phase de planification** se compose de quatre phases:

Phase 1: Etude préliminaire

Phase 2: Planification préliminaire

Phase 3: Planification, appel d'offres et adjudication

Phase 4: Exécution et réception

La planification est décrite sous forme de quatre **check-lists**:

Tableau 6.10: Checklist phase 1

Tableau 6.11: Checklist phase 2

Tableau 6.12: Checklist phase 3

Tableau 6.13: Checklist phase 4

Après la phase de planification ou après la réception, le maître d'ouvrage du réseau de chauffage à distance prend officiellement en charge l'exploitation opérationnelle de l'installation. Il est secondé par le planificateur dans des cas exceptionnels et dans le cadre de l'optimisation de l'exploitation.

La **phase d'exploitation** se compose des deux phases suivantes:

Phase 5: Optimisation de l'exploitation

Phase 6: Exploitation et gestion

La phase d'exploitation est décrite dans deux **check-lists**:

Tableau 6.14: Checklist phase 5

Tableau 6.15: Checklist phase 6

6.2 Assurance qualité

Lors de la planification, de l'exécution et de l'exploitation des réseaux de chauffage à distance, il faut s'assurer du respect de la qualité convenue lors de la planification, de la construction et du montage. C'est pourquoi la qualité

doit être définie et l'exécution surveillée par comparaison avec les exigences. L'assurance qualité ne se limite pas à des phases individuelles, mais correspond à un processus qui va au-delà de l'ensemble des phases du projet.

Les mesures nécessaires relatives à l'assurance qualité dans le cadre de l'exécution d'un réseau de chauffage à distance avec tube pré-isolé en métal sont consignées dans la fiche de travail FW 401 de l'AGFW [100] partie 17. Les stratégies y figurant peuvent être également reportées sur d'autres systèmes de conduites [6].

La fiche de travail est étroitement liée à la norme SN EN ISO 9001[95], qui est issue d'une considération approfondie de l'intégration des exigences des clients et de leur satisfaction. La fiche de travail FW 401 partie 17 de l'AGFW doit par conséquent être considérée comme recommandation d'aménagement de la norme SN EN ISO 9001.

L'exécution conformément à la norme SN EN ISO 9001 et l'utilisation des checklists sont en principe exigées en fonction de la situation (p. ex. secteur public), sinon vivement recommandées.

Dans la fiche de travail FW 401 partie 17, l'AGFW a élaboré des checklists indiquant les mesures relatives à l'assurance qualité à mettre en place selon les étapes du projet de construction. On sollicite à cette occasion le donneur d'ordre ou la personne qu'il a mandatée, en tant qu'initiateur d'un projet de construction et le mandataire comme p. ex. l'entrepreneur de travaux publics ou le constructeur de conduites.

Tableau 6.1 Extrait des checklists pour le donneur d'ordre et le mandataire conformément à [100] divisé en catégories d'exécution.

Catégorie	Activités de vérification
Préparation du projet	Planification et sélection du concept de pose approprié, exhaustivité de la documentation d'exécution, demandes et adjudication, contrôle de l'exécution, etc.
Génie civil	Sécurité routière assurée par le fournisseur, création de tranchées, transfert au fabricant de conduites, réfection des chaussées, etc.
Fabrication de conduites	Vérification des conduites et divers. Matériaux, pose de conduites et montage, attestation de qualité de fabrication des joints de soudure, attestation d'étanchéité,
Pose de manchons	Vérification des qualifications du personnel technique, pose de manchons et coussins de dilatation, réception de l'installation de conduites et de la pose de manchons,
Clôture du projet	Réception globale des travaux exécutés (donneur d'ordre et fournisseur), exhaustivité de la documentation, transfert à l'exploitation

Tableau 6.2 Planifications et normes valables en Suisse, en Allemagne, en Autriche et déroulement de projet optimisé pour le Guide de planification du chauffage à distance. Les normes recourent à différents termes et chaque planification présente même des disparités.

Suisse	Allemagne	Autriche	Guide de planification Chauffage à distance
Règlement SIA 108 [80] Edition 2014 Phases et phases partielles	HOAI [62] 4. Edition révisée 2013 Phases de travail	Conditions générales du bureau technique – Ingenieurbüros Österreichs [63]	Phases du projet
1 Planification stratégique 11 Enoncé des besoins, stratégies de solution	1. Analyse de base		(Guide ASCAD)
2 Etudes préliminaires 21 Définition du projet, étude de faisabilité 22 Procédure de sélection	2. Planification préalable (préparation du projet et pré-planification)	1. Planification préalable (préparation du projet et pré-planification)	1. Etude préliminaire
3 Etude de projet 31 Projet préliminaire	3. Etude préliminaire (planification de l'intégration système)	2. Etude préliminaire (planification de l'intégration système)	2. Planification préliminaire
32 Projet de construction 33 Procédure d'autorisation, projet de mise à l'enquête 4 Appel d'offres 41 Appel d'offres, comparaison des offres, proposition d'adjudication (création de la documentation d'appel d'offres)	4. Planification d'autorisation 5. Plan d'exécution 6. Préparation de l'adjudication 7. Participation à l'adjudication	3. Planification de permis (demande de permis) 4. Plan d'exécution 5. Préparation de l'adjudication 6. Participation à l'adjudication	3. Planification, appel d'offres et adjudication
5 Phase de réalisation 51 Plan d'exécution 52 Exécution 53 Mise en service, conclusion	8. Surveillance (supervision des travaux)	7. Supervision des travaux (surveillance des travaux), réception, audit 8. Réception	4. Exécution et réception
6 Exploitation 61 Exploitation, optimisation de l'exploitation 62 Conservation	9. Réception des travaux et documentation	9. Audit	5. Optimisation de l'exploitation
			6. Exploitation et gestion

6.3 Différences entre le règlement SIA 108 et le guide de planification chauffage à distance

Le Tableau 6.2 indique les termes des planifications pour différentes normes en Suisse, en Allemagne et en Autriche, ainsi que l'utilisation des termes dans le présent Guide de planification du chauffage à distance (PLH FW).

Les principales différences entre le règlement SIA 108 et la planification du présent Guide de planification du chauffage à distance sont les suivantes:

- La planification stratégique (SIA 108 Phase 1) est couverte par le Guide de l'Association Suisse du Chauffage à Distance (ASCAD). Le Guide de planification du chauffage à distance augmente essentiellement en Phase 2 conformément au règlement SIA 108 (Phase 2 Etude préliminaire).
- Dans le Guide de planification du chauffage à distance, les phases Projet de construction et Appel d'offres sont regroupées dans une phase (Phase 3 Planification, Appel d'offres et Adjudication) conformément au règlement SIA 108.
- La phase Exploitation (SIA 108 Phase 6) se divise en deux phases dans le Guide de planification du chauffage à distance: la Phase 5 Exploitation et la Phase 6 Exploitation et gestion.

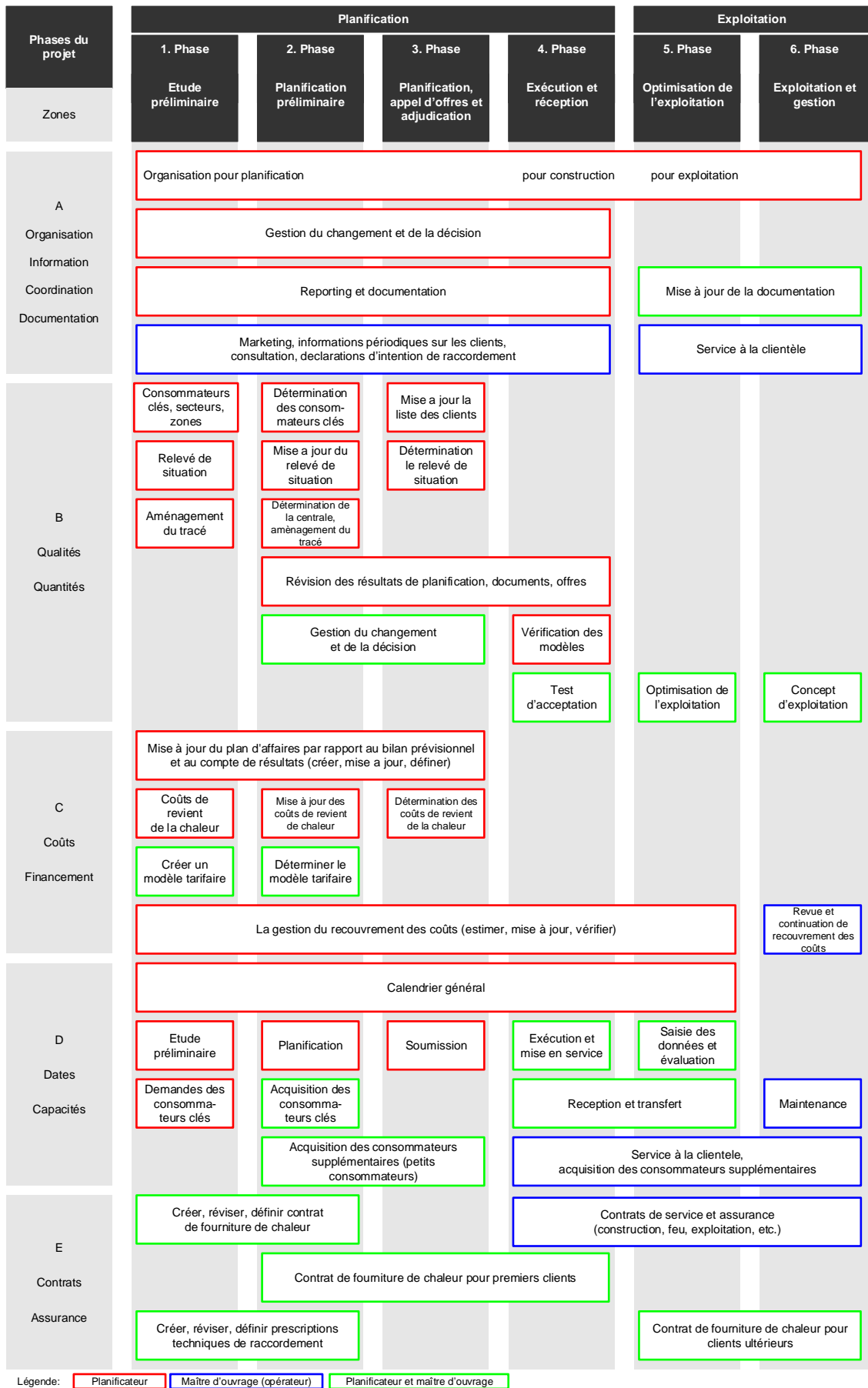


Fig. 6.1 Aperçu du déroulement du projet

6.4 Phase 1: Etude préliminaire

L'**Etude préliminaire** vise à élaborer des déclarations contraignantes relatives à la faisabilité, aux risques et aux avantages. Des **objectifs** clairement définis et un **relevé de situation** en constituent les bases.

Le relevé de situation a pour but de concevoir les fondements de conception et la base décisionnelle d'un réseau de chauffage à distance optimal du point de vue technique et économique. Il convient de trouver, notamment dans un processus itératif, la structure de réseau optimale pour chaque étape des travaux éventuelle et finalement pour l'installation finale. Ainsi en se basant sur cette analyse de situation, la distribution de chaleur et le transfert de chaleur peuvent être idéalement conçus. L'avancement du projet détermine les points suivants:

1. Zone d'approvisionnement en chaleur
2. Pour chaque consommateur de chaleur divisé en chaleur industrielle, eau chaude, chauffage de processus:
 - a) besoin de chaleur,
 - b) appels de puissance thermique,
 - c) niveau de température nécessaire.
3. Besoin de chaleur annuel ensemble de l'installation
4. Courbe caractéristique de charge ensemble de l'installation
5. Courbe annuelle appels de puissance thermique ensemble de l'installation
6. Structure du réseau de chauffage
7. Détermination du système de conduites
8. Coûts de revient de la chaleur.

D'autres travaux importants se déroulent généralement en parallèle et ne sont pas en relation directe avec l'examen technique. Ils sont:

- marketing et service à la clientèle,
- acquisition de consommateur de chaleur et demande de déclarations d'intention de raccordement,
- contrats,
- gestion des coûts (plan d'affaires et planification des comptes).

Les points et travaux mentionnés ne sont pas toujours attribués à une phase. Pour partie, les phases des travaux doivent être poursuivies, mises à jour et concrétisées. Selon le projet, le déroulement doit éventuellement être modifié.

Les chapitres suivants présentent les différentes missions.

6.4.1 Zone d'approvisionnement en chaleur potentielle

Une zone d'approvisionnement en chaleur potentielle est par exemple une agglomération, une partie d'agglomération, un quartier, plusieurs grands consommateurs

ou un grand consommateur unique avec les quartiers environnants. La répartition de chaque zone d'approvisionnement en chaleur potentielle en différentes zones repose sur la densité de consommation de chaleur attendue des types de bâtiments (maison individuelle, industrie, zones d'immeubles locatifs, etc.) ou sur les caractéristiques géographiques comme les rues, les lignes de chemin de fer ou les cours d'eau. Les zones peuvent être traitées de manière simplifiée comme de grands consommateurs. La répartition d'une agglomération s'effectue à l'aide d'un plan et d'un cadastre, le cas échéant.

Il est primordial d'identifier les **consommateurs clés** dans un secteur pour réussir à les raccorder au réseau de chauffage à distance. Les consommateurs clés se caractérisent par des besoins énergétiques et une demande de puissance relativement élevés (p. ex. > 50 kW pour 2000 h/a). Exemples:

- Industrie avec chaleur industrielle
- Zones d'immeubles locatifs
- Centres de villages ou centres-villes
- Zones en construction densifiée.

Une zone ou un secteur ne peut être raccordé de manière optimale et économique à un réseau de chauffage à distance qu'avec des consommateurs clés, c'est pourquoi la procédure suivante est recommandée:

1. définir des consommateurs clés dans un secteur potentiel,
2. engager contractuellement les consommateurs clés (une déclaration d'intention offre une sécurité de planification),
3. définir l'aménagement du tracé potentiel (structure du réseau),
4. acquérir d'autres clients potentiels le long du tracé.

La **densité de consommation de chaleur** constitue une mesure de qualification d'une zone pour le raccordement au réseau de chauffage à distance (voir Tableau 6.3). Elle permet de comparer les besoins annuels en chaleur de tous les bâtiments avec la surface du terrain de la zone:

$$\text{Densité de consommation de chaleur [kWh/(a m}^2\text{)]} = \frac{\text{Consommation de chaleur annuelle des consommateurs d'une zone [kWh/a]}}{\text{Surface de zone [m}^2\text{]}}$$

Les points suivants s'appliquent pour la densité de consommation thermique:

- Les lotissements de maisons individuelles ne sont en général pas intéressants (densité de consommation thermique 15 – 30 kWh/a m²).
- Les zones intéressantes sont les zones d'immeubles locatifs, les centres des villages et les centres-villes ou les zones en construction densifiée (zones urbaines).
- La rentabilité d'un réseau de chauffage à distance peut être améliorée, si les grands consommateurs

situés dans les zones ou à proximité (consommateurs clés) peuvent être intégrés.

- Un réseau de chauffage à distance à destination uniquement des grands consommateurs ne présente un intérêt que si les zones environnantes se caractérisent par une forte densité de consommation thermique.
- Les grands consommateurs doivent être rattachés à un réseau de chauffage à distance s'ils sont proches les uns des autres.

Tableau 6.3 Densité de raccordement recommandée d'une zone comme critère de qualification [21].

Pertinence du chauffage à distance	Densité de consommation thermique kWh/(a m ²)
Inapproprié	< 50
Partiellement approprié	50 – 70
Approprié	> 70

En fonction de la situation, même avec des coûts d'investissement et de combustible faibles, des zones caractérisées par une densité de consommation thermique faible de 70 kWh/(a m²), comme dans le Tableau 6.3, peuvent aussi être déclarées comme appropriées et être approvisionnées en chauffage à distance de manière rentable. Il faut cependant le démontrer à l'aide d'un bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel (calcul des coûts globaux).

6.4.2 Enquête consommateurs clés

L'enquête auprès des consommateurs clés doit clarifier l'intérêt au raccordement et mettre à disposition les données de planification. Il est fréquent pour des bâtiments existants ou des constructions particulières qu'aucune donnée appropriée ne soit disponible ou que leur collecte s'avère fastidieuse. L'étude préliminaire ne doit pas y consacrer trop d'efforts. Les questions orales et les estimations sont à privilégier.

Pour une **estimation grossière de la densité de consommation thermique** dans une zone d'approvisionnement en chaleur, il est possible de réaliser une évaluation des besoins annuels en chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude de chaque bâtiment. Pour ce faire, on a recours aux méthodes suivantes:

- Estimation des besoins annuels en chaleur à l'aide de la surface de référence énergétique SRE et la qualité des bâtiments. A cela s'ajoutent les besoins en chaleur spécifiques pour le chauffage et les besoins de chaleur spécifiques pour l'eau chaude (voir Tableau 6.4) qui sont multipliés par la surface de référence énergétique:

$$Q_G = EBF (q_H + q_{WW})$$

Q_G Besoins annuels en chaleur du bâtiment en kWh/a

EBF Surface de référence énergétique en m² (SRE)

q_H Besoins en chaleur spécifiques pour le chauffage en kWh/(a m²)

q_{WW} Besoins de chaleur spécifiques pour l'eau chaude en kWh/(a m²)

- Estimation des besoins annuels en chaleur à l'aide du volume du bâtiment et de la qualité du bâtiment. Conformément au Tableau 6.5, les appels de puissance thermique spécifiques d'un bâtiment sont multipliés par le plan de sol chauffé, la hauteur de l'étage (contrôle visuel sur site) et les heures d'exploitation à pleine charge conformément au Tableau 6.6. Le nombre d'heures d'exploitation à pleine charge des complexes scolaires, des bâtiments industriels, des commerces et des bureaux doit être pondéré par la baisse des week-ends et jours fériés d'environ 15%.

La **courbe caractéristique de charge** et la **courbe annuelle** pour la zone d'approvisionnement en chaleur potentielle sont déterminées sur la base de questionnaires et de diverses estimations concernant le besoin de chaleur. QM Chauffages au bois peut recommander l'utilisation du tableau Excel relatif au relevé de situation disponible gratuitement.

Tableau 6.4 Besoins en chaleur spécifiques pour le chauffage et les besoins de chaleur spécifiques pour l'eau chaude et régions de Suisse [23].

Lieu	Besoins en chaleur pour le chauffage spécifiques [kWh/(a m ²)]			EC [kWh/(a m ²)]
	15°C	13°C	11°C	
Limite de chauffage				-
Plateau (Zurich) 300...800 mètres au-dessus de la mer	60-100	30-60	20-40	20
Montagne (Davos) 800...1800 mètres au-dessus de la mer	75-120	35-75	25-45	20
Suisse méridionale (Locarno) 200...600 mètres au-dessus de la mer	50-85	25-50	20-35	20

Tableau 6.5 Appels de puissance thermique spécifiques des différents types de bâtiments (basés sur la valeur moyenne journalière sans considération des pics de chauffage) [21].

Types de bâtiments	Appels de puissance thermique spécifiques W/m ³
Habitations isolées de manière conventionnelle	20 – 27
Habitations existantes bien isolées	15 – 20
Nouvelles constructions conformes aux prescriptions actuelles	8 – 15
Bâtiments de service traditionnels	23 – 30
Ateliers, locaux de production ou entrepôts de stockage	10 – 20

Tableau 6.6 Heures d'exploitation à pleine charge pour les bâtiments existants (chauffage des locaux et eau chaude). Valeurs empiriques de longue date pour des bâtiments ayant des limites de chauffage différentes et situés dans différentes régions en Suisse [23].

Lieu	Heures d'exploitation à pleine charge [h/a]		
	15°C	13°C	11°C
Plateau (Zurich) 300...800 mètres au-dessus de la mer	2000 – 2500	1600 – 2000	1300 – 1700
Montagne (Davos) 800...1800 mètres au-dessus de la mer	2300 – 2800	1900 – 2300	1600 – 2000
Suisse méridionale (Locarno) 200...600 mètres au-dessus de la mer	1700 – 2200	1400 – 1700	1400 – 1800

6.4.3 Zone d'approvisionnement en chaleur actualisée

Afin de ne pas compromettre l'exploitation économique du réseau de chaleur à distance, les zones inappropriées présentant une densité de consommation de chaleur < 50 kWh/a m² sont dans un premier temps éliminées. Seule subsiste la zone d'approvisionnement en chaleur potentielle.

Des zones connexes avec une densité de consommation thermique élevée sont sélectionnées pour équipement. Le site du générateur de chaleur et la situation du réseau de chauffage y sont déterminés afin que le réseau de conduites reste le plus court possible. Si, en raison de la situation du réseau de chauffage (tracé), l'équipement des consommateurs de chaleur individuels s'avère défavorable en dépit d'un intérêt au raccordement, ces derniers doivent être potentiellement exclus ou être uniquement pris en compte pour une phase de développement ultérieure. Il reste de la zone d'approvisionnement en chaleur initiale potentielle la zone d'approvisionnement en chaleur appropriée pour l'équipement.

Les besoins annuels en chaleur sont estimés en supposant un **degré d'équipement** de 50% à 80% de la zone d'approvisionnement en chaleur appropriée.

Un **facteur de simultanéité** doit en plus être pris en compte pour les appels de puissance thermique. Dans un groupement de divers consommateurs de chaleur, il décrit l'effet selon lequel, en pratique, l'ensemble des consommateurs ne bénéficient à aucun moment simultanément de la puissance maximale. Décrit comme simultanéité, cet effet représente une grandeur de base pour le dimensionnement du réseau de distribution de chaleur et pour la conception du générateur de chaleur. Le facteur de simultanéité décrit le rapport entre le besoin

de chaleur maximal simultané de tous les consommateurs de chaleur et la puissance de raccordement convenue totale [40]:

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i(t_{\max})}{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{N_i}(t)}$$

$\dot{Q}_i(t_{\max})$ Puissance consommée du consommateur de chaleur i au moment de la demande de puissance maximale en kW

$\dot{Q}_{N_i}(t)$ Puissance nominale convenue du consommateur de chaleur i en kW

n Nombre de consommateurs de chaleur

$g \leq 1$ s'applique donc pour le facteur de simultanéité. Dans Fig. 6.2, le facteur de simultanéité est représenté comme une fonction d'ajustement en fonction du nombre de clients raccordés en se basant sur une enquête de l'année 2001 [40]. Pour 10 à 20 consommateurs de chaleur il faut compter une simultanéité d'environ 95% dans une plage de variation de 85% à 100%. Il est possible de se baser sur une simultanéité approximative de 60% pour des groupements comptant plus de 100 consommateurs de chaleur.

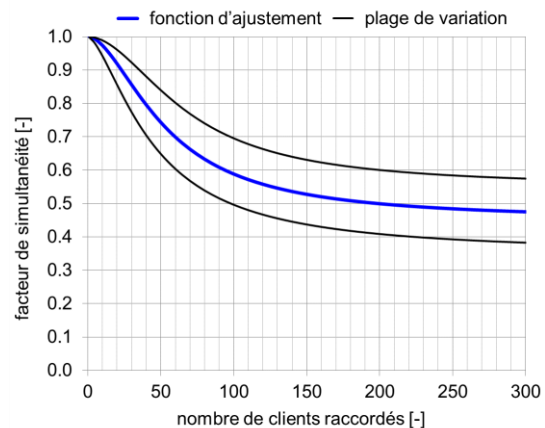


Fig. 6.2 Fonction d'ajustement et plage de variation pour l'évolution du facteur de simultanéité en fonction du nombre de clients raccordés [40].

La **structure d'abonnés** des consommateurs de chaleur est primordiale pour déterminer la simultanéité. Des consommateurs de chaleur industrielle permanents faisant partie d'un groupement entraînent une simultanéité plus élevée comme c'est le cas par exemple d'une maison individuelle. D'éventuelles limitations de puissance soutirée dans les conditions techniques de raccordement (TAB) engendrent également un facteur de simultanéité plus important, alors que des consommateurs temporaires ou saisonniers réduisent la simultanéité. D'autre part, une charge de pointe saisonnière peut provoquer des facteurs de simultanéité plus élevés, par exemple en période de congés dans les stations de sports d'hiver correspondant à une occupation maximale des hôtels et des résidences de vacances. L'estimation

de la simultanéité repose donc sur une solide expérience et ne doit pas être sous-estimée.

En cas d'utilisation du tableau Excel correspondant au relevé de situation évoqué dans le chapitre 6.4.2 par QM Chauffages au bois, il faut souligner qu'aucun facteur de simultanéité n'est appliqué car le choix du système et la conception du générateur de chaleur se basent sur une moyenne journalière de la demande de puissance, où la demande de puissance est prise en compte de manière semblable au facteur de simultanéité.

Le dimensionnement de chaque section de ligne s'effectue sur la base d'une chute de pression maximale pour les branches individuelles de 250 à 300 Pa/m, selon le chapitre 7.3.

6.4.4 Première observation économique

Pour les réseaux de chauffage à distance, on parle d'exploitation rentable, lorsque les recettes de la vente de chaleur excèdent les coûts de revient de la chaleur issus des coûts d'investissement et d'exploitation. La **densité de raccordement** constitue un indicateur essentiel pour estimer la rentabilité d'un réseau de chauffage à distance. La densité de raccordement correspond au rapport entre la quantité de chaleur vendue annuellement en MWh/a et la longueur totale du tracé des conduites principales, des conduites de distribution et des conduites de raccordement domestique en mètres:

$$\text{Densité de raccordement [MWh/(a m)]} = \frac{\text{Besoins en chaleur annuelle des consommateurs [MWh/a]}}{\text{Longueur totale du tracé [m]}}$$

Etant donné que la densité de raccordement sert à caractériser le réseau de chauffage à distance, les consommateurs ne doivent pas être impliqués directement dès la centrale thermique, par exemple pour la consommation propre sur le site de la centrale thermique.

Les zones d'approvisionnement en chaleur avec une densité de raccordement < 2 MWh/(a m) dans l'installation finale ne sont généralement pas intéressantes dans le cadre d'une analyse sommaire sans connaissances précises des conditions limites.

Tableau 6.7 Densité de raccordement recommandée pour le maintien de la valeur cible des coûts d'investissement spécifiques [21].

Statut de développement	Densité de raccordement distribution de chaleur	
	Conditions favorables	Conditions défavorables
	MWh/(a m)	MWh/(a m)
Première étape de développement	> 0.7	> 1.4
Installation finale	> 1.2	> 2.0

D'autres conditions limites comme des recettes réalistes et des aides à l'investissement peuvent également influencer la rentabilité. En cas de sources de chaleur ou de conditions de construction plus favorables, des densités de raccordement plus faibles peuvent également favoriser une exploitation rentable (Tableau 6.7). Il faut cependant le démontrer à l'aide d'un bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel (calcul des coûts globaux).

Le raccordement de **petits consommateurs** à proximité ou le long d'un tracé est en principe anodin au regard de la rentabilité. Par contre, le fait qu'un petit consommateur se trouve très éloigné de la prochaine conduite principale ou conduite de dérivation réduit la densité de raccordement, engendrant un raccordement correspondant moins avantageux dont la vérification spécifique est requise. En tout état de cause, le raccordement peut être synonyme d'une participation aux éventuels coûts de raccordement supplémentaires ou d'une augmentation du prix du chauffage.

QM Chauffages au bois [21] formule des recommandations relatives à la densité de raccordement (Fig. 6.3) en rapport avec les **coûts d'investissement**.

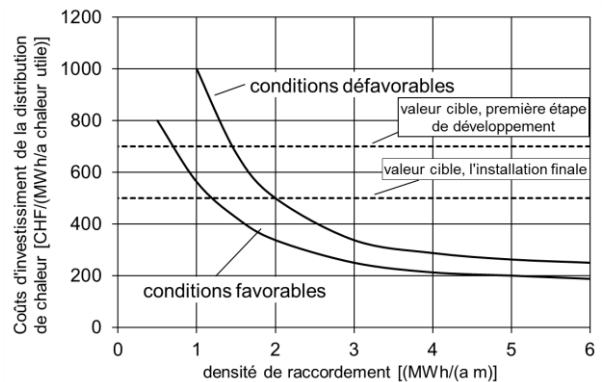


Fig. 6.3 Coûts d'investissement spécifiques de la distribution de chaleur en fonction de la densité de raccordement. Gamme de valeurs types selon [21] (converties en CHF). Les coûts pour les groupes de circuit de chauffage à distance sont inclus dans la centrale thermique, le réseau du circuit de chauffage à distance et avec station de transfert (sans chaufferie).

Des coûts d'investissement spécifiques pour la distribution de chaleur d'environ 700 CHF/(MWh/a) sont recommandés pour la première étape de développement. Ils doivent encore se monter à environ 500 CHF/(MWh/a) dans l'installation finale. Ces recommandations doivent généralement rester inférieures à 25%.

Les conditions et les coûts pour la pose de conduites de chauffage à distance en milieu rural s'avèrent en principe plus avantageux qu'en ville. De plus, la nature du sol peut aussi entraîner des coûts supplémentaires (Tableau 6.8).

Tableau 6.8 Effets des conditions-cadres sur les coûts d'investissement spécifiques de la distribution de chaleur et de la rentabilité [21].

	Conditions favorables	Conditions défavorables
Difficultés de construction	faibles	élevées
Niveau de prix local	bas	élevé
Progression de l'équipement	rapide	lente
Aides à l'investissement	élevées	faibles
Recettes réalisables	élevées	faibles

Les **pertes thermiques de distribution** représentent également une valeur caractéristique importante impactant la rentabilité et dépendant des facteurs suivants:

- Dimensionnement des conduites
- Epaisseur d'isolation des conduites
- Niveau de température amenée et retour
- Densité de raccordement
- Durée d'exploitation (exploitation à l'année ou saisonnière).

Dans le cadre de l'exploitation, les pertes thermiques de distribution sont déterminées comme la différence entre la quantité de chaleur mise à la disposition du réseau de chauffage par le générateur de chaleur et la quantité de chaleur acquise par tous les consommateurs de chaleur (voir chapitre 7.1.4).

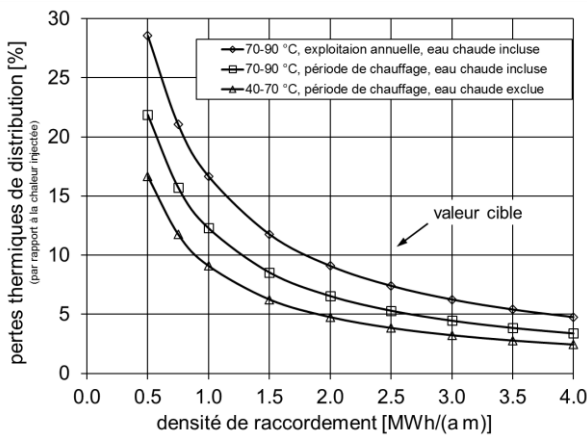


Fig. 6.4 Pertes thermiques de distribution en fonction de la densité de raccordement pour différents modes de fonctionnement et différentes températures d'amenée [21].

L'image Fig. 6.4 indique les pertes thermiques de distribution en fonction de la densité de raccordement pour différents modes de fonctionnement et différentes températures d'amenée. Les pertes ne doivent pas excéder la valeur cible de 10% du besoin de chaleur utile des consommateurs de chaleur, ce qui correspond généralement à une perte de distribution de chaleur d'environ 9% par rapport à la chaleur injectée dans le réseau. Afin d'atteindre la valeur cible selon Fig. 6.4, il convient de respecter les densités de raccordement indiquées dans Tableau 6.9 en fonction du mode de

fonctionnement, du niveau de température et des coûts d'investissement.

Tableau 6.9 Densité de raccordement recommandée de la distribution de chaleur pour le maintien de la valeur cible des pertes thermiques de distribution de $\leq 10\%$ selon Fig. 6.4 [21].

Température d'amenée	Mode de fonctionnement	Densité de raccordement MWh/(a m)
70-90°C	Exploitation annuelle, eau chaude incluse	> 1.8
70-90°C	Période de chauffage, eau chaude incluse	> 1.3
70-90°C	Période de chauffage, eau chaude exclue	> 0.8

Si les pertes thermiques de distribution annuelles dans l'installation finale (après correction climatique) sont supérieures à 10%, il faut essayer en priorité d'augmenter la densité de raccordement. Ainsi ce ne sont pas seulement les rejets de chaleur du réseau qui sont réduits, mais la rentabilité générale qui est également améliorée. S'il est impossible d'atteindre la valeur cible relative aux pertes thermiques de distribution, des rejets de chaleur peuvent éventuellement être convenus avec le maître d'ouvrage. Il faut alors vérifier l'effet à long terme des rejets de chaleur, avant tout au regard de potentielles augmentations de prix des combustibles.

L'**offre d'énergie** doit être déterminée pour une première évaluation de la rentabilité des coûts de revient de la chaleur. En ce qui concerne le potentiel, la disponibilité, la qualité, la teneur en énergie et le prix, l'offre doit reposer sur les sources suivantes: rejets de chaleur, bois, chaleur environnante, gaz naturel, huile de chauffage.

Il convient de demander aux fournisseurs de combustibles concernés les offres relatives au potentiel disponible à l'année, à la teneur en énergie et au prix du combustible. Suite aux calculs des besoins en combustible annuels, les coûts de combustible peuvent être estimés au moyen du taux d'utilisation annuel du générateur de chaleur et des pertes thermiques de distribution.

Sur la base des **coûts de revient de la chaleur** moyens pour le générateur de chaleur, la distribution de chaleur et le combustible, les différentes variantes peuvent être comparées et évaluées dans l'étude préliminaire (voir chapitre 9.3).

En plus d'une analyse des besoins annuels en chaleur et des appels de puissance thermique, une évaluation de la situation financière est nécessaire afin d'estimer précisément la rentabilité d'une entreprise de chauffage à distance. A l'aide d'un plan d'affaires standardisé et d'un bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel, cette analyse de situation permet de déduire les coûts de revient de la chaleur et les coûts annuels pour une durée d'exploitation de 20 ans, par exemple.

La précision des coûts s'élève en phase 1 (étude préliminaire) généralement à $\pm 25\%$.

Tableau 6.10 Checklist phase 1 – Etude préliminaire

Contrôle	Checklist phase 1 - Etude préliminaire	Remarques
Zone d'approvisionnement en chaleur potentielle		
	Déterminer les consommateurs clés potentiels > 50 kW (p. ex. industrie avec chaleur industrielle, bâtiments publics et complexes en construction densifiée, etc.)	
	Utilisation de bases de données du cadastre comme p. ex. webGIS, plan directeur des cantons, etc.	
	Saisie des zones d'approvisionnement en chaleur présentant une densité de consommation de chaleur suffisamment élevée ($\geq 70 \text{ kWh/m}^2$)	
	Saisie de l'offre d'énergie locale et régionale	
	Prise en compte du concept d'énergie cantonal et communal (p. ex. Plans directeurs d'énergie cantonaux, Modèle de prescriptions énergétiques des cantons MoPEC)	
Enquête consommateurs clés (les chiffres suivants sont-ils disponibles?)		
	Intérêt au raccordement: Oui / Non	
	Date de raccordement éventuelle	
	Besoins annuels en chaleur a en kWh/a répartis selon le chauffage des locaux, l'eau chaude et la chaleur industrielle	
	Puissance de raccordement en kW	
	Surface de référence énergétique SRE en m ²	
	Niveau de température nécessaire en °C	
Zone d'approvisionnement en chaleur actualisée		
	Détermination des consommateurs clés et de la zone d'approvisionnement en chaleur	
	Estimation du potentiel des autres petits consommateurs de chaleur (puissance de raccordement < 50 kW)	
	Détermination de la courbe caractéristique de charge et de la courbe annuelle (p. ex. tableau Excel du relevé de situation de QM Chauffages au bois)	Voir aussi chapitre 2.3
	Evaluation du site de la centrale thermique (plusieurs variantes éventuelles)	
	Evaluation de l'aménagement du tracé des conduites principales et des conduites de dérivation (plusieurs variantes éventuelles)	
	Dimensionnement des conduites de chauffage à distance (chute de pression max. ligne partielle 250 à 300 Pa/m)	conformément au chapitre 7.3
Première observation économique		
	Détermination de la densité de raccordement	
	Estimation des pertes thermiques de distribution	Voir aussi chapitre 7.1
	Estimation des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation ($\pm 25\%$)	Voir aussi chapitre 9.2
	Estimation des coûts de revient de la chaleur basés sur l'offre d'énergie	Voir aussi chapitre 9.3
	Détermination des tarifs nécessaires	Voir aussi chapitre 5.3.3
Décision		
	Décision relative au développement du projet (processus itératif)	
	Transfert en planification préliminaire	

6.5 Phase 2: Planification préliminaire

Les estimations effectuées dans l'étude préliminaire se concrétisent dans le cadre de la planification préliminaire. L'objectif consiste à pouvoir choisir entre une ou plusieurs variantes économiquement acceptables.

Concernant le relevé de situation de la planification préliminaire, une base de données des consommateurs de chaleur potentiels est élaborée à des fins de calculs et d'optimisation du réseau de chauffage. Elle sera mise à jour lors des étapes ultérieures d'étude de projet et gagnera en précision.

Et à partir de là, la zone d'approvisionnement en chaleur se concrétise (sites des centrales thermiques et aménagements des tracés). Sur la base des conditions limites, un système de conduites approprié est évalué et dimensionné.

Ce faisant, une deuxième approche économique est réalisée. Concernant la sécurité de planification ultérieure, il convient d'assurer dès le début du chantier un degré de couverture des ventes annuelles d'énergie le plus élevé possible par le biais d'une garantie écrite (contrats de fourniture de chaleur signés ou déclarations d'intention).

6.5.1 Concrétisation des consommateurs clés

Concernant l'enquête auprès des consommateurs clés et d'autres consommateurs de chaleur potentiels, le questionnaire figurant en annexe peut être pris comme modèle ou directement utilisable (chapitre 14). Le questionnaire comprend entre autres les points suivants:

- Intérêt au raccordement: immédiatement, dans les 5 prochaines années, ultérieurement, aucun raccordement.
- Informations relatives aux appels de puissance thermique et aux besoins annuels en chaleur pour le chauffage des locaux, l'eau chaude et la chaleur industrielle
- Informations relatives au générateur de chaleur actuel (combustible, année de construction, rendement, consommation)
- Informations relatives au système de préparation d'eau chaude (électrique décentralisé, centralisé sur chaudière, exploitation hivernale et estivale)
- Informations relatives à l'installation domestique (nombre de circuits de chauffage, radiateurs, chauffage au sol, températures)
- Niveau de température nécessaire
- Informations relatives aux intentions en matière de rénovation
- Surface de référence énergétique.

Concernant la planification, il est préférable de créer une feuille de calcul, d'élaborer un jeu de données pour chaque consommateur dans une zone d'approvisionnement en chaleur éventuelle et de vérifier la plausibilité des données. Le tableau représente un instrument de

planification central qui est mis à jour et complété en continu lors de la planification ultérieure.

Le maître d'ouvrage est responsable de l'attribution d'un état des consommateurs et d'une date de raccordement. Au fur et à mesure de l'avancement du projet, il convient d'assurer un degré de couverture des ventes annuelles d'énergie le plus élevé possible par le biais de contrats de fourniture de chaleur signés ou de déclarations d'intention. Il est recommandé dès le début du chantier de garantir contractuellement 70% des ventes annuelles d'énergie.

6.5.2 Enquête petits consommateurs

Les petits consommateurs potentiels se distinguent par le fait que leur raccordement n'influence pas de manière négative la densité de raccordement. Le questionnaire peut également être utilisé pour l'enquête auprès des petits consommateurs. Ils ne devraient cependant être questionnés qu'en cas de proposition du consommateur clé.

6.5.3 Détermination de la zone d'approvisionnement

La zone d'approvisionnement en chaleur peut être déterminée sur la base de l'enquête auprès des consommateurs clés et des petits consommateurs.

Concernant la zone d'approvisionnement il s'agit à présent de trouver un **site adapté pour la centrale thermique** et de définir l'aménagement du tracé. Un site au centre de la zone d'approvisionnement permettant de courtes sections de conducteurs est avantageux économiquement.

Il faut veiller à un minimum de changements de direction et de dérivations lors de l'**aménagement du tracé**. Le chapitre 4 contient d'autres recommandations. Le dimensionnement de chaque section de puissance repose sur une chute de pression maximale pour les branches individuelles de 250 à 300 Pa/m dans l'installation finale prévue et à la température de conception (voir chapitre 7.3). Les aspects suivants doivent également être pris en compte et précisés sur la base de l'aménagement du tracé:

- Droits de passage
- Obstacles, traversées (voies, fleuve, etc.)
- Coordination avec conduites de services industriels

6.5.4 Deuxième observation économique

Alors que l'évaluation économique des variantes dans la planification préliminaire repose sur des coûts de revient moyens de la chaleur, cela n'est pas suffisant pour la suite de la procédure: en effet des pertes au cours de la première année d'exploitation ne sont pas compensées par les bénéfices les années suivantes et peuvent entraîner des problèmes de liquidités. Ainsi pour le développement de l'entreprise, un bilan prévisionnel et

compte de pertes et profits prévisionnel doivent être établis pour chaque année de la période d'observation.

Le planificateur ou le maître d'ouvrage peut effectuer cette mise au point, c'est pourquoi la répartition des tâches doit s'organiser le plus tôt possible. Les données spécifiques au projet ayant une influence déterminante sur la rentabilité, comme la structure et la densité de raccordement du réseau de chauffage, doivent toutefois être élaborées par le planificateur et être disponibles pour l'étude de rentabilité. Les contrôles de rentabilité ne devraient pas seulement être effectués lors de la phase de planification, mais être maintenus durant le temps de service de la centrale thermique et être vérifiés à la suite d'éventuelles optimisations de coûts. L'exactitude des coûts lors de la phase 2 (planification préliminaire) s'élève en général à $\pm 15\%$.

6.5.5 Acquisition

L'acquisition de consommateurs de chaleur relève en principe de la mission du maître d'ouvrage ou de l'opérateur de l'installation, mais peut aussi être déléguée au planificateur. Cependant il faut veiller à ce qu'après la reprise de l'installation, l'opérateur ne soit pas seul en charge du marketing, du service à la clientèle, du conseil et de l'acquisition des nouveaux clients. C'est pour cette raison qu'il est particulièrement recommandé aux nouveaux opérateurs de réseaux de chauffage à distance de préparer ces tâches en amont. En effet, le marketing et la prospection, jusqu'à la conclusion des contrats, constituent des tâches qui peuvent prendre beaucoup de temps.

Tableau 6.11 Checklist phase 2 – Planification préliminaire

Contrôle	Checklist phase 2 - Planification préliminaire	Remarques
Concrétisation des consommateurs clés		
	Concrétisation des conditions de raccordement des consommateurs clés (faire approuver à l'aide du questionnaire)	Voir aussi chapitre 14
	Vérification de la plausibilité des données	
	Précision du site, du type et de l'étendue de la station de transfert (p. ex. rénovation de centrales énergétiques existantes)	
	Développement futur du besoin de chaleur (intentions en matière de rénovation, dates, etc.)	Ces informations devraient être tirées du questionnaire; voir aussi chapitre 2.4
Enquête petits consommateurs (les chiffres suivants sont-ils disponibles?)		
	Intérêt au raccordement: Oui / Non	
	Date de raccordement éventuelle	
	Besoins annuels en chaleur a en kWh/a répartis selon le chauffage des locaux, l'eau chaude et la chaleur industrielle	
	Puissance de raccordement en kW	
	Surface de référence énergétique SRE en m ²	
	Niveau de température nécessaire en °C	
	Envoi éventuel du questionnaire	Voir aussi chapitre 14
	Développement futur du besoin de chaleur (intentions en matière de rénovation, dates, etc.)	Ces informations devraient être tirées du questionnaire; voir aussi chapitre 2.4
Détermination de la zone d'approvisionnement en chaleur		
	Mise à jour des consommateurs de chaleur	
	Détermination de la zone d'approvisionnement en chaleur	
	Mise à jour de la courbe caractéristique de charge et de la courbe annuelle	
	Détermination du site de la centrale thermique	
	Détermination de l'aménagement du tracé des conduites principales, conduites de dérivation du réseau de distribution de chaleur et conduites de raccordement domestique (demande des droits de passage, saisie des obstacles tels que les intersections, les voies ferrées, les nappes phréatiques, les rivières et coordination avec conduites de services industriels)	Voir aussi chapitres 4.4 à 0
	Evaluation du système de conduites pour les conduites principales, conduites de dérivation du réseau de distribution de chaleur et conduites de raccordement domestique (plusieurs variantes éventuelles)	Voir aussi chapitre 4.3.1.7
	Dimensionnement des conduites de chauffage à distance (chute de pression max. ligne partielle 250 à 300 Pa/m)	Conformément au chapitre 7.3
Deuxième observation économique		
	Création/mise à jour du plan d'affaires par rapport au bilan prévisionnel et au compte de résultats	Voir aussi chapitre 9.5
	Détermination de la densité de raccordement	
	Estimation des pertes thermiques de distribution	Voir aussi chapitre 7.1
	Mise à jour de l'offre d'énergie locale et régionale	
	Estimation des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation ($\pm 15\%$)	Voir aussi chapitre 9.2
	Mise à jour des coûts de revient de la chaleur sur la base de l'offre d'énergie	Voir aussi chapitre 9.3
	Adaptation éventuelle des tarifs requis	Voir aussi chapitre 5.3.3
	Rédaction du contrat de fourniture de chaleur et des prescriptions de raccordement techniques	Voir aussi chapitre 5.3
Décision		
	Décision relative à la mise en place du projet (processus itératif)	
	Transfert dans la phase d'appel d'offres et la phase d'adjudication	

6.6 Phase 3: Planification, appel d'offres et adjudication

La Phase 3 vise à planifier et préparer le projet intitulé «Projet Chauffage à distance» afin de permettre son exécution sans faille. Les missions dans la Phase 3 regroupent les points suivants:

- conception du réseau de chauffage (système de conduites, dimensionnement, etc.),
- spécification des stations de transfert,
- élaboration des plans,
- préparation de l'appel d'offres et demande des offres,
- adjudication en accord avec le maître d'ouvrage,
- aide lors de l'évaluation de la rentabilité.

La condition de réussite de l'exécution d'une commande consiste en une stratégie d'information et de communication claire qui doit être définie par des règles précises. Dans le règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils conformément au règlement SIA 103 [78], les droits et obligations des parties sont clairement réglés lors de la conclusion et lors de l'exécution des contrats par les services d'ingénierie.

6.6.1 Conception du réseau de chauffage

Planification, conception, spécification et calculs du réseau de chauffage:

- Détermination du standard d'exécution du réseau de chauffage
 - choix du système de conduites et standard d'isolation,
 - clarification de la situation de pose et spécification de la procédure de pose,
 - détermination des robinets nécessaires,
 - planification de la transmission des données et de la surveillance des fuites.
- Elaboration des plans
 - plans de situation 1:200/1:500,
 - profil longitudinal,
 - plans détaillés des lignes électriques,
 - profil des tranchées.
- Dimensionnement des sections de puissance
- Conception des pompes de réseau, robinets et divers dispositifs de sécurité
- Création de statique des conduites
- Clarification des droits de passage et demande le cas échéant

6.6.2 Spécification station de transfert

Le concept de transfert de chaleur ou le standard des stations de transfert doit obligatoirement être défini et le calendrier doit être harmonisé avec le projet général. Tous les points techniques correspondants doivent être mentionnés dans les prescriptions techniques (type de raccordement, température de chaleur échangeur

différentiel de l'échangeur de chaleur, résistance à la pression et à la température, dispositifs de sécurité, matériaux, isolation thermique, transmission des données, etc.).

Il faut élaborer un calendrier détaillé de mise en place et se concerter avec le maître d'ouvrage. Il est possible, en fonction de la situation, de s'écarter exceptionnellement des exigences, mais uniquement si cela n'a aucune influence négative p. ex. sur la température retour.

6.6.3 Procédure d'autorisation du permis de construire

La procédure d'autorisation du permis de construire vise à l'obtention du permis de construire. La requête dépend de la compilation du dossier: plans, formulaires, calculs, etc. sont nécessaires. La procédure d'autorisation du permis de construire doit être au préalable réglée avec les autorités communales et cantonales locales. La procédure peut nécessiter jusqu'à 6 mois selon les cantons.

6.6.4 Préparation de l'appel d'offres

Tout d'abord les prestations font l'objet d'un appel d'offres pour les travaux de conduites et de génie civil. Il est possible de soumettre à appel d'offres séparément l'installation de surveillance des fuites ainsi que la réalisation des contrôles de radioscopie (radiographie) des joints de soudure. Concernant les appels d'offres, des spécifications de prestations sont élaborées dans lesquelles doivent impérativement figurer dispositions générales et dispositions particulières. Les appels d'offres incluent les composants ci-dessous ainsi que des documents de planification plus ou moins détaillés:

- Elaboration des plans d'appels d'offres des travaux publics et de la mise en place de conduites
 - pente,
 - matériaux,
 - recouvrement,
 - ouvrages spéciaux (p. ex. puits),
 - étayage,
 - vidange et purge,
 - subdivision en sections (robinets d'arrêt),
 - mesures compensatoires,
 - surépaisseurs des travaux de génie civil et conduites,
- Instructions de soudage des tubes médians, si un contrôle de procédure existe
- Qualifications générales du personnel et justificatifs du personnel qualifié et des entreprises sous-traitantes
- Certificats des soudeurs d'acier et de matières synthétiques, ainsi qu'échantillons de travaux; la même chose s'applique pour les poseurs de manchons, isolation ultérieure comprise.

Les stations de transfert ne font généralement pas partie de l'appel d'offres du réseau de chauffage à distance. Un appel d'offres séparé peut être nécessaire selon l'ampleur de la commande. Dans ce cas, il convient de réaliser un cahier des charges unique.

Grâce au Catalogue des articles normalisés (CAN) [78], l'appel d'offres peut être normalisé et simplifié. Conformément au processus de construction, le CAN est divisé en près de 200 chapitres, tous basés sur la même systématique et lors de la construction, il permet d'élaborer des descriptions de prestations plus claires et plus détaillées. En outre, il constitue un ouvrage de référence ainsi qu'une checklist pour l'établissement du devis. Depuis début 2017, le chapitre 414 du CAN est spécialement consacré aux conduites et robinets dans le domaine du chauffage à distance.

6.6.5 Soumission

Concernant les marchés publics, le type de procédures doit être clarifié au préalable, alors que pour les donneurs d'ordres privés les listes d'entreprises sont clarifiées en général en concertation avec le maître d'ouvrage. La phase de soumission se termine avec le contrôle des offres, leur comparaison ainsi qu'une recommandation d'adjudication au maître d'ouvrage. Un

autre cycle de négociation est éventuellement encore organisé (concernant des appels d'offres non publics).

6.6.6 Troisième observation économique

Le bilan prévisionnel et le compte de pertes et profits prévisionnel sont régulièrement mis à jour. Les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation ainsi que les coûts de revient de la chaleur peuvent être déterminés. Les tarifs valables déjà en partie doivent être contrôlés sur cette base. L'exactitude des coûts lors de la phase 3 s'élève à $\pm 10\%$.

6.6.7 Adjudication

Chaque lot de travail peut être réparti et attribué en fonction des offres présentées. La phase d'exécution commence par la conclusion de la Phase 3 qui se termine par la réception de l'installation.

Tableau 6.12 Checklist phase 3 – Planification, appel d’offres et adjudication

Contrôle	Checklist phase 3 – Planification, appel d’offres et adjudication	Remarques
Conception du réseau de chauffage		
	Détermination du standard d’exécution du réseau de chauffage (système de conduites, épaisseur d’isolation, méthodes et procédures de pose, robinets, transmission des données, surveillance des fuites, etc.)	Voir aussi chapitres 4.3.1.7 et 4.4 jusqu’à 0
	Détermination du dimensionnement des conduites de chauffage à distance (chute de pression max. ligne partielle 250 à 300 Pa/m)	conformément au chapitre 7.3
	Conception des pompes de réseau, robinets et dispositifs de sécurité	Voir aussi chapitres 7.4, 4.3.3, 8.1.5 et 8.1.6
	Création de statique des conduites (calculs du support, recouvrement requis, compensation, points fixes, dilatation, justificatif de capacité de charge statique, etc.)	Voir aussi chapitre 7.5
Spécification station de transfert		
	Température différentielle de l’échangeur de chaleur	conformément au chapitre 8.1.9
	Intégration hydraulique du côté primaire entre fournisseur et client, ainsi que du côté secondaire pour le chauffage des locaux, l’eau chaude et la chaleur industrielle	Voir aussi chapitres 8.4 à 8.6
	Fixation des exigences réglementaires et fiscales	Voir aussi chapitre 8.1.7
	Compteur d’énergie thermique (transmission et surveillance des données)	Voir aussi chapitre 8.1.4
Permis de construire		
	Elaboration des documents pour la demande de permis de construire	
	Clarification de la demande de permis de construire avec les autorités communales et cantonales locales	
	Demande du permis de construire	
Préparation de l’appel d’offres		
	Elaboration des plans d’appel d’offres pour les travaux de génie civil et de conduites (pentes, matériaux, hauteurs de recouvrement, ouvrages spéciaux, étayage, vidange, purge, subdivision en sections et mesures compensatoires)	
	Définition des qualifications générales relatives au personnel et à l’entreprise	
	Appel d’offres séparé éventuel pour la station de transfert	
Soumission		
	Clarification du type de procédure (publique, sur invitation, etc.)	
	Génie civil et mise en place de conduites	
	Station de transfert de chaleur et intégration hydraulique	
	Technique de mesure, de commande et de régulation MCR, système de contrôle, etc.	
	Centrale thermique (générateur de chaleur, distribution, stockage de combustible et disposition, etc.)	
Troisième observation économique		
	Mise à jour du plan d’affaires par rapport au bilan prévisionnel et au compte de résultats	Voir aussi chapitre 9.5
	Détermination des coûts d’investissement et des coûts d’exploitation ($\pm 10\%$)	Voir aussi chapitre 9.2
	Détermination des coûts de revient de la chaleur	Voir aussi chapitre 9.3
	Contrôle des tarifs	Voir aussi chapitre 5.3.3
Adjudication		
	Comparaison des offres et adjudication	

6.7 Phase 4: Exécution et réception

Le réseau de chauffage à distance est construit lors de la Phase 4. A partir des plans d'exécution détaillés, les tranchées sont creusées, les conduites sont posées, soudées et contrôlées. Puis le fonctionnement des sous-systèmes est vérifié et à la fin celui du système global. Les défauts et les perturbations du fonctionnement sont notés en détails et corrigés, avant que l'installation n'entre en service. Même dans cette phase, une stratégie d'information et de communication claire conditionne une exécution sans faille de la commande et doit être définie par des règles précises. Comme déjà mentionné en phase 3, dans le règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils conformément à la norme SIA 103 [78], les droits et obligations des parties sont clairement réglés lors de la conclusion et lors de l'exécution des contrats par les services d'ingénierie.

La réception ou le transfert de l'installation au maître d'ouvrage en constitue la conclusion.

6.7.1 Plans d'exécution

Des plans d'exécution sont élaborés en détail(s) sur la base des plans d'appels d'offres ou adaptés selon l'état et en fonction du degré de détail.

6.7.2 Exécution

La surveillance des travaux représente la mission primordiale durant l'exécution. Elle permet de s'assurer que l'exécution respecte bien les normes et les délais prescrits, ainsi que d'une bonne coordination du chantier en amont. En font partie:

- Organisation du chantier
 - organisation et enregistrement de la réunion de lancement ou de la célébration avec les autorités et les entrepreneurs sur site,
 - concertation et coordination concernant les échéances.
- Coordination et direction des discussions de suivi de chantier (état d'avancement du projet, points de jonction de chaque fournisseur, calendrier, etc.)
- Information du maître d'ouvrage concernant l'avancement du projet
- Vérification des modèles, éventuellement réception de tous les sous-systèmes (checklists dans la fiche de travail FW 401 [100] Partie 17 de l'AGFW)
- Les conduites posées en pleine terre doivent être sécurisées par une bande de repérage du tracé sur chaque conduite. Les conduites non-métalliques (tubes médians en plastique) doivent être posées avec une bande de repérage du tracé détectable.

6.7.3 Mise en service

Pour la mise en service, il est recommandé de suivre le déroulement suivant:

- contrôle du fonctionnement des pièces de l'installation et des systèmes,
- démarrage à froid de l'installation,
- correction des défauts et des perturbations du fonctionnement,
- mise en service de l'installation,
- rédaction d'un protocole relatif au déroulement et au résultat de la mise en service et signature de toutes les parties impliquées,
- les défauts survenus doivent être corrigés d'ici au transfert.

A la mise en service, la responsabilité est en principe transférée à l'exploitant. Souvent un réseau de chauffage à distance est mis en service avant que l'ensemble du chantier (p. ex. remise en état du terrain) ne soit terminé. Dans ce cas la responsabilité du chantier incombe à la direction des travaux, jusqu'à ce que les travaux soient complètement achevés ou jusqu'au transfert officiel à l'exploitant.

6.7.4 Documentation

La sécurité d'exploitation et d'entretien dépend d'une documentation des conduites fiable, complète et actuelle. Elle permet essentiellement de détecter rapidement et de manière fiable les conduites et les pièces de l'installation. Elle permet également de constituer conformément à [6] la base de la planification des projets d'agrandissement et de maintenance. Enfin, elle est une aide dans la représentation des documentations détaillées des installations. Les fondements d'une documentation des conduites fiable consistent en une prise de mesure exacte et une mise à jour des documents. La mise à jour peut être considérable et doit donc être planifiée.

La documentation peut être divisée en deux domaines principaux concernant la partie technique:

- la documentation de contrôle et de validation,
- la documentation d'exploitation.

La **documentation de contrôle et de validation** se compose des documents actualisés relatifs aux installations opérationnelles et renseigne sur les bonnes pratiques de production. Elle regroupe les points suivants:

- documentation de production des installations (documents de planification, contrôles de qualité, certificats de réception),
- documentation relative au chantier servant de preuve aux contrôles de qualité et aux droits de garantie,
- agrandissements (nouvelle construction, raccordements des clients),
- adaptation de la documentation en fonction des modifications apportées aux installations techniques

dans le cadre de la maintenance (échange de modules ou de pièces des installations),

- modifications des installations techniques en raison de nécessités officielles ou privées (mises en place de tracés, modifications contractuelles).

Un aperçu de la documentation des mesures requises relatives à l'assurance qualité regroupe les points suivants:

- Réceptions et protocoles correspondants concernant les livraisons et les prestations
- Déclarations CE, analyse des risques incluse
- Nivellement de conduite de chauffage à distance
- Isométries de facturation concernant les travaux de conduites
- Livraison et justificatif du fabricant de conduites
- Aperçu des certifications matériaux avec affectation d'objet aux éléments de conduites en acier, gaines protectrices, manchons, mousse polyuréthane, robinets, etc.
- Justificatifs et résultats des contrôles internes et externes
- Films et protocoles relatifs au rayonnement des joints de soudure en usine
- Protocole pour:
 - travaux de pose et contrôles qualité,
 - travaux de soudure sur le tube médian,
 - précontrainte ou préchauffage de la conduite de chauffage à distance,
 - travaux d'isolation ultérieure et montage des coussins de dilatation,
 - mesure d'affûtage lors de la surveillance des fuites.
- Calculs détaillés (état de la révision)
- Plans, dessins et vérification statique concernant les travaux de puits
- Vérification statique relative aux tubes de presse et de protection, le cas échéant
- Aperçu général du plan du tracé
- Plans du tracé et plans détaillés révisés
- Plan révisé du système de surveillance des fuites en lien avec le câblage d'accompagnement (représentation géographique)
- Vues éclatées des robinets, installations, etc. pour la gestion des pièces de rechange.

Tous les documents contribuant à la sécurité et au support de la gestion opérationnelle ainsi qu'au respect de la sécurité au travail font partie de la **documentation opérationnelle**:

- règlements, législations, normes,
- règles d'exploitation et instructions de travail,
- manuel d'exploitation,
- documentation des contrôles périodiques,

- plans organisationnels (structures des responsabilités, plans de préparation, plans de secours et plans opérationnels, plans de formation),
- planification de maintenance,
- documentation relative au cycle de vie des installations (évaluations des sinistres, rapports de défaillance et de réparation, etc.),
- listes des équipements avec attestations de surveillance et de vérification (appareils électriques, compteur d'énergie thermique, manomètre, capteur de température, etc.),
- fichiers clients,
- installations et systèmes de repérage des équipements.

Tous les documents nécessaires à l'exploitation doivent être accessibles et transmis dans le cadre de formations spéciales.

En plus de la documentation écrite (plans, etc.) il faut également tenir compte de l'identification des pièces de l'installation sur site. L'identification d'installation sur l'objet doit en conséquence correspondre à la désignation figurant dans le plan directeur. Les installations de conduites de chauffage à distance doivent aussi être conçues pour être reconnaissables dans l'espace public. Il faut tenir compte des points suivants:

- Les structures et points de desserte de surface au niveau des lignes électriques doivent être équipés d'une identification d'installation ainsi que de texte clair.
- Dans le cas de structures souterraines, il convient d'utiliser des couvercles de regards signalant une installation de chauffage à distance.
- Les robinets pour installation enterrée dans des tracés posés en pleine terre doivent être signalés à l'aide de panneaux, de la même manière que le gaz ou l'eau.

6.7.5 Contrôle des coûts

Un décompte de construction fait également partie de l'exécution et de la réception, dans lequel sont rassemblés la totalité des coûts de réalisation du réseau de chauffage à distance, le tout consigné dans un rapport.

6.7.6 Réception

Lors de la réception de l'installation, le système global est transféré officiellement au maître d'ouvrage. Le planificateur responsable, le(s) fournisseur(s) de l'installation et le maître d'ouvrage au moins doivent être présents lors de cette réception. La réception se déroule comme suit:

- réception au moyen du cahier des charges,
- vérification de la documentation et suivi éventuel,
- réception du contrôle des coûts,
- élaboration du procès-verbal de réception et signature par toutes les personnes.

Tableau 6.13 Checklist phase 4 – Exécution et réception

Contrôle	Checklist Phase 4 – Exécution et réception	Remarques
Plans d'exécution		
	Elaboration des plans d'exécution pour les travaux de génie civil et de conduites sur la base des plans d'appel d'offres (pentes, matériaux, hauteurs de recouvrement, ouvrages spéciaux, étayage, vidange, purge, subdivision en sections et mesures compensatoires)	
Exécution		
	Souscription d'une assurance travaux de construction	Voir chapitre 6.9.4
	Supervision des travaux durant la phase de construction (contrôle de la conformité de l'exécution par rapport aux normes et délais prescrits)	
	Coordination et direction des discussions de suivi de chantier (état d'avancement du projet, points de jonction de chaque fournisseur, calendrier, etc.)	
	Information du maître d'ouvrage concernant l'état d'avancement du projet	
	Vérification des modèles, réception éventuelle de tous les sous-systèmes	
Mise en service		
	Contrôle du fonctionnement de toutes les pièces de l'installation et des systèmes	
	Démarrage à chaud de l'installation	
	Correction des défauts et des perturbations du fonctionnement	
	Mise en service de l'installation	
Documentation		
	Elaboration de la documentation de contrôle et de validation	
	Elaboration de la documentation technique d'exploitation	
	Elaboration du manuel d'exploitation	
Contrôle des coûts		
	Réalisation du décompte de construction intégrant tous les coûts de création du réseau de chauffage à distance.	
Réception		
	Réception du système global au moyen du cahier des charges. Le planificateur, le(s) fournisseur(s) de l'installation et le maître d'ouvrage doivent être présents lors de la réception.	
	Vérification et suivi éventuel de la documentation	
	Mise à jour du manuel d'exploitation	
	Instruction de l'exploitant de l'installation	
	Création du procès-verbal de réception et signature de toutes les parties impliquées	

6.8 Phase 5: Optimisation de l'exploitation

Les méthodes traditionnelles de démarrage et de réception, notamment pour des installations complexes, s'avèrent souvent insuffisantes et ne garantissent en rien une exploitation rentable de l'installation. Même lorsque les installations ont été correctement conçues et construites en conséquence, elles ne sont souvent pas exploitées comme ce qui avait été prévu dans le concept. Une optimisation de l'exploitation est indispensable à un fonctionnement correct. Après le transfert de l'installation au maître d'ouvrage, celle-ci permet de vérifier systématiquement le fonctionnement de l'installation et de le comparer avec les prescriptions de la désignation de la fonction. Cette vérification permet de résoudre des défauts présents sur les composants de l'installation et d'améliorer les paramètres de commande et de réglage.

Dans le cas de projets subventionnés, l'optimisation de l'exploitation peut faire partie intégrante des conditions de subvention et donc s'avérer obligatoire.

L'optimisation de l'exploitation s'effectue en fonction de la taille de l'installation et au cours des deux premières années suivant le transfert de l'installation. L'optimisation de l'exploitation peut ou doit être répétée ou compensée en fonction du degré de développement et selon l'installation finale prévue. Dans le cas d'installations de chauffage à distance, il est possible de recourir à une période de chauffage complète pour l'optimisation de l'exploitation.

Pour réaliser une saisie des données ciblée, il est nécessaire d'élaborer un **concept d'optimisation de l'exploitation** en amont de la planification. Le concept régit: quand, par qui, comment et quels types de données d'exploitation il convient d'enregistrer et d'évaluer. Le concept d'optimisation de l'exploitation, notamment sa passation de commande pour réalisation, doit être signé par le maître d'ouvrage et le planificateur responsable. La saisie des données doit commencer dès la mise en service de l'installation et se poursuivre selon la durée convenue par le contrat. Cependant, la saisie des données pour l'optimisation de l'exploitation doit s'effectuer au minimum pendant plus d'un an.

Afin de réussir une optimisation de l'exploitation avec les fournisseurs d'installations, des garanties financières correspondantes pour la période de garantie doivent être prévues dans les contrats de service (rétentions). Dans le cas contraire tous les fournisseurs d'installations ne participeraient pas librement à l'optimisation de l'exploitation.

6.8.1 Saisie des données

Comme indiqué ci-dessus, on examine lors de l'optimisation de l'exploitation si l'installation fonctionne conformément à l'étude de projet. Cet examen n'est possible que si le fonctionnement de l'installation a été prévu au préalable. Les conditions requises pour une

optimisation de l'exploitation sont un concept d'optimisation de l'exploitation d'une part et le respect des conditions suivantes d'autre part:

- Désignation de la fonction avec schéma de principe, détaillant le fonctionnement de l'installation au cours des différents états de service.
- Liste des indicateurs convenus et garantis fournis avec le justificatif d'exploitation optimale.
- Liste des points de mesure, dans laquelle le lieu de mesure, la plage de mesure, la résolution et la précision de mesure sont indiqués pour chaque point de mesure.
- Description de l'enregistrement des données automatique. Les responsabilités doivent également être définies ici:
 - les spécifications et la planification de l'enregistrement des données,
 - le relevé des données,
 - l'évaluation des données.
- L'installation doit être équipée du système de contrôle correspondant et être capable d'enregistrer et d'archiver les données souhaitées.

Le planificateur et les fournisseurs d'installations peuvent profiter d'un relevé à distance permettant d'accéder rapidement aux données d'exploitation. Une saisie des données continue p. ex. grâce à un système de contrôle permet aussi d'évaluer des données ultérieurement et d'entreprendre des optimisations.

Grâce à une communication des données dans le réseau de chauffage à distance et à l'enregistrement des données dans un système de contrôle central, les données de chaque station de transfert domestique sont en liaison permanente avec la centrale thermique. Ainsi toutes les données relatives aux stations de transfert (puissance instantanée, débit, températures, températures prévues, état de fonctionnement, état des pompes et des vannes, etc.) peuvent être consignées, représentées sous forme graphique et évaluées.

Cette communication des données établie via un bus de données. La longueur de transmission des données ne doit pas être limitée par le nombre de dispositifs de contrôle raccordés. La structure du matériel des interfaces doit être adaptée aux conditions du domaine du chauffage à distance (potentielle influence perturbatrice élevée provoquée par un câble électrique posé en parallèle, différents potentiels de terre pour chaque habitation de consommateurs, danger lié à la foudre directe ou indirecte).

L'échange de données permanent rend transparents les processus dans l'ensemble du réseau de chauffage à distance et possible le réglage à distance de tous les paramètres d'installation pour toutes les stations de transfert. Ainsi le consommateur de chaleur est accompagné dans le réglage de son installation partout où il le souhaite (également sur ordinateur portable et par téléphone mobile p. ex.).

La pose du câble s'effectue principalement en arborescence avec un bouclage dans chaque maison. Aucun nœud, aucun circuit, ni résistance de terminaison ne sont nécessaires dans le réseau, où les manchons de

câbles dans la terre sont en principe à éviter. Les câbles de données à poser doivent être multipolaires (conformément aux exigences du fournisseur de système) et protégés. Avant que chaque dispositif de contrôle du chauffage à distance ne soit connecté au câble de données, il faut absolument prendre la mesure des coupures ou court-circuits de l'ensemble du câblage. La pose du câble doit être documentée en détails afin de disposer d'une documentation précise en vue d'extensions de réseau ultérieures et de dépannages éventuels.

6.8.2 Evaluation

Une représentation graphique des données relatives aux différents états de service est indispensable à l'interprétation et à l'évaluation des données enregistrées. Les états de service à examiner au minimum sont: le fonctionnement à faible charge (période transitoire ou période estivale) et l'état de service par temps froid. Les données relatives à ces deux états de service doivent satisfaire les exigences suivantes:

- représentation hebdomadaire,
- représentation journalière (24h) des jours sélectionnés,
- représentation commune sur un seul diagramme des données clés,
- répartition uniforme et libellé des axes,
- six paramètres maximum par diagramme.

L'évaluation des données d'exploitation enregistrées s'effectue selon les critères suivants:

- comparaison valeurs prévues et valeurs effectives avec valeurs de référence (niveau de température et niveau de pression selon prescriptions techniques),
- interprétation des écarts,
- détermination du potentiel d'optimisation,

- documentation des défaillances et des dommages.

6.8.3 Optimisation

Des mesures d'optimisation découlent de l'analyse de la saisie des données. Il faut donc élaborer un plan de mesures, qui doit être approuvé par le maître d'ouvrage et être mis en place. Les mesures peuvent également être mises en place de manière échelonnée en fonction de la priorité.

Les optimisations réalisées doivent dans tous les cas être contrôlées et ajustées le cas échéant. Les adaptations ou mesures d'optimisation les plus fréquentes sont:

- réalisation d'un équilibrage hydraulique,
- réglage de valeurs prévues et de paramètres de contrôle (température, pression, etc.),
- adaptation de programmes de temporisation.

Il faut continuer, si possible, à collecter et évaluer les principales valeurs des consommateurs clés (p. ex. énergie en kWh et volume d'eau en m³). C'est ainsi qu'on peut garantir l'enregistrement rapide et facile de défaillances et de potentiels d'optimisation éventuels (voir chapitre 10).

Tableau 6.14 Checklist phase 5 – Optimisation de l'exploitation

Contrôle	Checklist phase 5 - Optimisation de l'exploitation	Remarques
Saisie des données		
	Création d'un concept de saisie des données (généralement obligatoire pour des projets subventionnés)	
	Enregistrement et collecte des données de l'installation	
	Consignation du réglage des valeurs de référence	
Evaluation		
	Traitement graphique des données	
	Comparaison valeurs prévues et valeurs effectives avec valeurs de référence	
	Interprétation des écarts	
	Détermination du potentiel d'optimisation	
	Documentation des défaillances et des dommages	
Optimisation		
	Elaboration d'un plan de mesure pour amélioration (mise en œuvre)	
	Mise en œuvre des mesures	
	Suivi	

6.9 Phase 6: Exploitation et gestion

6.9.1 Concept d'exploitation

Avant expiration du délai de garantie, et si possible en même temps qu'un contrôle final, le planificateur principal est tenu d'élaborer, en plus de l'actualisation de la documentation, un concept d'exploitation, un concept de formation et un concept de maintenance qu'il doit remettre au maître d'ouvrage. Ce concept doit comprendre les éléments suivants:

- feuilles de données révisées pour l'enregistrement manuel des données d'exploitation,
- informations relatives à l'obligation de formation du personnel d'exploitation pour l'exercice de son activité,
- plan de maintenance révisé,
- alarme et organisation du service de piquet,
- plan d'urgence,
- contrôle de réussite.

Le contrôle de réussite permet de garantir la conformité de l'installation avec les exigences relatives à une exploitation optimale, même après expiration de la période de garantie. Dans le concept d'exploitation il faut définir

- les données à enregistrer et le type d'enregistrement (manuel, automatique),
- le type d'évaluation de ces données (p. ex. les indicateurs, les évaluations Excel),
- la personne responsable de l'évaluation et de l'interprétation des résultats,
- la personne à contacter en fonction du type de défaillances ou d'événements,
- la fréquence des contrôles périodiques,
- les équipements à analyser et la fréquence de ces analyses.

6.9.2 Maintenance

La maintenance signifie l'adoption de mesures de préservation et de remise en état de l'état souhaité, ainsi que la détermination et l'évaluation de l'état actuel par des moyens techniques d'un système. Ces mesures impliquent:

- inspection,
- maintenances,
- remises en état (entretien).

Les objectifs de remise en état doivent être harmonisés avec les objectifs de l'entreprise. Il faut également déterminer des stratégies de maintenance correspondantes.

Afin de garantir une exploitation sans incident, la stratégie de maintenance doit se limiter à la maintenance en fonction de la situation, c'est-à-dire une élimination des défauts. Une maintenance préventive basée sur les résultats d'exploitation et les activités de contrôle et

d'inspection est recommandée. Des inspections régulières et une maintenance ciblée de toutes les installations et pièces de l'installation essentielles constituent des conditions importantes.

6.9.3 Contrat de maintenance

Selon la taille et la complexité de l'installation, ainsi que le nombre d'entreprises impliquées, un contrat de maintenance doit être conclu avec les fournisseurs d'installations, notamment la mise à disposition de chaleur. Par conséquent il est possible de réduire au minimum les défaillances et d'améliorer la sécurité de fonctionnement. Les partenaires contractuels possibles sont:

- fournisseur de chaudière avec commande,
- fournisseur d'approvisionnement en combustible,
- fournisseur de traitement des gaz,
- fournisseur de l'hydraulique (tuyauterie),
- fournisseur du système de régulation ou de contrôle,
- fournisseur de l'installation de surveillance des fuites,
- fournisseur des stations de transfert.

Un contrat de maintenance doit être conclu le cas échéant avec tous les fournisseurs ci-dessus. Les prestations incluses doivent être semblables ou identiques pour tous.

Un contrat de maintenance doit détailler par écrit les points suivants:

- objet du contrat,
- description claire des limites de livraison et des prestations (garanties également!),
- description des exclusions et des exceptions,
- justificatifs des tarifs horaires et des indemnités, ainsi que des frais,
- coûts,
- validité et durée,
- résiliation,
- reconduction,
- adresse de contact et organisation pour la demande de prestations de service en cas de besoin,
- obligations de l'exploitant,
- droits de l'entrepreneur,
- lieu, date et signature du maître d'ouvrage et de l'entrepreneur.

6.9.4 Assurances

Pour garantir l'exploitation économique sur le long terme d'une entreprise de chauffage à distance, il faut aussi penser à conclure les assurances correspondantes. Ceci est d'autant plus essentiel, car la plupart des obligations contractuelles de fourniture de chaleur ont été conclues avec les consommateurs. Pour aucune centrale thermique, on ne peut garantir l'absence de dysfonctionnement imprévu de l'installation provoquant l'interruption de la chaleur fournie ou nuisant à sa rentabilité.

Lors de la conclusion des assurances, il convient d'examiner avec précision les groupes suivants:

- assurance travaux de construction (durant la phase de construction),
- assurance incendie,
- assurance bris de machine et assurance perte d'exploitation,
- assurance responsabilité civile.

des risques et de se rapprocher d'experts (p. ex. courtier en assurances).

Le domaine des assurances étant relativement vaste et complexe, il est recommandé d'effectuer une évaluation

Tableau 6.15 Checklist phase 6 – Exploitation et gestion

Contrôle	Checklist Phase 6 – Exploitation et gestion	Remarques
Concept d'exploitation		
	Réalisation du concept d'exploitation	
	Enregistrement des données d'exploitation	
	Détermination de mesures de formation du personnel d'exploitation	
	Elaboration du plan de maintenance	
	Alarme et organisation du service de piquet	
	Plan d'urgence	
	Exécution du contrôle de réussite	
Maintenance		
	Détermination de la stratégie de remise en état (maintenance préventive se basant sur les résultats d'exploitation et les activités de contrôle et d'inspection)	
Contrat de maintenance		
	Conclusion de contrats de maintenance avec les fournisseurs des principaux systèmes d'installation	
Assurances		
	Estimation des risques et prise de contact avec des experts en cas de besoin (p. ex. courtier en assurances)	
	Assurance incendie	
	Assurance bris de machine et assurance perte d'exploitation	
	Assurance responsabilité civile d'entreprise	

7 Distribution de chaleur – Calculs

7.1 Rejets de chaleur

Le système de conduites (matériaux, dimensionnement, épaisseur d'isolation, pose, etc.) et les conditions d'exploitation du réseau de chauffage à distance (niveau de température, écart de température, régime d'exploitation, etc.) influencent les rejets de chaleur de la distribution de chauffage à distance.

Deux méthodes fondamentales existent pour déterminer les rejets de chaleur.

La première méthode consiste à déterminer les rejets de chaleur à l'aide des données du compteur d'énergie thermique, en comparant la quantité de chaleur injectée dans le réseau annuellement avec la quantité de chaleur livrée globalement aux consommateurs de chaleur. Sont prises en compte les pertes de rayonnement et de convection issues des stations de transfert, pompes, robinets, etc. Cette méthode ne permet de mesurer le rejet de chaleur que lors de l'exploitation.

La deuxième méthode permet d'estimer les rejets de chaleur grâce aux plans de réseau et aux données des systèmes de conduites utilisés. Par rapport à la première méthode, celle-ci doit présenter une valeur plus faible, car les pertes de convection et de rayonnement mentionnées ne sont en principe pas prises en considération.

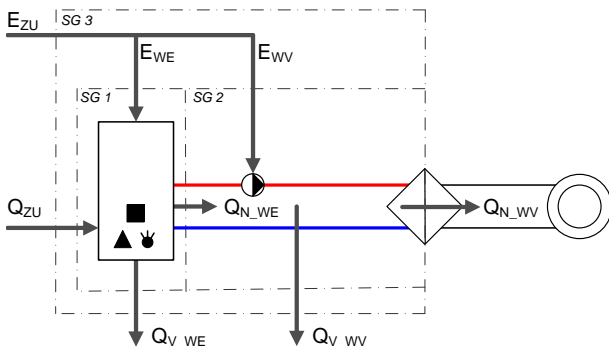


Fig. 7.1 Limites du système pour l'évaluation d'un réseau de chauffage à distance avec termes selon Tableau 7.1.

- SG1: Générateur de chaleur
- SG2: Distribution de chaleur circuit primaire «Réseau de chauffage à distance»
- SG3: Système de chauffage à distance «réseau de chaleur à distance».

Un réseau de chauffage à distance peut être évalué (Fig. 7.1) avec les limites du système figurant dans Tableau 7.1. La limite du système SG1 représente le générateur de chaleur (WE). Les flux énergétiques fournis sont d'une part l'énergie électrique pour les agrégats nécessaires au générateur de chaleur, comme p. ex. pompes, systèmes de transport, ventilateurs, etc. et d'autre part la chaleur contenue dans le combustible. Les flux énergétiques évacués des limites du système SG1 se composent des rejets de chaleur (combustion incomplète et rejets de

rayonnement de l'installation de production de chaleur) et de la quantité de chaleur produite pour utilisation.

La limite du système SG2 représente la distribution de chaleur (WV). Les flux énergétiques fournis sont l'énergie électrique pour les agrégats nécessaires à la distribution de chaleur comme les pompes, les vannes de réglage, le convertisseur de fréquence, la surveillance des fuites, etc. et la chaleur injectée dans le réseau de chauffage à distance issue du générateur de chaleur. Les flux énergétiques évacués des limites du système SG2 se composent des rejets de chaleur du réseau de distribution de chaleur et de la quantité de chaleur achetée aux consommateurs de chaleur.

La limite du système SG3 représente le système de chauffage à distance total. Les flux énergétiques fournis sont l'énergie électrique pour les agrégats de la distribution de chaleur et le générateur de chaleur et la chaleur contenue dans le combustible. Les flux énergétiques évacués des limites du système SG3 se composent des rejets de chaleur du générateur de chaleur, des rejets de chaleur de la distribution de chaleur et de la chaleur achetée aux consommateurs de chaleur.

Tableau 7.1 Légende pour la représentation des limites du système Fig. 7.1

Désignation	Symbole	Unité
Quantité d'énergie électrique fournie	E _{ZU}	MWh/a
Quantité d'énergie électrique Générateur de chaleur	E _{WE}	MWh/a
Quantité d'énergie électrique Distribution de chaleur	E _{WV}	MWh/a
Chaleur fournie	Q _{ZU}	MWh/a
Chaleur utile Générateur de chaleur	Q _{N_WE}	MWh/a
Chaleur utile Distribution de chaleur	Q _{N_WV}	MWh/a
Rejet de chaleur Générateur de chaleur	Q _{V_WE}	MWh/a
Rejet de chaleur Distribution de chaleur	Q _{V_WV}	MWh/a

La Fig. 7.2 montre un réseau de chauffage à distance selon des valeurs cibles de QMH [21] et la Fig. 7.3 un réseau de chauffage à distance surdimensionné issu d'une étude pratique [16]. L'illustration montre certes que le surdimensionnement entraîne une baisse de la dépense électrique de 70%, mais une augmentation des rejets de chaleur de 6,5% (Tableau 7.2). L'étude pratique [16] montre que des conduites surdimensionnées sont généralement responsables de rejets de chaleur plus élevés.

Tableau 7.2 Comparaison des parts de rejets de chaleur, d'énergie électrique pour la production et distribution de chaleur.

Désignation	Exemple QMH	Exemple Real
Rejet de chaleur Distribution de chaleur ¹	10%	16,5%
Quantité d'énergie électrique Générateur de chaleur ¹	1,25%	1,1%
Quantité d'énergie électrique Distribution de chaleur ¹	0,75%	0,2%

1) La référence est la chaleur utilisable issue du générateur de chaleur Q_{N_WE}

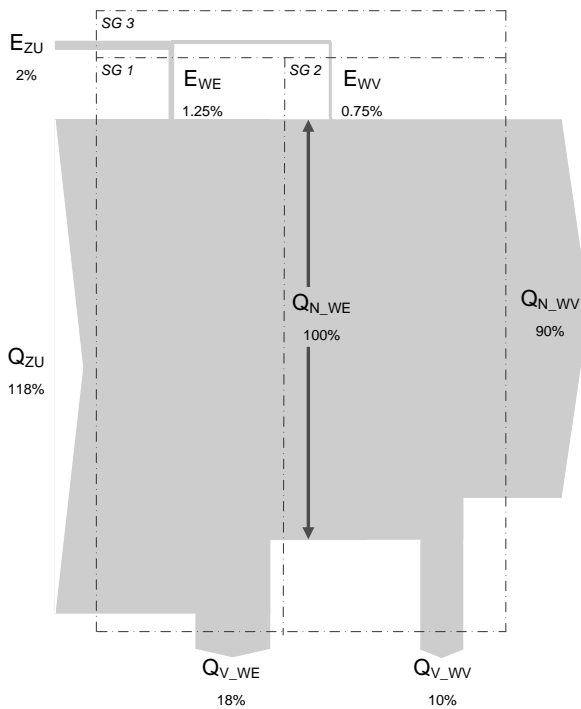


Fig. 7.2 Diagramme de Sankey pour un réseau de chaleur selon l'exemple QMH de QM Chauffages au bois.

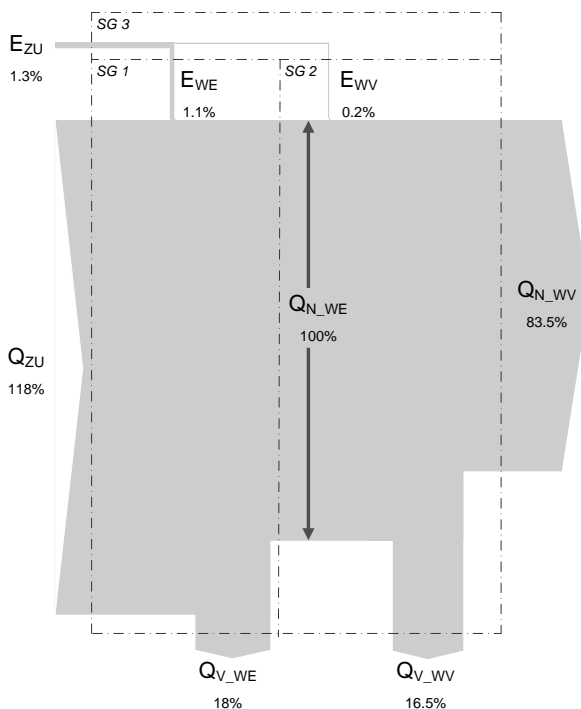


Fig. 7.3 Diagramme de Sankey pour un réseau de chaleur selon un exemple réel.

7.1.1 Conduites de surface

Dans le cas de conduites de surface (alimentées en air), le coefficient de transfert de chaleur U pour des conduites isolées est dérivé du rayon intérieur de la conduite intérieure acheminant les fluides r_i , celui-ci devant de toute façon être disponible pour les calculs hydrauliques.

En se référant à la Fig. 7.4 le coefficient de transfert de chaleur U_i se calcule en $W/(m^2 K)$ de la manière suivante avec pour référence le rayon intérieur:

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i}{\lambda_R} \ln\left(\frac{r_R}{r_i}\right) + \frac{r_i}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{r_i}{\lambda_M} \ln\left(\frac{r_M}{r_D}\right) + \frac{1}{r_M}}$$

Avec les matériaux, diamètres des conduites et vitesses des flux rencontrés habituellement dans le chauffage, le coefficient de transfert de chaleur interne et les inerties thermiques des conduites peuvent être utilisés à l'infini pour les calculs, en simplifiant. Une valeur moyenne d'environ $9,7 W/(m^2 K)$ peut être utilisée dans le cas de conduites isolées dans des bâtiments et des canaux pour le coefficient de transfert de chaleur total externe α_a constitué par la part de convection et la part de rayonnement. Dans le cas de lignes électriques, le coefficient de transfert de chaleur dépend de la vitesse du vent. Une valeur de $23,2 W/(m^2 K)$ peut s'appliquer comme valeur moyenne. Le coefficient de transfert de chaleur U_R est donc déduit du rayon externe de la conduite acheminant les fluides r_R . Les simplifications mentionnées donnent l'équation suivante [44]:

$$U_R = \frac{1}{\frac{r_R}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{r_R}{r_D \alpha_a}}$$

multiplié par la surface significative de la conduite en m^2

$$A_R = 2 \pi l r_R$$

et la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur en K

$$\Delta T = T_a - T_i$$

il en résulte pour le flux de pertes de chaleur en W l'équation suivante:

$$\dot{Q}_V = U_R A_R \Delta T = \frac{2 \pi l (T_a - T_i)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{1}{r_D \alpha_a}}$$

Le flux de pertes de chaleur spécifique par mètre en W/m donne alors:

$$\dot{q}_V = \frac{\dot{Q}_V}{l} = \frac{2 \pi (T_a - T_i)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_D}{r_R}\right) + \frac{1}{r_D \alpha_a}}$$

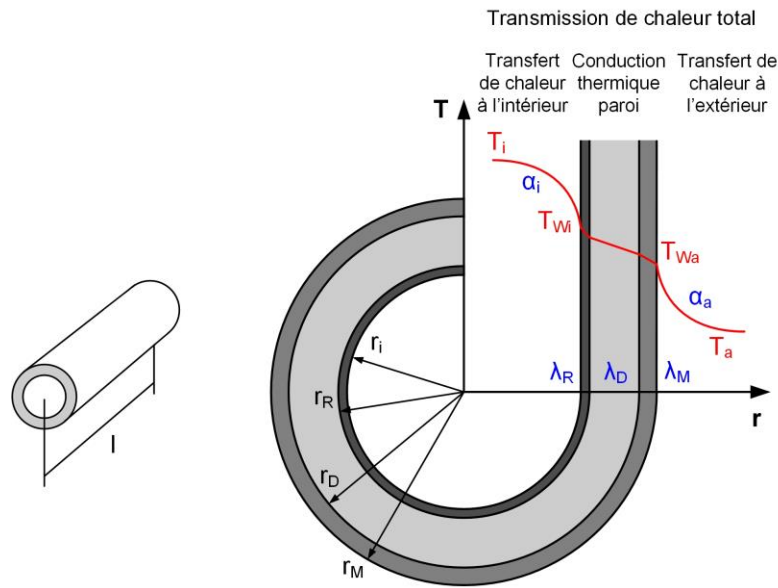


Fig. 7.4 Représentation du transfert de chaleur dans une conduite isolée.

7.1.2 Conduites posées en pleine terre

Les réseaux de chauffage à distance sont aujourd'hui réalisés en général avec des conduites de chauffage à distance posées en pleine terre. Les tubes en acier et en plastique sont dotés d'une isolation thermique et sont recouverts d'une gaine protectrice. Il est compliqué de calculer les flux de rejets de chaleur, car le transfert de chaleur agit au moins dans deux dimensions et on adopte comme conditions marginales une température constante dans la périphérie du tube, une température de l'air extérieur constante à la surface de la terre et des températures de l'eau souterraine constantes à une profondeur prédéterminée. La température du tube et la température extérieure devraient en réalité être déterminées comme fonction temporelle et pour un transfert de chaleur non stationnaire. Les calculs numériques peuvent s'effectuer avec la méthode des éléments finis. Cependant ceci est coûteux, ne peut pas être généralisé et suppose des connaissances concernant le régime de température précis du tronçon de réseau considéré comme fonction temporelle [44].

Avec une bonne approximation, le transport de chaleur peut être néanmoins traité comme opération stationnaire, car on retient:

- Près de 80% à 90% de la différence de température (conduite par rapport à la surface de la terre) sont évacués dans le matériau d'isolation de la conduite. En raison de l'épaisseur de couche relativement faible, l'évolution de la température dans la gaine doit être considérée approximativement comme quasi stationnaire.
- Le fonctionnement temporel du réseau n'est en général pas connu précisément. Les fluctuations de température sur de courtes périodes impactent la température de la terre du fait de la forte absorption uniquement à proximité immédiate de la conduite et peuvent être négligées.

- Pour les températures extérieures à la surface de la terre ou de l'air extérieur et de l'eau souterraine, des valeurs moyennes temporelles sont utilisées pour les rejets de chaleur des éléments en contact avec la terre, comme dans le cas de calculs normalisés.

Le transfert de chaleur de la terre aux alentours et l'influence réciproque des deux conduites doivent également être prises en compte pour la plupart des conduites de chauffage à distance posées en pleine terre de nos jours. Comme la Fig. 7.5 le met en évidence, il faut prendre en considération la hauteur du recouvrement $h_{\bar{u}}$ comme épaisseur d'isolation thermique minimale de la terre par rapport à l'environnement et l'écartement intérieur des tubes a entre les deux conduites. Les inerties thermiques des tubes (tube médian en acier et tube plastique) sont négligées, comme dans le chapitre 7.1.1.

Le coefficient de transmission de chaleur total se compose des trois parties suivantes:

- transfert de chaleur par le matériau d'isolation du tube,
- transfert de chaleur par la terre,
- influence réciproque des deux conduites.

Par la suite, des conduites de chauffage à distance posées en pleine terre avec tubes médians en acier rigides en version à tube unique sont prises en compte à des fins de simplification. Les calculs peuvent aussi être appliqués aux systèmes de conduites flexibles comme les tubes médians en métal et les tubes médians en plastique, tant que les mesures et données nécessaires sont disponibles.

Afin de simplifier les calculs du flux de pertes de chaleur spécifique aux conduites de chauffage à distance posées en pleine terre avec tubes médians en acier rigides en version à tube unique, les limitations suivantes s'appliquent:

- tube médian en acier,
- gaine protectrice en plastique (PE),

- mousse de polyuréthane renforcée avec tube médian et gaine protectrice (PUR) comme matériau isolant,
- même diamètre nominal pour amenée et retour,
- toujours prévisible individuellement pour une ligne partielle uniquement.

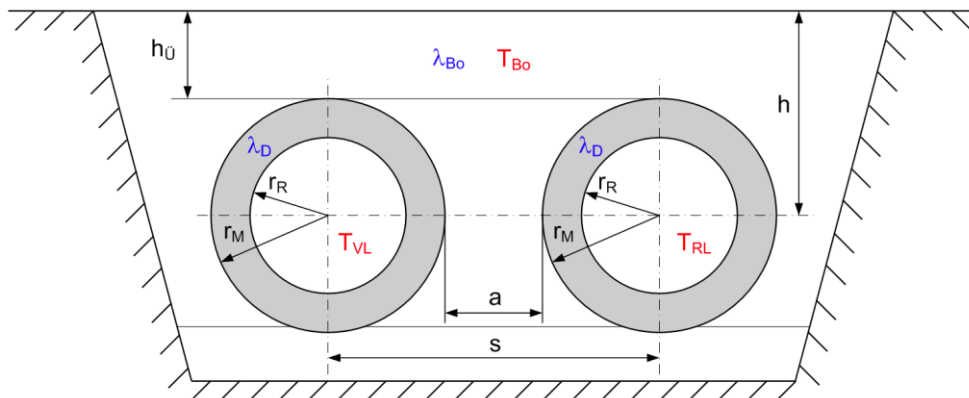


Fig. 7.5 Représentation schématique de tuyaux de chauffage à distance posés en pleine terre en version tube unique.

Le rapport suivant a été repris de [3] pour le coefficient de transmission de chaleur en $W/(m^2 K)$ des deux tubes uniques posés en pleine terre. Le coefficient de transmission de chaleur s'applique cependant uniquement à un des deux tubes uniques. La valeur de référence est le rayon extérieur du tube médian en acier r_R , car la chute de température induite par le tube en acier est très faible et est négligée:

$$U_R = \frac{1}{\underbrace{\frac{r_R}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_M}{r_R}\right)}_{\text{Isolation}} + \underbrace{\frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left(\frac{4h}{r_M}\right)}_{\text{Terre}} + \underbrace{\frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left\{\left[\left(\frac{2h}{s}\right)^2 + 1\right]^{0.5}\right\}}_{\text{Influence réciproque}}}$$

La profondeur de pose h en m peut être exprimée en fonction de la hauteur du recouvrement minimale h_U de la manière suivante:

$$h = h_U + r_M$$

L'écartement des tubes horizontal s en m peut être calculé sur la base de l'écartement des tubes intérieur a , comme suit:

$$s = a + 2 r_M$$

En appliquant la profondeur de pose h et l'écartement des tubes horizontal s , on obtient pour les coefficients de transmission de chaleur en $W/(m^2 K)$ l'équation suivante:

$$U_R = \frac{1}{\frac{r_R}{\lambda_D} \ln\left(\frac{r_M}{r_R}\right) + \frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left(\frac{4(h_U + r_M)}{r_M}\right) + \frac{r_R}{\lambda_{Bo}} \ln\left\{\left[\left(\frac{2(h_U + r_M)}{a + 2 r_M}\right)^2 + 1\right]^{0.5}\right\}}$$

La surface significative en m^2 se calcule comme dans le chapitre 7.1.1, pour la conduite d'amenée et la conduite de retour. Le rayon extérieur du tube médian en acier r_R est la valeur de référence.

$$A_{VR} = 2 \cdot 2 \pi L r_R = 4 \pi L r_R$$

La différence de température des conduites posées en pleine terre en K se calcule à partir de la différence entre la température d'exploitation conception T_B et la température du sol moyenne T_{Bo} comme suit:

$$\Delta T_L = T_B - T_{Bo} = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Bo}$$

Le flux de pertes de chaleur pour la conduite d'amenée et la conduite de retour d'une ligne partielle en W se calculent à partir des trois dernières équations comme suit:

$$\dot{Q}_V = U_R A_{VR} \Delta T_L$$

$$\dot{Q}_V = \frac{4 \pi L \left(\frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Bo} \right)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln \left(\frac{r_M}{r_R} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left(\frac{4(h_U + r_M)}{r_M} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left\{ \left[\left(\frac{2(h_U + r_M)}{a + 2r_M} \right)^2 + 1 \right]^{0.5} \right\}}$$

Le flux de pertes de chaleur spécifique par mètre de tracé en W/m donne alors:

$$\dot{q}_V = \frac{\dot{Q}_V}{L}$$

$$\dot{q}_V = \frac{4 \pi \left(\frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Bo} \right)}{\frac{1}{\lambda_D} \ln \left(\frac{r_M}{r_R} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left(\frac{4(h_U + r_M)}{r_M} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left\{ \left[\left(\frac{2(h_U + r_M)}{a + 2r_M} \right)^2 + 1 \right]^{0.5} \right\}}$$

7.1.3 Rejet de chaleur spécifique par mètre de tracé de conduite

Les rejets de chaleur annuels d'un réseau de chauffage peuvent être calculés de manière simplifiée avec le rejet de chaleur spécifique par mètre de tracé de conduite, la température d'exploitation moyenne et la durée d'exploitation annuelle du réseau de chauffage.

Les rejets de chaleur spécifiques par mètre de tracé de conduite se calculent à partir du coefficient de transmission de chaleur, de la surface significative et de la longueur de la conduite. Ces données peuvent être généralement obtenues à partir des informations relatives aux produits du fabricant du système de conduites et sont indiquées en watts par mètre de tracé et en kelvin [W/(m K)]. Dans la Fig. 13.6 les rejets de chaleur spécifiques par mètre de tracé de conduite jusqu'à DN200 sont représentés pour les tubes pré-isolés en métal, les tubes médians en métal et les tubes médians en plastique et ont été calculés selon l'équation suivante. Les données relatives aux versions à tube double ont été extraites des informations concernant les produits des entreprises suivantes: Brugg Pipesystems, Isoplus et Logstor.

$$\dot{q}_{V,L} = \frac{U_R A_{VR}}{L} = \frac{U_R 4 \pi L r_R}{L} = U_R 4 \pi r_R$$

$$\dot{q}_{V,L} = \frac{4 \pi}{\frac{1}{\lambda_D} \ln \left(\frac{r_M}{r_R} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left(\frac{4(h_U + r_M)}{r_M} \right) + \frac{1}{\lambda_{Bo}} \ln \left\{ \left[\left(\frac{2(h_U + r_M)}{a + 2r_M} \right)^2 + 1 \right]^{0.5} \right\}}$$

7.1.4 Rejets de chaleur annuels

Les rejets de chaleur de la distribution de chaleur impactent la rentabilité d'une installation et dépendent de la densité de raccordement, de la durée d'exploitation (exploitation à l'année ou saisonnière), du niveau de température, du dimensionnement et de l'épaisseur d'isolation de la conduite. Les rejets de chaleur annuels sont habituellement déduits de la quantité de chaleur injectée annuellement dans le réseau et indiqués en pourcentage.

Rejets de chaleur mesurés

Lors de l'exploitation, les rejets de chaleur peuvent être déterminés à l'aide des données du compteur d'énergie thermique, en comparant la quantité de chaleur injectée

dans le réseau annuellement avec la quantité de chaleur livrée globalement aux consommateurs de chaleur. Les pertes de rayonnement et de convection des stations de transfert, des pompes, des robinets, etc. sont prises en compte. Les rejets de chaleur annuels résultent de la différence entre la quantité de chaleur injectée annuellement dans le réseau et la quantité de chaleur fournie globalement aux consommateurs de chaleur se rapportant à la quantité de chaleur injectée annuellement dans le réseau.

$$q_{V,a} = \frac{\text{Rejets de chaleur annuels 100\%}}{\text{Quantité de chaleur injectée annuellement}}$$

Rejets de chaleur calculés

Les rejets de chaleur peuvent être estimés grâce aux plans de réseau et aux données des systèmes de conduites utilisés. Par rapport à la méthode mesurée, les calculs doivent présenter une valeur plus faible, car les pertes de convection et de rayonnement mentionnées ne sont en principe pas prises en considération. Pour calculer les rejets de chaleur annuels de la distribution de chaleur, la température d'exploitation moyenne $T_{B,m}$ est nécessaire, en plus des informations concernant les rejets de chaleur spécifiques par mètre de tracé de conduite selon le chapitre 7.1.3:

$$T_{B,m} = \frac{T_{VL,m} + T_{RL,m}}{2}$$

La température d'exploitation moyenne $T_{B,m}$ doit être déterminée en fonction de la température extérieure en cas de température d'amenée variable. Dans le cas de températures d'amenée et de retour constantes, la température d'exploitation moyenne correspond à la température d'exploitation selon la conception T_B :

$$T_B = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2}$$

Il faut prendre en compte ultérieurement la différence de température par rapport à la terre. La différence de température moyenne en K pour la conduite posée en pleine terre est calculée à partir de la différence entre la température d'exploitation moyenne $T_{B,m}$ (ou la température d'exploitation moyenne selon la conception T_B) et la température du sol moyenne T_{Bo} comme suit:

$$\Delta T_{L,m} = T_{B,m} - T_{Bo} = \frac{T_{VL,m} + T_{RL,m}}{2} - T_{Bo}$$

Les rejets de chaleur annuels pour une ligne partielle en kWh/a se calculent à partir des rejets de chaleur spécifiques par mètre de tracé de conduite, de la différence de température moyenne pour la conduite posée en pleine terre, de la longueur de la section du tracé et de la durée d'exploitation annuelle du réseau comme suit:

$$Q_{V,a,i} = \frac{\dot{q}_{VL} \Delta T_{L,m} L}{1000} \tau_N$$

Les rejets de chaleur annuels de la distribution de chaleur en kWh/a sont calculés en se basant sur la somme des rejets de chaleur de chaque ligne partielle:

$$Q_{V,a} = \sum Q_{V,a,i}$$

Les rejets de chaleur annuels sont également dérivés de la quantité de chaleur injectée annuellement dans le réseau et sont indiqués en pourcentage.

$$q_{V,a} = \frac{Q_{V,a} 100\%}{Q_{N,zu,a}}$$

7.1.5 Chute de température en fonction de la distance

En raison des rejets de chaleur dans les conduites de chauffage à distance, le fluide caloporteur se refroidit tout au long de la distance de transport. C'est le cas aussi bien pour la conduite d'amenée que pour celle de retour. La chute de température de la conduite d'amenée revêt une portée particulière pour l'exploitant de chauffage à distance, car celui-ci doit garantir une température d'amenée pour le transfert de chaleur comme conforme au contrat. La chute de température de la centrale thermique jusqu'au consommateur de chaleur le plus éloigné se calcule facilement en se basant sur l'équation du flux de chaleur comme suit:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_{pW} \Delta T$$

Ainsi en ce qui concerne la différence de température:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} c_{pW}}$$

En employant le flux de pertes de chaleur pour la conduite d'amenée dans chaque ligne partielle et en prenant en compte le débit massique fluide, la chute de température dans la conduite d'amenée dans cette ligne partielle correspond à:

$$\Delta T_A = \frac{\dot{Q}_V}{2 \dot{m} c_{pW}}$$

L'équation suivante résulte d'un calcul précis du refroidissement de la température d'amenée en fonction de la distance pour une ligne partielle posée en pleine terre [44]:

$$T_{VL,i,1} = T_{Bo} + (T_{VL,i,0} - T_{Bo}) e^{-\frac{U_R 2 \pi r_R L}{c_{pW} \dot{m}}}$$

La température d'amenée à l'entrée de la ligne partielle $T_{VL,i,0}$ est donc considérée comme constante.

La chute de température dans la ligne partielle de la conduite d'amenée peut être calculée de la manière suivante:

$$\Delta T_A = T_{VL,i,0} - T_{VL,i,1}$$

$$\Delta T_A = T_{VL,i,0} - \left[T_{Bo} + (T_{VL,i,0} - T_{Bo}) e^{-\frac{U_R 2 \pi r_R L}{c_{pW} \dot{m}}} \right]$$

Le refroidissement du fluide caloporteur dans la conduite d'amenée pour une distance de transport déterminée se calcule à partir de la somme des chutes de températures dans les lignes partielles considérées comme suit:

$$\Delta T_{A,Ges} = \sum \Delta T_A$$

La température d'amenée à la fin de la ligne partielle considérée se calcule à partir de la différence entre la température d'amenée au point d'injection et le refroidissement dans la conduite d'amenée pour la distance de transport totale comme suit:

$$T_{VL,1} = T_{VL,0} - \Delta T_{A,Ges}$$

7.2 Perte de pression

7.2.1 Conduites droites

Les pertes de charge dans les installations de conduites se composent des pertes de pression des sections de puissance droites et de la somme des pertes de charge provenant des installations de conduites comme les coudes, raccords de jonction, variations de sections, appareils, etc. [46].

La perte de pression par résistance de la conduite pour des sections de conduites droites se détermine comme suit:

$$\Delta p_V = \lambda \frac{l}{d_R} \rho_w \frac{w_m^2}{2}$$

Concernant la perte de pression pour des installations de conduites on applique (voir également à ce propos le chapitre 7.2.3):

$$\Delta p_V = \zeta \rho_w \frac{w_m^2}{2}$$

On applique pour le rapport entre le coefficient de résistance des installations ζ et le coefficient de friction de la conduite de l'écoulement dans la conduite λ pour une section de puissance:

$$\zeta = \lambda \frac{l}{d_R}$$

Le nombre de Reynolds Re est défini comme suit:

$$Re = \frac{w_m d_R}{\nu} \quad Re > 2320 \rightarrow \text{turbulente Strömung}$$

A partir d'un nombre de Reynolds supérieur à 2320, le flux laminaire se transforme en flux turbulent.

A partir des vitesses d'écoulement moyennes courantes w_m dans les conduites de chauffage à distance on peut supposer en principe un écoulement dans la conduite turbulent. Le coefficient de friction de la conduite de l'écoulement dans la conduite λ dépend donc du nombre de Reynolds sans dimension et de la rugosité du tube. Le 7.3 indique la rugosité des conduites k pour différentes conduites et matériaux de conduites. Une valeur de $\leq 0,01$ mm est recommandée comme valeur indicative pour les conduites de chauffage à distance [41].

Avec le nombre de Reynolds Re , le diamètre intérieur d_R et la rugosité k , le coefficient de friction de la conduite de l'écoulement dans la conduite λ peut être déduit dans un diagramme Moody pour une section de puissance (Fig. 7.6). Il est recommandé d'utiliser les équations suivantes pour déterminer le coefficient de friction de la conduite. A mesure que les rugosités des conduites k , générant des turbulences supplémentaires, recouvrent la couche de base laminaire, plus faible est l'impact de k sur le coefficient de friction de la conduite λ . La couche de base laminaire est donc capitale dans le degré de turbulence et la perte de pression. On distingue trois régimes de rugosités caractéristiques en ce qui concerne le flux turbulent [46].

Des valeurs empiriques indiquent cependant qu'avec les diamètres des conduites habituellement rencontrés dans le chauffage à distance et les vitesses d'écoulement maximales, conformément à [120], le coefficient de friction de la conduite λ doit généralement être attribué à la zone de transition (zone 2) (voir également Fig. 7.6).

Zone 1: hydraulique lisse

La couche de base laminaire recouvre complètement la rugosité k . L'écoulement dans la conduite, représentant en pratique une couche limite turbulente, glisse tout le long de la couche de base laminaire. La turbulence provient de l'écoulement central (tourbillon) et dépend donc uniquement du nombre de Reynolds.

Champ d'application:

$$2320 < Re < \frac{d_R}{k} \log\left(0.1 \frac{d_R}{k}\right)$$

Formule approximative:

$$\lambda = \frac{0.309}{\left(\log \frac{Re}{7}\right)^2}$$

Zone 2: Zone de transition

A vitesse croissante, c'est-à-dire avec une couche de base plus fine et/ou une rugosité k relative toujours croissante, des pointes de rugosité commencent à émerger de la couche de base laminaire. La turbulence ou le coefficient de friction de la conduite de l'écoulement dans la conduite λ dépend aussi bien de k/d_R que du nombre de Reynolds.

Champ d'application:

$$\frac{d_R}{k} \log\left(0.1 \frac{d_R}{k}\right) < Re < 400 \frac{d_R}{k} \log\left(3.715 \frac{d_R}{k}\right)$$

Formule approximative:

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{15}{Re} + \frac{k}{3.715 d_R}\right)\right]^2}$$

Zone 3: Hydraulique rugueux

En cas de nombre de Reynolds encore plus grand et/ou de k/d_R supérieur, les pointes de rugosité émergent tant de la couche de base que la perte énergétique (perte de pression) ne peut être provoquée que par les tourbillons forts (turbulences) résultant de ces pics de rugosité. Le coefficient de friction de la conduite de l'écoulement dans la conduite λ ne dépend que de k/d_R .

Champ d'application:

$$Re > 400 \frac{d_R}{k} \log\left(3.715 \frac{d_R}{k}\right)$$

Formule approximative:

$$\lambda = \frac{0.25}{\left(\log \frac{3.715 d_R}{k}\right)^2}$$

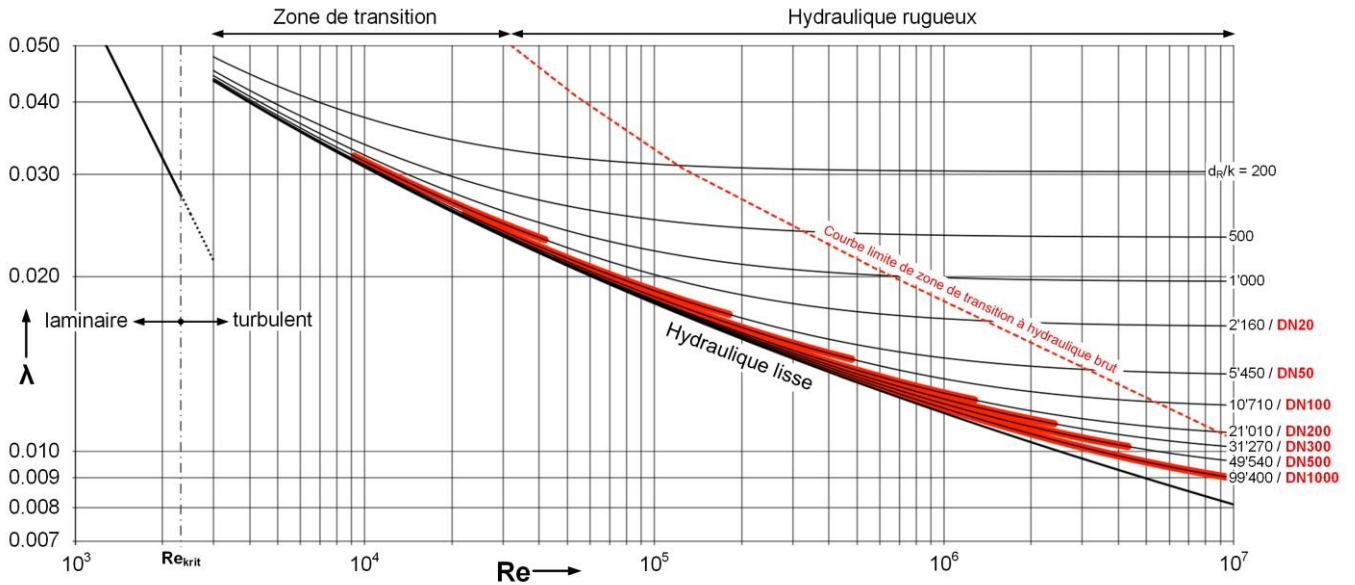


Fig. 7.6 Diagramme Moody (diagramme Colebrook) pour le coefficient de friction de la conduite de l'écoulement dans la conduite λ déterminé en fonction du nombre de Reynolds Re . Les éléments en surbrillance en rouge sont des diamètres nominaux courants et la zone correspondante du coefficient de friction de la conduite λ et du nombre de Reynolds Re pour une rugosité des conduites k de 0,01 mm, jusqu'à une vitesse d'écoulement maximale conforme à [120].

Tableau 7.3 Rugosité k in mm pour différentes conduites et matériaux de conduites [49]

Matériau	Type	Etat	Valeur k
Cuivre	étiré ou filé	neuf (également tubes en acier avec revêtement de matériau indiqué)	0.0013-0.0015
Laiton			
Bronze			
Métal léger			
Verre			
Caoutchouc	Tube de pression	neuf	0.0016
Plastique		neuf	0.0015-0.007
Acier	sans soudure (courant)	neuf	
		- croûte de laminage	0,02-0,06
		- décapé	0,03-0,04
	à soudage longitudinal	neuf	
		- croûte de laminage	0,04-0,10
		- bitumé	0,01-0,05
sans soudure et à soudage longitudinal	- galvanisé	0,008	
	usagé		
		- moyennement rouillé ou recouvert d'une fine croûte	0.1-0.2
		valeur indicative recommandée pour les calculs de la perte de pression dans les conduites de chauffage à distance [41]	0.01
Fonte		neuf	
		- avec peau de fonderie	0,2-0,6
		- bitumé	0,1-0,2
		usagé	0.5-1.5
Fibres-ciment		neuf	0,03-0,1
Béton		neuf	
		- avec lissage minutieux	0,1-0,2
		- avec lissage	0,3-0,8
		- modérément rugueux	1-2
		- rugueux	2-3

7.2.2 Perte de pression des annelés

Le coefficient de friction de la conduite de l'écoulement dans la conduite λ pour un annelé (Fig. 7.7) est dans la zone laminaire identique à celui pour un tube lisse de façon inversement proportionnelle au nombre de Reynolds. Il est rare de trouver dans la littérature spécialisée des informations concernant des relations λ dans des zones turbulentes. La dépendance Re n'est tout particulièrement pas garantie dans l'ensemble de la zone correspondante techniquement. L'approche suivante s'applique pour le champ d'application suivant conformément à [45]:

Champ d'application:

$$5 \cdot 10^4 < Re < 3 \cdot 10^5$$

$$0.2 < \frac{h}{a} < 0.6$$

$$0.0455 < \frac{h}{d} < 0.0635$$

Formule approximative:

$$\lambda = 3400 \left(\frac{h}{d}\right)^{4.13} \left(\frac{h}{a}\right)^{2.30} \left(\frac{h}{d}\right)^{-0.7} Re^{0.193} e^{\left[-3300 \left(\frac{h}{d}\right)^{2.6} \frac{h}{a}\right]}$$

Une approche simplifiée résulte de [45] pour le champ d'application suivant:

Champ d'application:

$$Re = 5 \cdot 10^4$$

$$0.2 < \frac{h}{a} < 1.2$$

Formule approximative:

$$\lambda = 0.2 \left(\frac{h}{d}\right)^{0.6} \left(\frac{a}{h}\right)^{0.7}$$

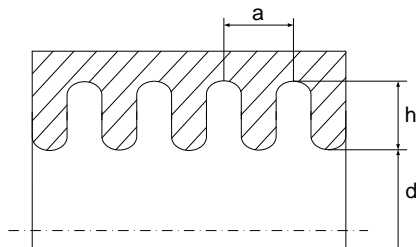


Fig. 7.7 Section d'un tube ondulé avec les dimensions nécessaires au calcul du coefficient de friction.

L'augmentation du coefficient de friction de la conduite λ est typique du flux turbulent dans des annelés où $Re > 4 \times 10^4$. Ce phénomène se réduit à la formation de différentes formes de tourbillons (tourbillon primaire et secondaire) dans les protubérances de la paroi. Du fait de leur fabrication, les tubes ondulés possèdent en général la forme d'un filetage. De ce fait, un mouvement rotatif est imprimé au fluide en plus du mouvement axial. Cette influence reste cependant faible sur la résistance. Toutefois, l'intensité de la rotation est significative concernant le transfert de chaleur, car elle peut empêcher des « zones d'eau morte » dans les sillons [45].

En cas de nombres de Reynolds identiques, les annelés présentent un coefficient de friction de la conduite λ bien supérieur (facteur 2 à 15 fois plus important). Etant donné que la perte de pression spécifique par mètre de tracé n'est pas trop élevée, les annelés doivent généralement avoir un à deux diamètres nominaux de plus que les tubes lisses.

7.2.3 Perte de pression des installations de conduites

Les installations comme les coudes, raccords distributeurs, vannes, etc. génèrent des pertes de pression supplémentaires. En principe, l'écoulement dans la conduite est perturbé après installation en cas de flux turbulent sur une longueur de 10 à 30 d, moyennant quoi d'autres pertes de pression surviennent en plus des pertes dans les vannes, les échangeurs de chaleur, etc. dans la conduite connectée par rapport aux pertes de conduites dans le cas de tube droit.

Toutes les pertes résultant du montage d'une armature sont comprises dans la valeur ζ des installations, par rapport aux pertes de la conduite droite.

On renonce ici à une dérivation et une liste des diverses équations de calcul pour des installations de conduites. Pour comparaison on recommande les livres suivants contenant des informations relatives aux coefficients de perte concernant les installations les plus courantes: Glück [45], Wagner [49] et Böswirth [46] ainsi que celui d'Idelchik, en anglais [47]. Au cours de la planification, il convient de recourir aux instructions du fabricant des installations concernées.

7.3 Dimensionnement du diamètre des conduites

Le dimensionnement du diamètre des conduites se base sur la perte de pression spécifique par mètre de longueur de conduite. Pour ce faire, des valeurs indicatives des pertes de pression spécifiques sont indiquées.

QM Chauffage au bois [21] recommande une conception avec une chute de pression spécifique moyenne de 150 à 200 Pa/m pour le point le plus défavorisé. Le point le plus défavorisé correspond dans la plupart des cas à une conduite de chauffage à distance de la centrale thermique jusqu'au consommateur de chaleur le plus éloigné dans le réseau.

En raison des niveaux instables des diamètres nominaux des conduites de chauffage à distance, il est impossible d'atteindre une perte de pression moyenne de 200 Pa/m dans une section de puissance plus longue avec des sections de conduites variables dans le cadre d'une conception conséquente des lignes partielles adaptée à une perte de pression spécifique maximale de p. ex. 200 Pa/m. Pour cette raison et sur la base des expériences pratiques, on recommande une conception de lignes partielles adaptée à une chute de pression

spécifique maximale de 250 à 300 Pa/m pour l'installation finale prévue à la température de conception. La chute de pression spécifique maximale est atteinte essentiellement en cas d'un faible nombre d'heures de marche, le réseau de chauffage à distance étant pour ainsi dire « surdimensionné » le restant de l'année.

L'Fig. 1.4 met en évidence des recommandations relatives au diamètre nominal par rapport à des vitesses d'écoulement maximales avec des pertes de pression spécifiques constantes de 100 Pa/m, 200 Pa/m et 300 Pa/m. Les vitesses d'écoulement maximales avec des pertes de pression spécifiques constantes sont calculées sur la base des coefficients de résistance de la conduite de 0,020 pour DN 20, 0,016 pour DN 80 et 0,015 pour DN 400. Les coefficients de résistance de la conduite se basent sur la formule approximative pour la zone de transition (chapitre 7.2.1). La comparaison indique que les recommandations de l'ÖKL [120] pour des conduites principales et conduites de dérivation jusqu'à DN150 induisent une conception identique à celle si des pertes de pression max. d'un peu moins de 300 Pa/m étaient prises en compte.

Des rugosités de conduites hydrauliques généralement de 0,04 à 0,05 mm sont souvent utilisées en cas de dimensionnement et de calculs du diamètre de conduite. Selon [41] il est cependant recommandé d'utiliser une **rugosité de conduite maximale hydraulique de 0,01 mm** pour calculer la perte de pression.

7.3.1 Recommandations

On recommande pour le dimensionnement du diamètre des conduites:

- **rugosité des conduites** hydraulique $k \leq 0,01$ mm,
- conception des **différentes lignes partielles** pour l'installation finale prévue à une température de conception pour une chute de pression spécifique max. de **250 bis 300 Pa/m**. Il convient de choisir un diamètre nominal pour lequel la chute de pression spécifique maximale est précisément inférieure,
- utilisation d'une chute de pression spécifique moyenne de **150 à 200 Pa/m** (p. ex. pour le point le plus défavorisé) comme **valeur de contrôle**.

D'autres facteurs, difficiles à évaluer lors de la planification, sont néanmoins à prendre en compte pour le dimensionnement et l'évaluation du diamètre des conduites, tels que:

- écart de température effectif lors de l'exploitation,
- demande de puissance effective dans le cadre de l'installation finale,
- évaluation des réserves d'extension,
- estimation du potentiel de rénovation du parc immobilier à raccorder pour le cycle de vie prévu du réseau de chauffage à distance au moment de la planification.

Pour les systèmes de conduites à tube pré-isolé en métal, tube pré-isolé en métal duo, tube médian en métal, tube

médian en métal-duo, tube médian en plastique et tubes médians en plastique-duo, on trouve dans Fig. 13.1 des valeurs indicatives pour d'éventuelles puissances de transfert en cas de différents écarts de température de 15 K, 30 K et 45 K avec une perte de pression spécifique de 300 Pa/m et dans Fig. 13.2 des valeurs indicatives pour d'éventuelles puissances de transfert en cas de différentes pertes de pression spécifiques de 100 Pa/m, 200 Pa/m et 300 Pa/m pour un écart de température de 30 K.

Les valeurs se basent sur les hypothèses suivantes:

- Epaisseur 983 kg/m³
- Viscosité cinématique 4,74 10⁻⁷ m²/s
- Capacité thermique 4183 kJ/(kg K)
- Rugosité des conduites hydraulique 0,01 mm

7.3.2 Procédure

7.3.2.1 Préparation

Un plan de conduite doit d'abord être élaboré: représentation schématique du réseau de chauffage complet qui ne soit pas à l'échelle. Le plan de conduite sert de base à la conception du réseau de chauffage. Les conduites se divisent en:

- conduite(s) principale(s),
- conduites de dérivation,
- conduites de raccordement domestique.

Le plan de conduite est ensuite réparti en sections partielles, chaque section devant posséder respectivement un débit et un diamètre de conduite identiques. Suite aux calculs on intègre:

- numéro de la section partielle,
- puissance thermique de la section partielle,
- débit de la section partielle,
- longueur de la section partielle,
- résistances unitaires de la section partielle,
- diamètre de conduite de la section partielle.

Indépendamment de la méthode de calcul, une section partielle se calcule comme suit:

1. calcul du débit à partir de la puissance thermique et de la différence de température,
2. détermination de la longueur de la section partielle (amenée+retour),
3. détermination de la somme des résistances unitaires dans la section partielle,
4. détermination provisoire du diamètre de conduite en se basant sur la puissance thermique et la différence de température au moyen de la Fig. 13.1 et la Fig. 13.2,
5. calcul de la vitesse d'écoulement réelle,
6. calcul de la perte de pression spécifique réelle.

7.3.2.2 Conception en quatre étapes

La conception véritable du réseau de chauffage s'effectue en quatre étapes. A cet effet, une section partielle est calculée en fonction des autres, le cas échéant plusieurs fois. Etant donné que la conception du réseau de chauffage dans son ensemble ne peut être que de nature itérative, il en ressort la procédure suivante:

1. calcul provisoire de la section la plus défavorisée,
2. vérification de la section la plus défavorisée,
3. calcul provisoire des conduites de dérivation et de raccordement domestique,
4. vérification de l'ensemble du réseau de chauffage.

Etape 1:

Détermination provisoire de la section la plus défavorisée (en général le consommateur de chaleur le plus éloigné), comprenant:

- la conduite principale la plus défavorisée,
- la conduite de dérivation la plus défavorisée,
- et la conduite de raccordement domestique la plus défavorisée.

Détermination d'une pression différentielle provisoire selon le consommateur le plus défavorisé (une valeur relativement élevée peut être nécessaire pour une autorité de la vanne suffisante). Détermination provisoire du diamètre de conduite en se basant sur la puissance thermique et la différence de température avec la Fig. 13.1 et la Fig. 13.2.

Il est possible tout d'abord d'adopter une perte de pression plus basse pour la conduite principale que pour la conduite de dérivation. Ceci engendre un comportement hydraulique plus favorable à la suite de la plus haute autorité des conduites de dérivation.

Si la somme des valeurs zêta des résistances unitaires n'est pas encore connue, celles-ci peuvent être projetées sur la longueur de tube sur la base de 10% à 20%.

Etape 2:

Vérification des chutes de pression avec les diamètres de conduites réels et les valeurs zêta définitives des résistances unitaires. On obtient comme résultat les pressions différentielles réelles au niveau des points de dérivation disponibles pour la conception des autres conduites de dérivation.

Etape 3:

La procédure est fondamentalement identique à l'étape 1. La seule différence en revanche consiste à ce que la pression différentielle soit ici définie au niveau du point de dérivation, qui doit être «utilisé» dans la conduite de dérivation concernée et la conduite de raccordement domestique la plus défavorisée de cette dérivation.

Etape 4:

Détermination finale de la section la plus défavorisée. Celle-ci pourrait encore avoir été modifiée par rapport à l'hypothèse de l'étape 1. Vérification des chutes de pression par rapport aux diamètres de conduites définitifs et

aux valeurs zêta des résistances unitaires. Lorsque des pressions différentielles suffisamment importantes sont disponibles, des diamètres de conduites inférieurs peuvent être choisis. Des chutes de pression doivent plutôt être supprimées au niveau des sections standard des vannes de réglage et non dans des organes d'étranglement, afin d'obtenir de meilleures autorités de la vanne.

7.3.3 Méthodes de calcul

Différentes méthodes permettent de calculer la perte de pression et par conséquent de déduire le dimensionnement de la conduite.

7.3.3.1 Manuelles

à l'aide de feuilles de calculs, de tableaux et de formulaires relatifs au calcul du réseau de conduite. Pour ce faire sont nécessaires:

- valeur R, débit, vitesse, pression dynamique pour différents diamètres de conduites,
- valeurs zêta pour différents composants,

Comme mentionné dans le chapitre 7.3.1 Recommandations, il est conseillé d'utiliser une rugosité des conduites hydraulique de 0,01 mm max. Etant donné que des publications présentées aujourd'hui sont calculées avec une rugosité des conduites particulièrement élevée, on trouve en annexe 13.3 un tableau de valeur R avec une rugosité des conduites hydraulique de 0,01 mm max.

7.3.3.2 Programme de calcul

Des programmes de calcul du réseau de tubes purs existent, qui ne servent qu'à calculer les pertes de pression, comme p. ex. le programme de calcul du réseau de caniveaux et de tubes disponible gratuitement sur Internet au format EXCEL du Centre de technique intégrale du bâtiment (ZIG) de la Haute école de Lucerne - Technique et Architecture: www.hslu.ch/zip. Ce programme permet de définir gratuitement la rugosité des conduites.

Des programmes de calcul plus complets qui intègrent non seulement la détermination des pertes de pression, mais aussi les rejets de chaleur et qui permettent ainsi d'optimiser l'installation globale. Voici des exemples de programmes de calcul commerciaux:

- EC-Netz
- STANET
- R-Design
- ROKA GS
- SIR-3S
- Termis

Il faut tenir compte pour les calculs que la plupart du temps des rugosités des conduites > 0,01 mm (env. 0,04 à 0,05 mm) sont spécifiées comme valeur prédéterminée. Cette valeur peut néanmoins être adaptée.

7.4 Conception de la pompe

7.4.1 Courbe caractéristique des pompes

La courbe caractéristique des pompes indique la hauteur de refoulement en fonction du débit. Il est possible de distinguer les courbes caractéristiques des pompes plates ou pentues (Fig. 7.8). Plus la courbe caractéristique des pompes est pentue, plus les variations de pression et la défaillance du réseau hydraulique sont importantes, en cas de modification du débit. Une courbe pentue peut cependant être un avantage pour réguler la pression différentielle.

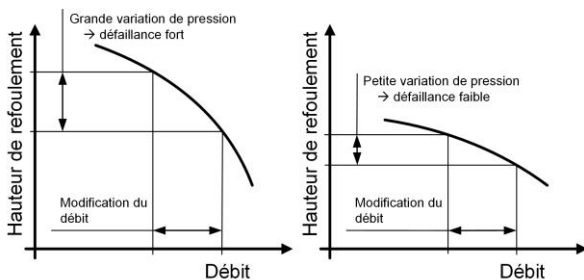


Fig. 7.8 Courbes caractéristiques des pompes plates (droite) ou pentues (gauche) [21].

7.4.2 Courbe caractéristique des installations

Les pertes de pression du réseau augmentent avec le débit. Cette interdépendance est représentée dans la courbe caractéristique des installations. Etant donné que les courbes caractéristiques des pompes et les courbes caractéristiques des installations décrivent la dépendance entre la pression (hauteur de refoulement) et le débit, les deux peuvent être intégrées dans le même système de coordination (Fig. 7.9). Les deux courbes possèdent une intersection commune. Celle-ci est le point de fonctionnement de la pompe. Dans le point de fonctionnement, la hauteur de refoulement de la pompe est tout aussi élevée que la perte de pression de l'installation.

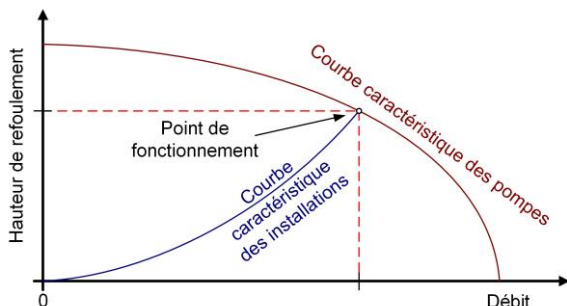


Fig. 7.9 Courbe caractéristique des pompes et des installations dans le même système de coordonnées.

7.4.3 Lois de proportionnalité

En cas de modification de la vitesse de rotation d'une pompe de circulation, la hauteur de refoulement, le débit et la puissance hydraulique se comportent conformément aux trois lois de proportionnalité suivantes.

Le débit se comporte proportionnellement à la vitesse de rotation de la pompe:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

La hauteur de refoulement (pression différentielle) change en fonction du carré de la vitesse de rotation:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

La puissance hydraulique de la pompe varie en fonction du cube de la vitesse de rotation:

$$\frac{P_{hydr 1}}{P_{hydr 2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

À la moitié de la vitesse de rotation, le débit baisse ainsi de moitié, la hauteur de refoulement, donc la chute de pression, baisse d'un quart et la demande de puissance de la pompe d'un huitième.

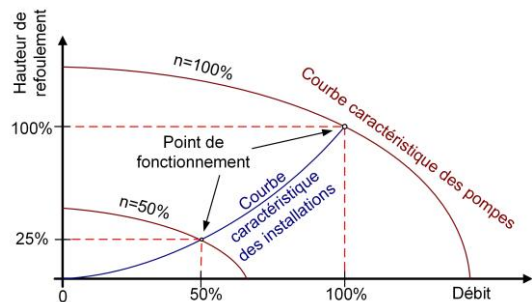


Fig. 7.10 Courbes caractéristiques des pompes et installations pour deux fréquences différentes.

7.4.4 Demande de puissance pompes

Le débit nécessaire de la pompe de circuit de chauffage à distance découle du débit de l'ensemble du réseau de chauffage, donc du débit nécessaire dans la première section partielle immédiatement après la pompe de circuit de chauffage à distance. Le débit pertinent pour la conception de la pompe résulte du besoin de chaleur du consommateur de chaleur à appliquer et des rejets de chaleur à compenser dans le réseau le jour le plus froid de l'année en cas d'écart de température défini dans le réseau.

$$\dot{V}_P = \frac{\dot{Q}_N}{\rho_W c_{pW} \Delta T_N}$$

La hauteur de refoulement nécessaire de la pompe de circuit de chauffage à distance dérive de la somme de:

- la perte de pression au niveau du consommateur de chaleur le plus défavorisé (point le plus défavorisé → conduite principale, conduite de distribution et conduite de raccordement domestique),
- la pression différentielle nécessaire au niveau du raccordement domestique du consommateur de chaleur le plus défavorisé,
- d'autres pertes de pression, pas prises en compte jusqu'à présent, avant la pompe de circuit de chauffage à distance, comme vanne de réglage de régulation, réservoir, conduites de raccordement, etc., qui se trouvent la plupart du temps dans la centrale thermique.

$$H_P = \frac{\Delta p_{SP} + \Delta p_{HA} + \Delta p_{WE}}{\rho_W g} = \frac{\Delta p_P}{\rho_W g}$$

Ce faisant le point de fonctionnement est connu dans les conditions d'application et des pompes de circuit de chauffage à distance peuvent être recherchées avec des courbes caractéristiques des pompes. Etant donné que le rendement des pompes (rendement hydraulique et électrique) indique une forte dépendance au débit, il faut veiller pour la conception à ce que la pompe d'une part atteigne le débit et la hauteur de refoulement dans le point d'application et d'autre part dans le point de fonctionnement le plus fréquent (en général en cas de charge partielle) présente un rendement élevé. Les données relatives au rendement hydraulique sont déterminées par le fabricant par le biais de mesures du banc d'essai et comptabilisées dans la courbe caractéristique des pompes. Le rendement le plus élevé au niveau des pompes pour des réseaux de chauffage à distance se situe en général entre 65% à 85%. Un rendement (hydraulique et électrique) de 75% peut être utilisé pour estimation.

Le débit de la pompe peut se calculer à partir du débit et de la hauteur de refoulement de la manière suivante:

$$P_P = \frac{\Delta p_P \dot{V}_P}{\eta_{hydr} \eta_{el}} = \frac{H_P \rho_W g \dot{V}_P}{\eta_{hydr} \eta_{el}} = \frac{H_P \rho_W g \dot{V}_P}{\eta_P}$$

7.4.5 Besoins énergétiques pompes

Il est important que les pompes soient utilisées avec un rendement le plus élevé possible. Dans un cas normal, le rendement de la pompe doit donc, au moins, être calculé au point de fonctionnement. Il vaut la peine de comparer les pompes entre elles, comme l'indique la Fig. 7.11. De plus petites pompes ont habituellement des rendements plus bas que celles de plus grandes tailles. Ainsi de petites pompes atteignent au meilleur point de fonctionnement à peine plus de 50%. L'utilisation récente de moteurs synchrones à courant continu s'est révélée une amélioration substantielle, même pour les petites pompes.

La consommation énergétique annuelle des pompes est déterminée par les valeurs moyennes additionnées des capacités de débit résultantes et des pressions de refoulement provenant de la courbe annuelle du réseau.

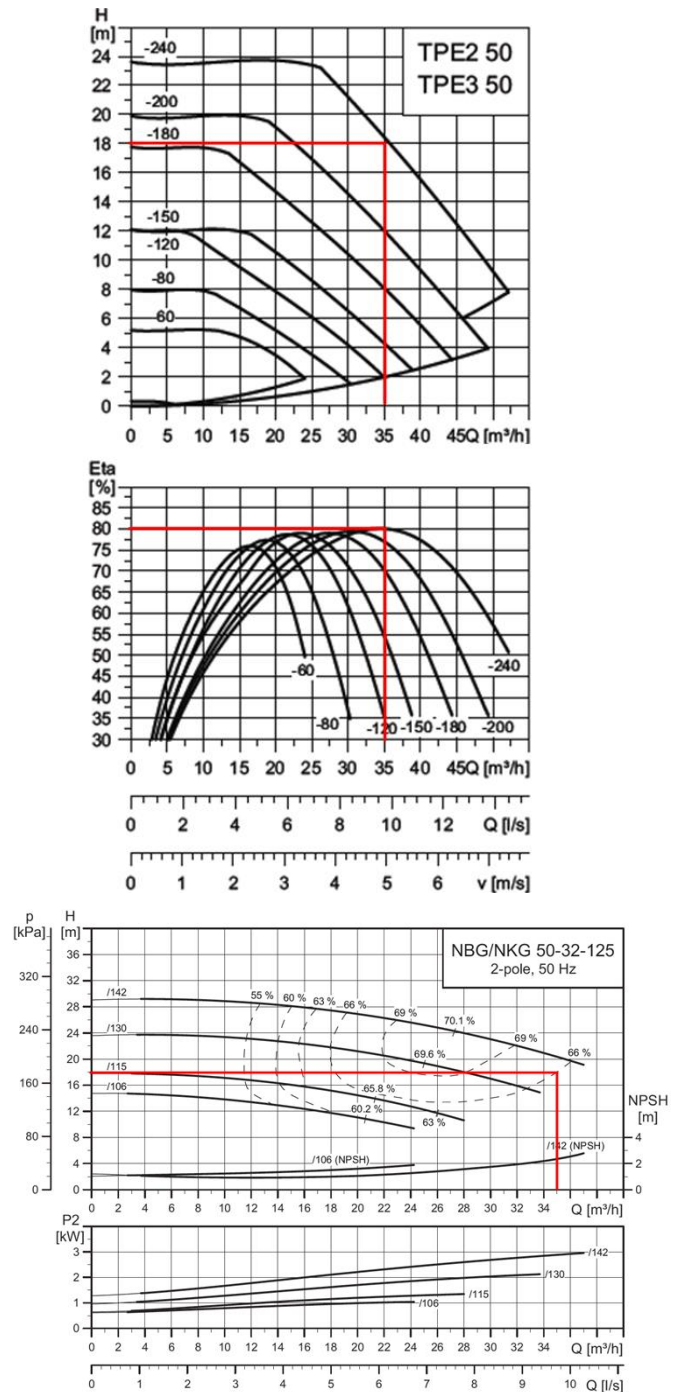


Fig. 7.11 Exemple pour deux pompes avec une hauteur de refoulement de 18 m et débit volumique de 35 m³/h [Source Grundfos]. Différents rendements résultent selon la conception et le point de fonctionnement:
 80% (haut): Pompe en ligne avec diamètre de turbine de 240 mm et moteur à aimant permanent à haute efficacité.
 66% (bas): Pompe normalisée avec diamètre de turbine de 125 mm avec moteur normalisé IE3 (moteur asynchrone).

A cet effet le type d'exploitation des pompes et le rendement spécifique de la pompe influent sur le besoin en électricité. Le rapport suivant suffit comme approximation rapide du besoin en électricité de la pompe, dans lequel la puissance nominale de la pompe est multipliée par les heures d'exploitation à pleine charge du consommateur de chaleur:

$$E_p = P_p \tau_{WA}$$

Dans le cas d'une conception optimale du réseau de chauffage à distance, les besoins énergétiques annuels des pompes s'élèvent par expérience entre 0,5% et 1% de la chaleur distribuée.

7.4.6 Particularités de conception

Les pompes de circuit de chauffage à distance sont au cœur des installations de chauffage à distance. Une chaleur fournie est impossible sans son fonctionnement sûr. Ce paragraphe va aborder des particularités en matière de conception et d'aménagement des pompes dans le cas d'installations de chauffage à distance, afin de pouvoir garantir l'alimentation aussi en cas d'états de service variables. Dans le cas des réseaux de chauffage à distance, ceci devient particulièrement significatif lorsque la mise en service s'effectue avec un nombre encore plus petit de clients raccordés. Souvent un dimensionnement planifié du réseau est déjà réalisé dans ce cas pour le développement ultérieur. L'exploitation est donc intégrée au réseau avec des débits

volumiques faibles et des pressions différentielles du réseau nettement moindres.

7.4.6.1 Problématique de surintensité

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, les pompes doivent être exploitées aussi bien dans des cas d'utilisation typiques que dans le domaine d'un rendement élevé. Cependant, il faut tenir compte de la situation selon laquelle la pression de la pompe nécessaire est faible en cas de réseau soumis à une faible charge ou de réseau ne se trouvant pas encore dans l'installation finale prévue. Ainsi, le courant de pompe peut augmenter suite à une résistance de réseau hydraulique faible et en cas de débit du courant de pompe spécifiquement élevé et dépasser la limite de la protection contre les surintensités du moteur de pompe. Afin de renforcer l'exploitation de la pompe, il est recommandé de choisir le point de fonctionnement (courbe caractéristique des installations) de la pompe dans un intervalle significatif par rapport au débit maximal Q_{Max} . Ainsi on évite un dépassement des limites de consommation de courant du moteur. Un rendement de la pompe légèrement réduit doit éventuellement être envisagé à cet effet le cas échéant. Le seuil de courant de surcharge doit aussi être pris en compte dans le cas de charge partielle, car une consommation de courant réduite est possible pour le moteur à une vitesse réduite (Fig. 7.12).

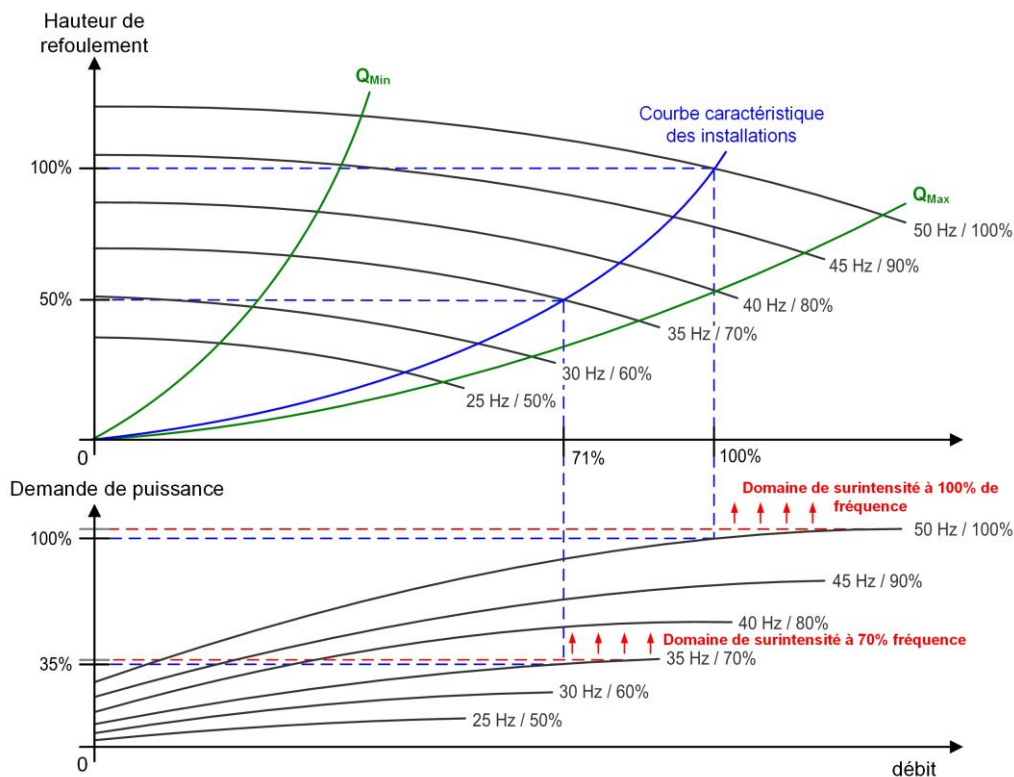


Fig. 7.12 Exemple de courbe caractéristique pour une pompe réglée avec variateur de fréquence. On peut voir la hauteur de refoulement (en haut) et la demande de puissance (en bas) en fonction du débit volumique ainsi que la représentation du débit volumique admissible maximal (Q_{Max}) et minimal (Q_{Min}) de la pompe (en haut). Une courbe caractéristique des installations (en bleu) et le domaine de surintensité sont intégrés par la suite comme exemples.

7.4.6.2 Vitesse de circulation

En présence d'une superposition de pression suffisante, une cavitation peut être évitée pour des pompes de chauffage à distance. Cependant des dommages causés par la cavitation et l'érosion peuvent survenir en cas de vitesses d'écoulement élevées en particulier au niveau de l'amenée de la pompe, mais également au refoulement de la pompe. Il est par conséquent recommandé pour l'aménagement d'un fonctionnement des pompes robuste de choisir les sections d'amenée et aussi les sections de refoulement, afin qu'aucune vitesse d'arrivée (> 3 m/sec. pour DN100) ni vitesse de refoulement particulièrement élevée n'ait lieu dans un cas d'utilisation normale. En choisissant la section d'amenée et de refoulement, et par la même l'aménagement technique des pompes, pour autant que cela soit éligible dans la planification, les pompes deviennent davantage compatibles avec d'éventuels débits élevés.

7.4.6.3 Débit minimal

Pour le fonctionnement des pompes les fabricants de pompes fixent des débits minimums Q_{Min} liés à la puissance (Fig. 7.12). Pour des pompes courantes dans le chauffage à distance, ceux-ci se situent à 25% du débit maximal. Le débit minimal sert d'une part à protéger la pompe de la surchauffe, d'autre part à protéger les garnitures mécaniques dont dépendent la lubrification et le refroidissement effectuées par le fluide interne. Les dépassements du débit minimal doivent être évités et garantis en tenant compte de la température du fluide, p. ex. par le biais d'un système bypass en cas de débit de réseau faible.

7.5 Statique des conduites

Ce paragraphe contient des bases de calcul, des recommandations et des caractéristiques de conception en vue de l'évaluation de la résistance et de l'aménagement correct des conduites et des composants de canalisations. Sont prises en considération les conduites de distribution de chaleur et les conduites de raccordement des installations. Le paragraphe représente des rapports et méthodes fondamentaux concernant les calculs de la résistance des conduites et les calculs des contraintes thermiques, ainsi que certains outils et diagrammes pour l'aménagement des supports de tuyauterie et compensations de la dilatation. Des aspects de la technique de pose sont abordés, afin de pouvoir évaluer la conception statique des conduites posées en pleine terre.

Pour des raisons de place, le présent guide de planification ne peut pas traiter de calculs statistiques approfondis et de vérification statique d'une conduite de chauffage à distance, notamment pour les systèmes de tubes posés en pleine terre les plus utilisés. Nous vous renvoyons donc explicitement aux documents adéquats comme les cahiers techniques de l'AGFW (FW 401 [100], FW 410 [101] et FW 411 [102]) ou aux normes telles que SN EN13941 [94].

7.5.1 Qu'est-ce que la statique des conduites?

Les calculs et la documentation de la statique des conduites vise à installer, isoler et exploiter les conduites de distribution de chaleur, de sorte qu'aucun dommage ne survienne par des obstructions de mouvement sur une durée de vie raisonnablement longue (au moins 50 ans dans le cas de systèmes posés en pleine terre et au moins 80 ans pour des systèmes posés à l'air libre). L'exploitant de l'installation est responsable de l'exécution adéquate et de l'exploitation conforme aux règles des appareils sous pression et donc le cas échéant également des conduites contenant des fluides caloporteurs. Il est tenu au cours du déroulement du projet, d'exiger la vérification statique lors de la mise en place d'une installation de chauffage à distance.

Savoir comment contourner les tubes avec l'extension longitudinale, a des conséquences directes sur la planification du tracé (voir plus bas le chapitre 4.7.2). Le planificateur doit être informé des questions suivantes:

- Comment réagit la conduite en cas de montée en température?
- Comment l'extension longitudinale peut-elle être amortie?
- Qu'est-ce qu'une précontrainte et comment fonctionne-t-elle?

Une conduite s'étend en cas de **montée en température** à un point fixe dans les deux directions. Cette extension doit être amortie de quelque manière que ce soit (Fig. 7.13).

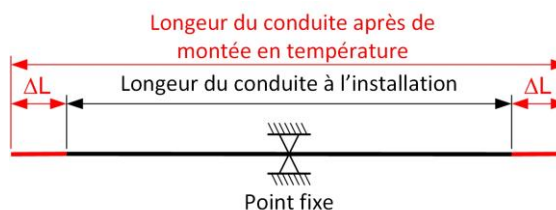


Fig. 7.13 Représentation schématique de l'extension thermique.

L'absorption de l'**extension longitudinale** s'effectue de manière naturelle par coude de dilatation (arc/coude en L, Z ou U). Des compensateurs peuvent également être utilisés pour les lignes électriques.

Grâce à la **précontrainte**, l'extension longitudinale des conduites est réduite en état de service. Des coudes de dilatation p. ex. peuvent donc être diminués. On différencie la précontrainte thermique de la précontrainte mécanique (à froid).

Les chapitres suivants donnent un aperçu des fondements physiques ainsi que des solutions possibles en matière d'installation et permettent aux techniciens, planificateurs et ingénieurs de se représenter les liens fondamentaux relatifs à la statique des conduites et de traiter eux-mêmes de questions simples en matière de statique des conduites.

Remarque: Les explications relatives à la statique des conduites se réfèrent aux catégories d'acier P235TR1, P235TR2 et P235GH (St. 37.0 ou St. 35.8) couramment utilisées dans les conduites de chauffage à distance. En dépit d'un coefficient de dilatation près de 20 fois supérieur, pour les tubes médians PE ou PEX, des conditions complètement différentes s'appliquent et sont traitées à la fin du chapitre.

7.5.1.1 Résistance à la compression et épaisseur de paroi

Le paragraphe suivant traite des calculs simplifiés des contraintes engendrées par la pression seule dans les réservoirs ou les tubes et des épaisseurs de paroi nécessaires qui en découlent. Ces calculs simplifiés permettent déjà une évaluation ou une détermination des contraintes et des épaisseurs de paroi avec des résultats majoritairement fiables pour l'étude de projet ou la conception approximative d'un réservoir ou d'un tube.

Le calcul de la résistance à la compression et de l'épaisseur de paroi des réservoirs cylindriques et des tubes s'effectue en prenant en compte l'état de contraintes multiaxial. Ce dernier existe dans le cas d'une forme cylindrique dérivant de la superposition de contraintes linéaire, circonférentielle et radiale ou interne. A partir d'hypothèses relatives à la résistance, les calculs de contraintes équivalentes s'effectuent sous une forme simplifiée. Ainsi le calcul d'un état de contrainte complexe est ramené à des rapports facilement applicables.

Le calcul de la résistance s'effectue selon le schéma représenté dans la Fig. 7.14. La branche gauche peut être résumée par le terme de détermination des contraintes, alors que la branche droite a essentiellement pour fonction la détermination de la capacité de charge. Le lien entre deux conditions marginales n'est établi qu'à la condition que la sollicitation du composant ne dépasse pas la capacité du matériau [50].

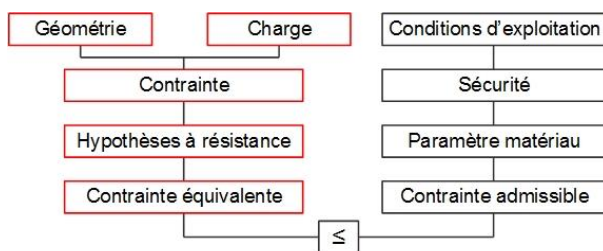


Fig. 7.14 Schéma pour le calcul de résistance [50]. A gauche: Détermination des contraintes; A droite: Détermination de la capacité de charge

Selon la Fig. 7.14, la condition de résistance est donnée en comparant la contrainte équivalente σ_v selon l'hypothèse de la contrainte de cisaillement (SH) avec la contrainte admissible σ_{zul} dans le composant par le biais de l'équation suivante:

$$\sigma_v (SH) \leq \sigma_{zul}$$

La contrainte équivalente σ_v selon l'hypothèse de la contrainte de cisaillement (SH) pour les conduites et les

réservoirs cylindriques, également appelé formule de Barlow, est exprimée ainsi:

$$\sigma_v = \frac{p d_m}{2 s}$$

La contrainte admissible doit garantir que la contrainte

calculée avec une sécurité suffisante S reste dans les caractéristiques de résistances correspondantes du matériau (R_e , R_m).

$$\sigma_{zul} = \frac{R_e}{S_e} = \frac{R_m}{S_m}$$

Les facteurs de sécurité habituels sont:

- $S_e = 1.5$
- $S_m = 2.4$

L'épaisseur de paroi s peut être calculée en modifiant la formule de Barlow de la manière suivante:

$$s = \frac{p d_m}{2 \sigma_v}$$

L'épaisseur de la paroi de tube arithmétique s_v peut aussi être calculée selon le Tableau 7.4.

Lors de la détermination de l'épaisseur de paroi commandée, les tolérances de fabrication et l'usure causée par la corrosion doivent être prises en compte en réalisant les majorations correspondantes (c_1 , c_2).

L'épaisseur minimale de paroi à spécifier s est donc:

$$s = s_v + c_1 + c_2$$

Il en résulte donc l'épaisseur de paroi commandée s_e :

$$s_e \geq s$$

Dans [50] (8e édition 2012, page 33ff) vous trouverez des indications détaillées relatives aux calculs et des informations concernant les marges de sécurité etc.

Tableau 7.4 Equation pour le calcul de l'épaisseur de la paroi du tube ou cylindre s_V avec pression interne sans majorations et tolérances pour des charges essentiellement statiques (selon [50]).

Règle de calcul	Limites d'application	Contrainte du matériau et contrainte équivalente	Equations de calcul avec	
			Diamètre extérieur	Diamètre intérieur
SN EN 13480-3 [93]	$d_a/d_i \leq 1.7$	Hypothèse de contrainte de cisaillement entièrement en plastique (contrainte moyenne)	$s_V = \frac{d_a p}{2 \sigma_{zul} v_N + p}$	$s_V = \frac{d_i p}{2 \sigma_{zul} v_N - p}$
	$d_a/d_i > 1.7$	Equation de Lamé	$s_V = \frac{d_a}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_{zul} v_N - p}{\sigma_{zul} v_N + p}} \right)$	$s_V = \frac{d_i}{2} \left(\sqrt{\frac{\sigma_{zul} v_N + p}{\sigma_{zul} v_N - p}} - 1 \right)$
AD2000 [119]	$d_a/d_i \leq 1.2$ (pour $d_a \leq 200$ mm $d_a/d_i \leq 1.7$)	Hypothèse de contrainte de cisaillement entièrement en plastique (contrainte moyenne)	$s_V = \frac{d_a p}{2 \sigma_{zul} v_N + p}$	$s_V = \frac{d_i p}{2 \sigma_{zul} v_N - p}$
	$1.2 \leq d_a/d_i \leq 1.5$	élastique Hypothèse GE (pic de contrainte)	$s_V = \frac{d_a p}{2.3 \sigma_{zul} - p}$	$s_V = \frac{d_i p}{2.3 \sigma_{zul} - 3 p}$

v_N = valeur du cordon de soudure (dans le cas de conduites sans soudure =1, dans le cas de joints de soudure selon exécution 0.7-1)

Le résultat d'une tension calculée d'une paroi de conduite ou de cylindre ne s'applique qu'en prenant en compte la pression comme cause de tensions des matériaux et à condition de tenir compte des tensions admissibles (σ_{zul}) de chaque matériau. Ces tensions admissibles dépendent entre autres de la température d'exploitation minimale et maximales et de l'épaisseur de paroi. Ainsi la contrainte admissible réduit au sein de matériaux métalliques avec des températures ambiantes et épaisseurs de paroi en augmentation. La tension admissible à température ambiante pour un matériau de conduite typique P235GH (référence matériau 1.0345, ancienne dénomination St35.8 ou encore tôle pour chaudière HII) est de 235 N/mm² pour une épaisseur de paroi < 16 mm. Pour des épaisseurs de paroi de 40 à 60 mm, la contrainte admissible à température ambiante se situe seulement à 215 N/mm². A une température de 100°C, la contrainte admissible est encore de 198 N/mm² et à 200°C de 170 N/mm².

7.5.1.2 Contrainte de flexion des conduites

La calcul de la contrainte de flexion σ_B des conduites s'effectue selon la corrélation suivante:

$$\sigma_B = \frac{M_B}{W_B}$$

Le moment de flexion M_B doit être individuellement évalué et calculé en fonction du cas de charge. Le moment de résistance W_B pour un arbre creux ou une conduite se calcule de la manière suivante:

$$W_B = \frac{\pi (d_a^4 - d_i^4)}{32 d_a}$$

7.5.1.3 Dilatation thermique et contrainte thermique

Un composant fixé unilatéralement Fig. 7.15 s'étire en cas de réchauffement de la température initiale T_0 à la température finale T_1 du montant ΔL .

$$\Delta L = L \alpha_L \Delta T$$

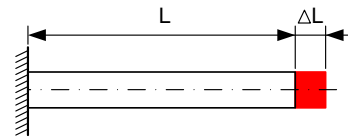


Fig. 7.15 Dilatation thermique d'un composant fixé unilatéralement (selon [50]).

Si la dilatation thermique est entravée, des tensions apparaissent (Fig. 7.16). La cause peut en être un serrage fixe, différentes températures à différents endroits du composant ou des coefficients de dilatation irréguliers dans le composant.

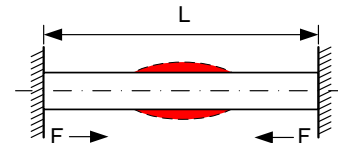


Fig. 7.16 Dilatation thermique d'un composant fixé des deux côtés (selon [50]).

Le tassement ou la dilatation est définie ainsi:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

La tension dans la zone de la Loi de Hooke (zone d'élasticité) est proportionnelle aux dilatations ou aux contractions. Il en découle le facteur de proportionnalité E (module E) de la corrélation suivante:

$$\sigma = \varepsilon E$$

Les valeurs admissibles maximales de tension résultent du matériau utilisé dans le composant et des températures régnant dans l'installation. La tension produite dans l'installation à une différence de température maximale ne doit pas dépasser la contrainte admissible maximale.

$$\sigma_T < \sigma_{zul}$$

La tension à une différence de température maximale se fonde sur:

$$\sigma_T = \varepsilon E = \frac{\Delta L}{L} E = E \alpha_L \Delta T$$

la différence de température maximale est donc:

$$\Delta T_{zul} = \frac{\sigma_{zul}}{E \alpha_L}$$

Tableau 7.5 coefficient de dilatation linéaire α_L et module E de certains matériaux.

Matériau	Coefficient de dilatation linéaire	Module E
	$10^{-6} / K$	
Acier non allié	12.0	210
Acier hautement allié	10.0 (ferritique), 16.7 (austénitique)	200
Cuivre	16.5	100-130
Aluminium	23.0	70
Fonte grise	9.0	90-145

7.5.1.4 Superposition de tensions

Pour une conception relative à la statique de la conduite et une vérification statique, toutes les tensions et leurs superpositions doivent être intégrées dans les calculs. Il ne suffit donc pas de concevoir une paroi de conduite ou une paroi de réservoir dépendant uniquement de la pression, mais il faut intégrer dans la vérification statique toutes les contraintes superposées issues de flexion, de torsion, de cisaillement, de chaleur et leurs conséquences mutuelles. Pour le calcul et l'évaluation des autres types de tensions, p. ex. tensions de cintrage, de torsion, de cisaillement et de chaleur p. ex., il convient de se référer à [50].

Pour une évaluation de la statique, la répartition temporelle de la charge s'ajoute aux tensions identifiées dans des conditions de charge limite. La charge d'un composant (conduite) peut être **statique (au repos)** ou **dynamique (variable)**. En cas de charge statique durablement constante (p. ex. pression interne constante dans un réservoir) un matériau présente habituellement une résistance à la fatigue plus élevée qu'en cas de charge variable (variations de pression) et de charge oscillante (changement effort de traction – contrainte de compression). Un nombre élevé d'alternances de charge conduit à une réduction de la résistance.

Pour des conduites et installations de chauffage à distance, il faut compter avec des **nombre d'alternance de charge** correspondants causés par des variations de températures. Par alternance de charge on entend un processus de chauffage/refroidissement dans la plage de température comprise entre la température d'exploitation minimale et maximale. Pour le calcul statique d'une conduite de chauffage à distance, il faut intégrer le nombre d'alternances de charge comme base de calculs. Ainsi des circuits de chauffage à distance, mis hors service de manière saisonnière, présentent des nombres d'alternances de charge sensiblement plus élevés que des conduites qui connaissent des variations de température faibles du fait de la puissance.

7.5.1.5 Vérification statique

Toutes les contraintes mécaniques se superposant sont prise en compte pour la vérification statique. Une vérification statique peut s'avérer très complexe. Les programmes de calculs p. ex. SIS-KMR, ROHR2, CAESAR, AUTOPIPE, EASYPIPE permettent une vérification statique périphérique selon l'application prévue. En raison de la complexité et la qualité requise des calculs relatifs à la statique de la conduite, une pratique d'application périphérique peut être utile pour le traitement ciblé. Ainsi la vérification statique est souvent fournie par des institutions et des personnes, qui apportent les connaissances et expériences correspondantes dans la résistance des matériaux et la statique.

Le résultat des calculs statiques pour les conduites comprend les points suivants:

- définition du tronçon de conduite considéré,
- référence à la pertinence du matériau choisi,
- vérification du respect des valeurs limites de tension du matériau pour le tronçon de conduite considéré dans le cadre des températures d'exploitation,
- vérification de l'observance des valeurs limites en prenant en compte les nombres d'alternances prévus,
- vérification de la statique du support de conduite,
- indication des contraintes et moments triaxiaux pour tous les éléments du tronçon de conduite considéré,
- vérification statique du support de conduite (points fixes, palier libre).

Concernant des tubes pré-isolés en métal posés en pleine terre les points suivants se rajoutent (voir également 7.5.3):

- charge du matériau d'isolation (mousse polyuréthane) et de l'enrobage PE.
- pertinence et dimensionnement des éléments de compensation comme les coussins de dilatation.

Les mesures suivantes peuvent découler des résultats des calculs statiques en cas d'infraction aux valeurs limites:

- adaptation des épaisseurs de paroi des éléments de conduites, coudes, pièces en T, branchements,

- allègement de la surcharge d'un élément de conduite par l'adaptation de la disposition géométrique,
- adaptation du positionnement des points fixes et des autres points de support.

Après correction de l'aménagement et de la conception du tronçon de conduite et après vérification supplémentaire de la statique dans la disposition corrigée, l'aptitude statique du tronçon de conduite peut être prouvée après ajustement de toutes les infractions aux valeurs limites.

7.5.2 Technique de pose et conception

7.5.2.1 Compensation de dilatation

Une compensation de la dilatation naturelle est habituellement préférée à une compensation de la dilatation thermique par des compensateurs, tout particulièrement lorsque l'aménagement du tracé présente déjà une géométrie permettant une compensation de la dilatation naturelle. Il est important que suite à la mise en service et à la dilatation linéaire, les conduites soient posées et montées avec le moins de tension possible.

Concernant les conduites posées en pleine terre mais aussi les conduites posées à l'air libre, un changement de direction des conduites permet une compensation de la dilatation naturelle. Les coudes de dilatation en décollant facilitent la déformation élastique de la conduite,

pour laquelle les variations de longueur sont compensées de manière naturelle. Les coudes de dilatation ou les compensateurs de la dilatation sont réalisés comme des tuyaux coudés (coudes en L), tuyaux coudés à l'équerre doubles (coudes en Z) et coudes en U (Fig. 7.18). Les conditions spécifiques sont mises en évidence concernant les tubes pré-isolés en métal au chapitre 7.5.3, pour les conduites posées à l'air libre au chapitre 7.5.4 et pour les tubes médians en plastique au chapitre 7.5.5.

La position angulaire du coude de dilatation dans le coude de dilatation a une influence supplémentaire sur la zone de dilatation, qui doit être absorbée ou compensée par coussin de dilatation (Fig. 7.17). Les coudes doivent être exécutés perpendiculairement si possible, car des coudes à 90° permettent de mieux absorber la dilatation. En cas de coudes avec un angle obtus (> 90°) la zone de dilatation augmente par rapport à un coude à 90°. On ne recommande généralement pas les coudes avec un angle aigu (< 90°).

Avec une précontrainte thermique, l'impact de la dilatation s'allège. Pour des systèmes à haute température, il est presque indispensable de précharger les conduites. La technique de précontrainte est décrite plus en détails dans les chapitres 7.5.3 et 7.5.4.

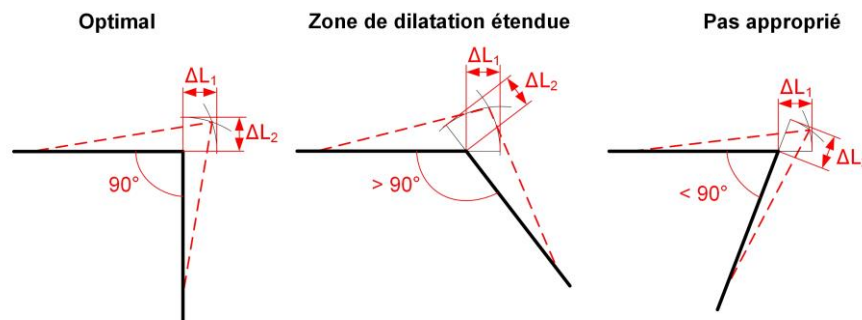


Fig. 7.17 Représentation exemplaire de la position angulaire d'un coude de dilatation. Les dilatations thermiques ΔL ($\Delta L_1 = \Delta L_2$) sont identiques dans les trois cas.

7.5.2.2 Température de référence relative à la statique des conduites

La température de référence relative à la statique des conduites ΔT_{RS} est toujours essentielle au calcul de la statique des conduites. Celle-ci est calculée à partir de la température de conception T_{Aus} et de la température de pose T_{Ver} de la manière suivante:

$$\Delta T_{RS} = T_{Aus} - T_{Ver}$$

Une température de conception T_{Aus} de 110°C est recommandée pour les systèmes de conduites posés en pleine terre à une température d'exploitation maximale inférieure à 100°C. A une température d'exploitation maximale supérieure à 100°C, on recommande une température de conception T_{Aus} de 130°C, néanmoins

supérieure d'au moins 10°C par rapport à la température d'exploitation.

Pour des systèmes de conduites posés à l'air libre, une température de conception en fonction de la température d'exploitation est recommandée. La température de conception T_{Aus} est supérieure de 10°C par rapport à la température d'exploitation maximale.

Pour la température de pose ou la température extérieure, lors de la pose des conduites, les valeurs suivantes peuvent être reprises:

- Posé en pleine terre:
 - Été: 20°C
 - Printemps/automne: 10°C
 - Hiver: 0°C
- Lignes électriques dans des caves, halles de stockage et bâtiments: généralement 20°C

Remarque: On ne fait pas la différence entre la température d'amenée et la température retour! Le retour est traité par l'examen statique de la même manière que l'amenée.

7.5.3 Conduites posées en pleine terre (tube pré-isolé en métal)

En raison de la technique éprouvée et d'une longue durée de vie, les tubes pré-isolés en métal constituent le système de canalisation le plus utilisé pour les conduites de chauffage à distance posées en pleine terre.

Comme mentionné ci-dessus, une compensation de la dilatation naturelle engendrée par un changement de direction des conduites est réalisée au moyen de tuyaux coudés à l'équerre (coudes en L), de tuyaux coudés à l'équerre doubles (coudes en Z) de coudes en U. Si la longueur de déchargement L_A (longueur du coude) des types de compensation de la dilatation représentés dans la Fig. 7.18 est identique pour les trois types, le coude en L indique la plus petite flexibilité et le coude en U la plus grande flexibilité relative à la compensation de dilatation.

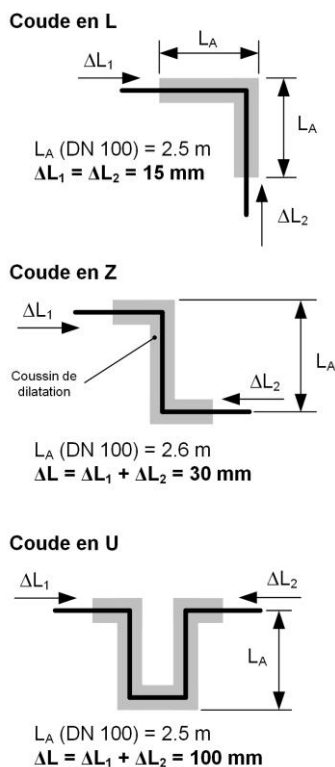


Fig. 7.18 Comparaison exemplaire de la dilatation possible maximale pour des longueurs de déchargement L_A identiques (longueur du coude) selon Brugg Pipesystems (Premant DN 100).

La pose d'une conduite avec tube pré-isolé en métal DN 100 conformément à Brugg Pipesystems (Premant DN 100) en constitue une bonne illustration:

Pour une longueur de déchargement identique L_A de 2,4 m ou 2,5 m, la dilatation de conduite pouvant être compensée au maximum ΔL s'élève à environ 15 mm

pour la pose d'un coude en L (sans point fixe), pour un coude en Z 30 mm au total peuvent se compenser ($\Delta L_1 + \Delta L_2$) et pour un coude en U ce sont 100 mm qui peuvent être compensés ($\Delta L_1 + \Delta L_2$). Ainsi un coude en U présente la flexibilité la plus élevée concernant la compensation de dilatation dans le cas de conduites avec tube pré-isolé en métal.

Pour l'évaluation du coude de dilatation et des longueurs de coussins de dilatation nécessaires, on se réfère aux modèles et diagrammes élaborés dans la fiche de travail FW 401 de l'AGFW [100] (parties 10 et 11) ainsi qu'aux données spécifiques au fabricant.

Il faut également noter que pour un tube pré-isolé en métal, le tube médian, le matériau d'isolation et la gaine protectrice/extérieure sont reliés les uns les autres et constituent une unité, impliquant que les tubes se dilatent comme un tout. En conséquence, **la dilatation est évitée** par la pression du sol (recouvrement) pesant sur les tubes. La dilatation étant évitée, cela entraîne une contrainte de compression des tubes en acier, qui ne doit pas dépasser la contrainte admissible de 190 N/mm². Afin de le garantir, des méthodes de pose comme la pose à froid méthode 1, la pose à froid méthode 2 ou la pose avec précontrainte thermique sont utilisées (aperçu dans le Tableau 7.6).

Tableau 7.6 Aperçu des avantages et inconvénients de la pose de tubes pré-isolés en métal en pleine terre.

Pose	Avantage	Inconvénient	
Pose à froid méthode 1	Pose à froid	Faible contrainte axiale issue de la dilatation thermique La tranchée pour canalisation peut être immédiatement remplie	Température d'exploitation maximale autorisée $\leq 85^\circ\text{C}$
	conventionnellement	La contrainte axiale maximale autorisée n'est pas dépassée La tranchée pour canalisation peut être à nouveau immédiatement remplie	La longueur de pose admissible doit être respectée par la disposition des coudes de dilatation nécessaires (L, Z, U)
Pose à froid méthode 2	Auto-précontrainte	La tranchée pour canalisation peut être immédiatement remplie Economie de coudes de dilatation éventuellement aussi possible dans la zone de glissement	mouvements de dilatation extrêmement importants Risque de flambage Les contraintes axiales excèdent la limite d'élasticité du matériau Piquage en charge ultérieure impossible
Précontrainte therm.	Limitation de la contrainte axiale Longueur de pose au choix Dilatation axiale faible Economie de coude de dilatation	La tranchée pour canalisation doit rester ouverte jusqu'à la finalisation de la précontrainte Un fluide d'exploitation réglable ou un 380 V selon la méthode	

7.5.3.1 Pose à froid méthode 1

Avec cette méthode, la longueur de pose maximale prescrite par le fabricant n'est pas dépassée. Lorsque cette longueur est atteinte, un coude de dilatation est installé, pour absorber les dilatations. Un point fixe naturel (NFP) apparaît à mi-chemin environ entre les deux coudes, à partir duquel les conduites se dilatent dans les deux directions (Fig. 7.19). La longueur de pose maximale dépend de la température de conception, de la dimension du tube et du recouvrement.

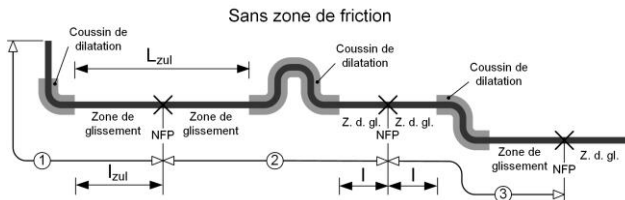


Fig. 7.19 Exemple d'un tracé avec points fixes naturels (NFP) et coussins de dilatation aux éléments de compensation selon la fiche de travail AGFW FW 401 [100] partie 10.

Remarque: La contrainte admissible de 190 N/mm² n'est jamais atteinte à une température d'exploitation maximale de 85°C. Par conséquent, une limitation de la longueur de pose est supprimée. Cependant la conception statique ne doit aussi pas être supérieure à 85°C.

L'inconvénient de la pose à froid méthode 1 est que relativement beaucoup de pièces usinées en forme de coudes doivent être installées, rendant la pose plus onéreuse. D'autre part des soudures à chanfrein (coude de 3°) et l'installation ultérieure de pièces en T ainsi que de branchements sont statiquement inoffensives.

Application: p. ex. des zones avec de nombreux variations de pentes et de directions, conduites de raccordement (conduites de dérivation), raccords domestiques.

7.5.3.2 Pose à froid méthode 2

Il s'agit ici d'une pose à froid sans prise en compte des longueurs de pose maximales spécifiées par le fabricant. La procédure est également décrite comme «auto-précontrainte opérationnelle». Avec la mise en service, la limite d'élasticité admissible de 235 N/mm² est dépassée et les tubes sont comprimés par le plastique. La conséquence d'une part est que d'importants coudes de dilatation et coussins de dilatation sont nécessaires. D'autre part les sorties en T doivent être réalisées de manière renforcée et des soudures à chanfrein (coude de 3°) ainsi que l'installation ultérieure de pièces en T et de branchements sont inacceptables.

Une pose plus économique par rapport à la pose à froid méthode 1 présente les inconvénients susmentionnés.

Application: p. ex. conduite de transport, hors zone urbanisée, zones avec des structures «définitives» (p. ex. grands lotissements, quartiers de coopératives), raccords domestiques, etc.

7.5.3.3 Précontrainte thermique

Une limitation de la longueur de pose est supprimée si les conduites subissent une précontrainte thermique. La contrainte admissible n'est pas dépassée. En règle générale, la conduite installée est chauffée à la température de précontrainte T_{Vor} . La température de précontrainte T_{Vor} correspond à la température de pose T_{Ver} moins la moitié de la températures de référence relative à la statique des conduites ΔT_{RS} et se calcule comme suit:

$$T_{Vor} = T_{Ver} + \frac{\Delta T_{RS}}{2} = T_{Ver} + \frac{T_{Aus} - T_{Ver}}{2} = \frac{T_{Aus} + T_{Ver}}{2}$$

Dès que la conduite est chauffée et qu'elle s'est donc dilatée, elle est ensablée et remplit la tranchée. Après le remblayage des tranchées, la conduite doit ensuite être refroidie à nouveau. La zone de friction des tubes est relativement courte, tout comme donc les longueurs des coudes de dilatation et de des coussins de dilatation (Fig. 7.20).

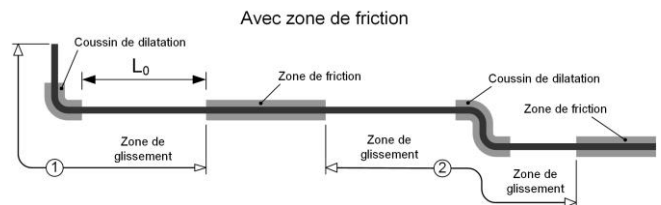


Fig. 7.20 Exemple de tracé avec zone de glissement et zone de friction et coussins de dilatation aux éléments de compensation selon la fiche de travail AGFW-Merkblatt FW 401 [100] partie 10.

La précontrainte thermique nécessite des phases de construction longues (> 100 m) et influe donc sur la durée de construction. La mise en place de conduites est néanmoins plus économique par rapport à la pose à froid. Les soudures à chanfrein (coude de 3°) et pièces en T ultérieures et branchements ne présentent pas de problème du point de vue statique.

Application: p. ex. conduites de transport, zones urbanisées avec peu de variations de pentes ou de directions, conduites de raccordement.

7.5.3.4 Tubes doubles, polytuyaux

Dans le cas de polytuyaux préfabriqués et préisolés ou de tubes doubles, les conduites de fluides sont solidement reliées entre elles au niveau des coudes et aux extrémités. Entre elles, des écarteurs peu importants du point de vue statique sont utilisés entre les tubes médians. Pour des raisons relatives à la statique de la conduite, ceci a pour conséquence que l'écart de température maximal entre chaque tube médian est limité à 100 K maximum. Cet écart de température maximal doit être pris en compte notamment dans le cas de démarrage des installations refroidies.

7.5.4 Tubes posés à l'air libre

Des tubes posés à l'air libre désignent des conduites dans des caves, des halles de stockage galeries abritant les installations électriques (ELT), des lignes électriques sur

le terrain, mais aussi des conduites posées en pleine terre dans des canaux en béton. En outre, les tubes pré-isolés avec enveloppe en acier décrits dans le chapitre 4.3.1.5 sont également posés à l'air libre du point de vue statique.

Contrairement aux systèmes posés en pleine terre, les pertes par frottement du support de conduite n'entravent que de façon marginale la dilatation linéaire des conduites posées à l'air libre. L'importance de la dilatation ΔL n'est théoriquement pas limitée, s'il existe des mesures correspondantes en matière de compensation de dilatation. Toutefois ces mesures sont de plus en plus difficiles à gérer pour des dimensions à partir de DN 100 et à des températures élevées. Il faut veiller à ce que les conduites puissent bouger dans toutes les directions. Des moyens d'absorber les dilatations sont présentés dans ce qui suit.

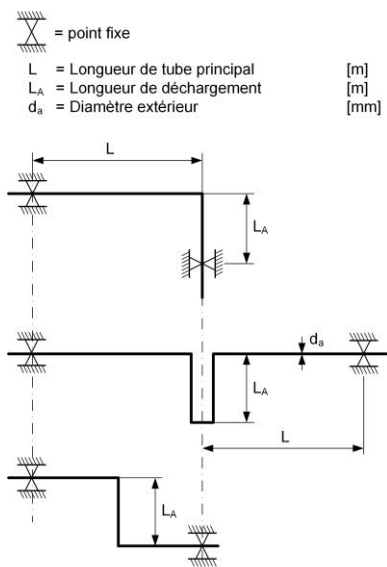


Fig. 7.21 Formes typiques de coudes de dilatation pour des conduites posées à l'air libre (présentation selon [49])

Pour compenser l'extension longitudinale, un changement de direction des conduites permet une compensation de dilatation naturelle. Dans le cas de conduites posées à l'air libre, des coudes de dilatation sont également réalisés comme des tuyaux coudés (coudes en L), tuyaux coudés doubles (coudes en Z) et coudes en U (Fig. 7.21).

La longueur de la longueur de déchargement L_A ne dépend conformément à [49] pas seulement de la dilatation ΔL ou de la longueur de la conduite principale L , mais augmente également avec une dimension de tube d_a croissante ou avec une température de référence relative à la statique des conduites ΔT_{RS} . Cela signifie: Plus la dilatation ΔL et la dimension du tube d_a est importante, plus les coudes de dilatation nécessaires seront gros ou plus la longueur de déchargement L_A sera grande.

Concernant des tubes posés à l'air libre, l'équation suivante selon [49] peut être utilisée pour le calcul approximatif de la longueur de déchargement L_A :

$$L_A \approx \frac{\Delta T_{RS}}{64} \sqrt{L d_a}$$

Le diagramme de la Fig. 7.22 donne une indication concernant la conception du compensateur de dilatation pour l'équation décrite plus haut afin de déterminer la longueur de déchargement L_A pour des systèmes posés à l'air libre, dans un bâtiment ou dans un caniveau normalisés à un écart de température maximal de 100°C. La longueur de déchargement L_A du coude de dilatation peut être calculée de manière proportionnelle au moyen du diagramme de la Fig. 7.22 pour d'autres températures.

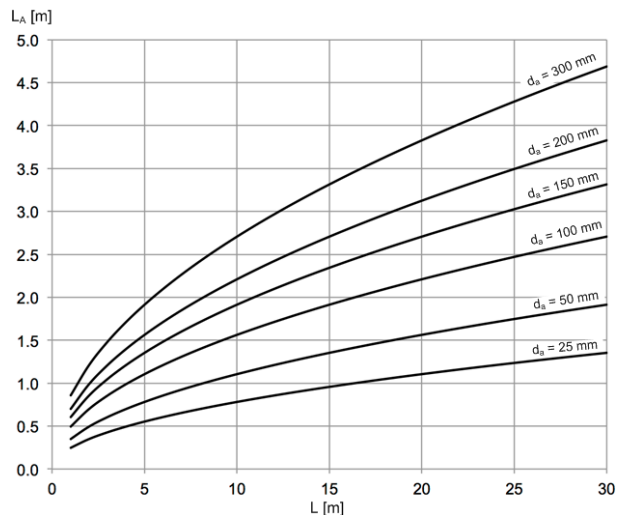


Fig. 7.22 Longueur du coude de dilatation pour des systèmes posés à l'air libre, dans un bâtiment ou dans un caniveau normalisés à un écart de température maximal de 100°C (calcul selon [49]).

Des joints articulés, latéraux, axiaux pouvant absorber une déformation ciblée grâce à des composants ondulés flexibles, représentent des alternatives à la compensation de la dilatation naturelle pour des systèmes posés à l'air libre. La fiche de travail FW411 de l'AGFW [102] fournit des fondements de conception aux systèmes posés à l'air libre, dans un bâtiment ou dans un caniveau. Elle inclut des tableaux et des diagrammes relatifs à la conception statique jusqu'à un diamètre DN 80. Pour de plus grands diamètres nominaux, il faut fournir la vérification pour la contrainte par dilatation thermique, par le poids propre et pour la charge du support, ainsi que la vérification pour les points fixes, roulements, coudes, sorties en T, branchements, coudes de dilatation, portées. SN EN 13480 [93], SN EN13941 [94] et AD-2000 [119] apportent les bases pour les calculs statiques.

7.5.4.1 Support de tube

Les tubes sont équipés de colliers de serrage pour le support, qui sont reliés au plafond, à la paroi ou au sol et qui y sont ancrés. Plus grande est la dimension du tube, moins il y aura besoin de supports. Il existe principalement quatre types différents de supports de tuyauterie ou de supports de conduites, qui sont utilisés pour des systèmes posés à l'air libre.

- **Points fixes:** Aucun mouvement dans une direction n'est possible pour les conduites. Les points fixes peuvent prendre des proportions importantes en cas de grandes dimensions. Des exécutions spéciales doivent souvent être réalisées.
- **Palier lisse:** Les conduites peuvent bouger dans le sens longitudinal. En plus il reste un petit espace pour des déplacements latéraux et vers le haut/bas. Ce type de support est utilisé le plus souvent à distance.
- **Palier de dilatation latérale (curseur croix):** Les conduites peuvent bouger dans le sens longitudinal et transversal. En plus il reste un petit espace pour des déplacements et vers le haut/bas. Ce type de support est utilisé dans la zone des coudes de dilatation, si la dilatation doit être absorbée des deux côtés.
- **Palier de guidage:** Ces supports sont des paliers lisses spécifiques qui permettent un mouvement exclusivement dans le sens longitudinal. Les paliers de guidage sont nécessaires exclusivement lors de l'utilisation de compensateurs.

La fiche de travail FW 411 de l'AGFW [102] décrit une sélection et un agencement de supports de conduites des tubes médians en acier avec une isolation thermique en isolant fibreux. Le positionnement approprié des paliers lisses est également mentionné dans la zone de compensation de la dilatation. La fiche de travail FW 410 de l'AGFW [101] s'applique pour les tubes pré-isolés avec

enveloppe en acier posés en pleine terre et posés à l'air libre.

Pour des raisons de procédure en matière de flexion, des limites déjà étroites sont fixées pour la spécification des supports de conduites et les contraintes relatives aux conduites résultant du poids propre sont en général faibles. Une méthode de vérification simplifiée peut être utilisée pour évaluer la résistance, désignée comme contrôle de portées. En raison du poids propre, cela joue également un rôle pour savoir si les conduites doivent être remplies d'eau ou de gaz ou si elles doivent être isolées. Pour des tubes en acier de diamètre 50 à 500 mm, de densité de fluide de 1000 kg/m³ et d'un ratio d'épaisseur de paroi constant de $d_i/s \approx 30$, la corrélation suivante en résulte pour les portées:

$$L \approx f d_i^{2/3}$$

$f = 0.3$ pour tube vide et non-isolé

$f = 0.23$ pour un tube rempli et non-isolé

$f = 0.2$ pour un tube rempli et isolé

L'équation est décrite dans la Fig. 7.23. A partir de DN 500 la portée pour la limitation de la contrainte reste constante au point d'appui.

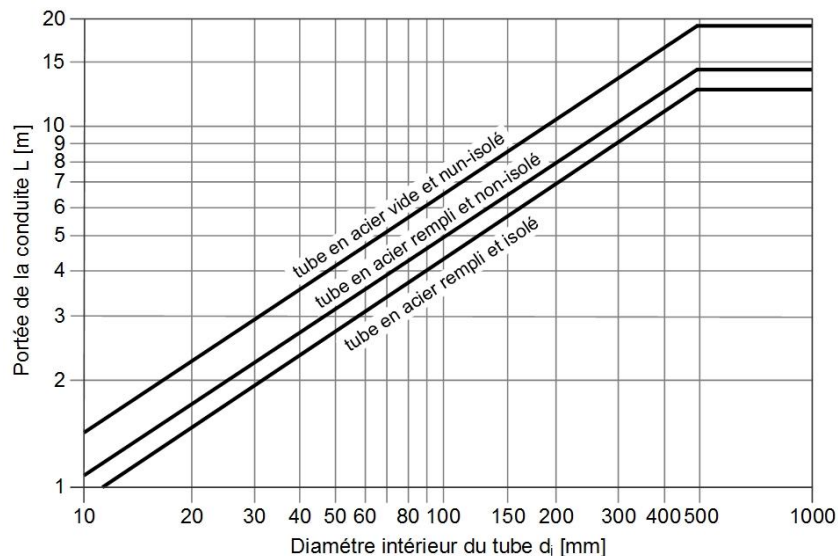


Fig. 7.23 Valeurs indicatives pour la portée max. admissible de la conduite L en fonction de la forme du tube et du diamètre intérieur du tube en acier d_i (Conduites dans le bâtiment) selon [49].

7.5.4.2 Pose avec précontrainte

Il est recommandé pour des tubes posés à l'air libre (à l'intérieur et à l'extérieur) de précharger les conduites à partir de DN 100. Entre DN 50 et DN 80 une précontrainte peut s'avérer avantageuse. Des dimensions encore plus petites sont en général si élastiques que les dilatations peuvent être absorbées sans problème. Dans le cas de la précontrainte de tubes posés à l'air libre, il s'agit sans exception d'une **précontrainte à froid**, ce qui signifie que les longueurs de tubes sont raccourcies en fonction du niveau de précontrainte entre les zones de dilatation (Fig.

7.24). Le niveau de précontrainte correspond en général à la moitié de la dilatation linéaire à un écart de température entre la température de pose T_{Ver} et la température de conception T_{Aus} .

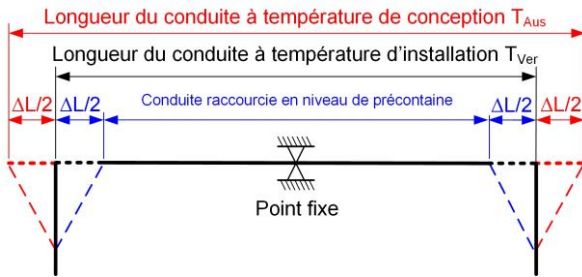


Fig. 7.24 Représentation schématique de la précontrainte à froid pour des conduites à l'air libre dans la zone des coudes de dilatation (Représentation schématique de la dilatation d'un seul coude de dilatation).

Une précontrainte à froid permet de réduire les longueurs de déchargement des coudes de dilatation. Le raccordement ou soudage des deux coudes de dilatation s'effectue par précontrainte mécanique. A cet effet un coude de dilatation est pressé jusqu'au coude réduit, jusqu'à ce que la fente soit compensée et que les deux extrémités puissent être soudées l'une à l'autre.

Si ces mesures ne suffisent pas pour absorber les dilatations à cause d'un manque d'espace, l'utilisation de compensateurs peut aider, à la condition que ces systèmes soient aussi précontraints.

Remarque: Les méthodes de pose susmentionnées se trouvent dans les installations d'eau surchauffée ou de vapeur. Pour des raisons de place, on renonce à une description détaillée, systèmes de compensateurs compris. A cette occasion, il faut se référer aux fiches de travail FW 401 [100], FW 411 [102] de l'AGFW et à la littérature spécialisée.

7.5.5 Tubes médians en plastique

Etant donné que les tubes plastiques possèdent une élasticité bien plus grande que les tubes en acier, ils sont auto-compensateurs, c'est-à-dire que la dilatation est amortie par les tubes eux-mêmes, par un élargissement de leur diamètre. Bien que le coefficient de dilatation du PE est près de 20 fois plus élevé que celui de l'acier, **la dilatation doit être évitée**. Ceci est possible sans problème pour des tubes posés en pleine terre, en raison de la pression du sol. On peut complètement renoncer aux coussins de dilatation. Pour des tubes médians en plastique posés à l'air libre, la dilatation linéaire est empêchée par des points fixes avant les coudes (Fig. 7.25). Les supports entre les points fixes servent uniquement à fixer les tubes. Les paliers lisses et les compensateurs ne sont pas utilisés dans le cas de tubes plastiques.

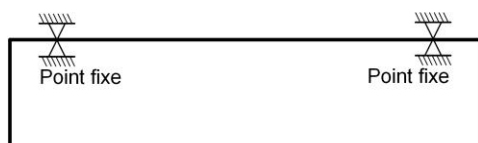


Fig. 7.25 Disposition des points fixes pour des tubes médians en plastique avant coude ou changement de direction.

8 Transfert de chaleur – Technique et hydraulique

Ce chapitre décrit les composants et les principes techniques d'une sous-station. En outre, les bases hydrauliques lors du transfert de chaleur sont abordées ainsi que les solutions standard principales pour les réseaux de chauffage à distance.

8.1 Composants et technique d'une sous-station

Le présent chapitre approfondit les explications du chapitre 5.2 et se réfère aux Fig. 5.2 et Fig. 5.3. Selon la puissance de raccordement et le standard d'exécution, la sous-station est installée comme une unité (station compacte), qui inclut les composants de la station de transfert et de la chaufferie, ou la station et la chaufferie constituent une unité séparée.

Une station compacte comprend au moins les composants suivants:

- armatures de raccordement et de sortie dans amenée et retour (circuit primaire et secondaire),
- vidange ou purge (selon la pente de conduites de raccordement),
- équipement de mesure de chaleur (dispositif de mesure du débit, mesure de température, unité de calcul),
- mesure de température et de pression indicative,
- régulateur de pression différentielle du réseau et régulateur de débit (vanne combi),
- échangeur de chaleur
- pompe(s),
- filtre.

Selon la taille de l'installation, les composants supplémentaires suivants sont possibles:

- liaison de court-circuit,
- contournement du compteur,
- affichages supplémentaires de la température et de la pression,
- régulateur supplémentaire de pression différentielle du réseau et régulateur de débit (vannes combi),
- échangeur de chaleur supplémentaire.

Le fournisseur d'énergie respecte la norme dans les prescriptions techniques de raccordement. Les combinaisons possibles au niveau de la chaufferie doivent également être déterminées avec le fournisseur d'énergie, et ce pour une station compacte. Certaines fonctions sont aussi souvent utilisées par les deux partenaires. Ainsi des vannes de réglage peuvent par exemple sécuriser l'installation du client grâce à leur fonction d'arrêt d'urgence.

8.1.1 Appels de puissance thermique

La puissance thermique maximale conclue dans le contrat de fourniture de chaleur du client est généralement réglée lors de la mise en service au niveau de l'étrangleur du régulateur de débit (VBS) et plombée. Le débit volumique maximal est ainsi limité. Le fournisseur d'énergie doit si besoin contrôler la puissance prélevée de manière aléatoire.

8.1.2 Matériaux et raccords

La sélection des matériaux pour les composants du circuit primaire doit s'effectuer conformément à la norme DIN 4747-1 [78]. Contrairement à la norme DIN 4747-1, de multiples métaux non ferreux et échangeurs de chaleur soudés avec soudure des métaux non ferreux ne sont pas autorisés. Les éléments de raccordement et joints utilisés doivent être adaptés aux conditions d'exploitation relatives à la pression, la température et le fluide caloporteur.

Les conduites et les pièces usinées doivent être équipées d'une couche de produit anti-corrosion résistante à la température. Des purges automatiques, raccords de compression, compensateurs en caoutchouc, raccords coniques et ne sont pas prévus comme matériaux d'étanchéité.

D'autres exigences et écarts relatifs à la norme DIN 4747-1 sont détaillés dans les prescriptions techniques de raccordement.

8.1.3 Isolation thermique

L'isolation thermique doit résister à l'usure et ne doit exercer aucun effet corrosif sur les éléments d'installation dans un état humide. Par ailleurs, elle doit être chimiquement et dimensionnellement stable à température d'exploitation. Le montage et démontage du compteur d'énergie thermique et de sa sonde doivent pouvoir être réalisés sans endommager l'isolation thermique. Les conduites d'amenée et de retour sont en principe séparées et doivent être isolées en fonction de la dilatation. La dilatation thermique des tubes ne doit pas altérer l'isolation thermique. Il faut poser des isolations thermiques serrées et décalées. Les joints longitudinaux et verticaux doivent être complètement fermés avec un matériau d'étanchéité approprié.

Les conduites du circuit primaire doivent p. ex. être isolées au moyen de coques en fibre de verre (masse volumique d'au moins 80 kg/m³, conductivité thermique $\lambda = 0,034 \text{ W/(mK)}$ à $t_m 50^\circ\text{C}$ et $0,039 \text{ W/(mK)}$ à $t_m 100^\circ\text{C}$): Les conduites posées doivent en plus être protégées à l'aide d'une gaine résistante à la corrosion et à la température.

Le Tableau 8.1 indique l'épaisseur d'isolation minimale pour les conduites de chauffage posées dans les bâtiments dans des pièces non chauffées et les conduites d'eau chaude. Les épaisseurs d'isolation indiquées s'appliquent pour une température d'exploitation jusqu'à 90°C. En cas de températures d'exploitation supérieures, il faut augmenter les épaisseurs d'isolation le cas échéant

et en cas de températures d'amenée maximales de 30°C les épaisseurs d'isolation peuvent être réduites.

Tableau 8.1 Epaisseur d'isolation minimale pour les conduites de chauffage posées dans les bâtiments dans des pièces non chauffées et les conduites d'eau chaude.

Diamètre nominal DN	Epaisseur d'isolation [mm] pour	
	$0.03 > \lambda \leq 0.05 \text{ W/(mK)}$	$\lambda \leq 0.03 \text{ W/(mK)}$
10-15	40	30
20-32	50	40
40-50	60	50
65-80	80	60
100-150	100	80
175-200	120	80

8.1.4 Compteur d'énergie thermique

L'utilisation de compteurs d'énergie thermique calibrés est nécessaire pour la facturation des livraisons de combustibles ou de la chaleur acquise par un consommateur de chaleur. Le mesurage de la chaleur nécessite de mesurer l'écart entre les débits et l'écart entre les températures entre l'amenée et retour.

La classe de précision d'un compteur d'énergie thermique est déterminé par la précision de mesure du débit et de l'écart entre les températures.

La plage de mesure du débit est indiquée par la plage de fonctionnement entre le débit nominal Q_N et le débit minimal Q_{min} . Le rapport du débit nominal au débit minimal est une mesure pour la gamme de la plage de débit, au sein duquel une certaine précision de la mesure du débit volumique est garantie. La qualité de l'eau a également une grande importance sur la précision de mesure dans le cas d'une utilisation prolongée.

La chute de pression est souvent très élevée dans le cas de débit nominal (20 – 25 kPa pour débitmètre à hélice). Une chute de pression importante augmente certes la plage de fonctionnement, mais détériore également l'autorité de la vanne de réglage, qui se trouve souvent dans la même section de débit.

On utilise pour la mesure du débit les procédures de mesure suivantes (voir aussi Tableau 8.2):

- mesure du débit mécanique au moyen d'une pompe ou d'une roue de turbine,
- mesure électromagnétique du débit,
- mesure du débit au moyen d'ultrason.

8.1.4.1 Installation de compteurs d'énergie thermique

Pour atteindre la précision de mesure requise, les recommandations suivantes doivent être prises en compte [21]:

- Respect des prescriptions d'installation du fournisseur de compteur d'énergie thermique (tronçon d'entrée,

tronçon de sortie, configuration de montage horizontale/verticale, montage de sonde, etc.).

- Conception sur un écart entre les températures > 20 K. Ecart entre les températures en exploitation au moins 3 K.
- Répartition homogène de la température sur la section du tube avant les sondes de température (installation d'un mélangeur statique le cas échéant).
- Circuit de régulation stable (des régulateurs oscillants peuvent causer des erreurs de mesure importantes).
- Les circulations erronées (circulation monotube incluse) pouvant influencer le mesurage de la chaleur doivent être évitées. Pour ce faire, il faut accorder une attention spéciale au raccordement de la conduite d'expansion, ainsi qu'aux flux incontrôlés. Ces derniers peuvent survenir lorsqu'une partie de l'installation (p. ex. la pompe de groupes) est déconnectée et lorsque le distributeur est soumis à une pression différentielle du réseau faible. Une circulation erronée peut survenir directement dans le retour sur la vanne mélangeuse se trouvant dans une position intermédiaire.
- Si la mesure de l'écart entre les températures s'effectue au même niveau que la mesure du débit, des défaillances peuvent être réduites par des circulations erronées non souhaitées (la circulation erronée est mesurée au moins correctement).
- Exploitation du compteur d'énergie thermique uniquement dans une plage de débit admissible Q_n à Q_{min} .
- Les compteurs d'énergie thermique compacts sont avantageux car des influences perturbatrices sont dans la pratique exclues de la transmission courte des signaux du capteur au transmetteur et à l'unité de calcul.
- Mise en service irréprochable du point de vue technique du compteur d'énergie thermique et si nécessaire une recherche systématique des sources de défaillances par des spécialistes.
- Il faut formellement éviter le prolongement du câble de la sonde afin de ne pas nuire à la précision de mesure.

En cas d'appareils de mesure du débit mécaniques:

- Installation d'un filtre anti-poussière avant l'entrée d'eau du débitmètre, afin de ne pas endommager ni obstruer la pompe/roue de la turbine.
- Révision régulière afin d'exclure des signes d'usure comme sources d'erreur.
- Une conception minutieuse doit veiller à ce que en cas de débit volumique variable le débit de fonctionnement ne tombe si possible jamais ou uniquement dans des cas exceptionnels en-dessous du débit minimal Q_{min} .

En cas d'appareils de mesure du débit électromagnétique:

- L'eau ne doit contenir aucune magnétite, car celle-ci se dépose sur les sondes de mesure et influence donc la mesure (réduction de la valeur de mesure du débit).
- Dans le cas d'installations existantes, il est possible d'atteindre la qualité de l'eau requise (eau claire) avec un séparateur de boues magnétique connecté à un dispositif de dégazage.

- S'agissant d'installations neuves, il faut veiller à ce que dès le début l'eau soit suffisamment dégazée et que la teneur en oxygène soit réduite à zéro.
- En cas de survenue d'erreurs de mesure importantes, il est recommandé de nettoyer les parois internes du débitmètre, au risque de ne pas éliminer la cause (p. ex. eau sale).
- Etant donné que les sondes de mesure ne nécessitent qu'une très faible tension (quelques millivolts), la procédure de mesure est sensible aux perturbations électriques, notamment concernant des appareils split (capteur et transmetteur séparément). Ceci peut être atténué en utilisant des débitmètres compacts.
- N'utiliser que des câbles blindés et torsadés et éviter la proximité de champs magnétiques puissants induits par des moteurs électriques ou convertisseurs de fréquence.

En cas d'appareils de mesure du débit à ultrasons:

- Un encrassement du réflecteur passif en cas de faible diamètre nominal et des inclusions de gaz dans l'eau peuvent engendrer des mesures imprécises. Afin d'éviter ces influences perturbatrices, une bonne qualité de l'eau est nécessaire, l'absence de dépôts sur les réflecteurs passifs, ainsi qu'un dégazage suffisant de l'eau.

8.1.4.2 Respect de la stabilité des mesures

Le compteur d'énergie thermique doit être exécuté et mis en circulation conformément à l'Ordonnance sur les instruments de mesure OIMes [64] et l'Ordonnance du DFJP sur les appareils mesureurs de l'énergie thermique [65]. Le compteur d'énergie thermique est en général contrôlé et entretenu par le fournisseur d'énergie. La stabilité des mesures du compteur d'énergie thermique doit être garantie par le fournisseur d'énergie.

Une vérification ultérieure doit être effectuée conformément à l'Ordonnance sur les instruments de mesure tous les cinq ans par un laboratoire habilité. Cependant, si au moins 150 compteurs d'énergie thermique fonctionnent sur un réseau de chaleur à distance et si ces données de mesure en exploitation sont contrôlées, alors une requête relative à une procédure peut être soumise auprès du METAS, pour laquelle il est possible de prolonger la période de vérification, aux conditions suivantes:

- La procédure doit être appropriée afin de garantir l'exactitude des mesures.
- Tous les compteurs d'énergie thermique utilisés doivent être commercialisés conformément à [65] et aucun de ces compteurs ne doit à aucun moment fonctionner plus de dix ans sans vérification ultérieure.
- Les compteurs défectueux doivent être remplacés par des compteurs conformes.
- Tous les compteurs employés doivent fonctionner dans des conditions de fonctionnement similaires.
- L'utilisateur informe le METAS une fois par an des résultats de la procédure.

Si la puissance nominale de l'équipement de mesure de chaleur s'élève à 10 MW minimum, un calibrage peut être effectué pour conserver la stabilité des mesures

conformément à [65]. Les conditions suivantes doivent néanmoins être remplies:

- L'énergie thermique est déterminée entre deux partenaires permanents sur des conduites d'alimentation fixes dans une station de mesures, à partir des données de mesures d'un ou plusieurs compteurs d'énergie thermique, la somme des puissances nominales du compteur d'énergie thermique utilisé s'élevant à 10 MW minimum.
- L'équipement de mesure de chaleur est employé entre deux partenaires commerciaux en situation d'évaluer les résultats des mesures.
- L'équipement de mesure de chaleur est placé sous la supervision régulière et métrologique du personnel d'exploitation compétent.
- Si l'exploitation seule ne peut pas calibrer les pièces de l'installation de mesure, les instruments de mesure seront calibrés par un des laboratoires de calibrage certifiés par le METAS, un service de vérification autorisé ou le METAS lui-même. Suite au calibrage, l'équipement de mesure de chaleur est sécurisé par des plombes d'exploitation identifiables.
- Le calibrage de l'équipement de mesure de chaleur doit s'effectuer si besoin, mais en général, tous les 12 mois. Le calibrage doit être inférieur à deux ans pour toutes les pièces de l'équipement de mesure.
- Les travaux réalisés sur l'équipement de mesure de chaleur (maintenance, réglage, calibrage) sont consignés dans un procès-verbal. Les enregistrements doivent faire apparaître le type de travaux, la date et les personnes les ayant réalisés. Les procès-verbaux doivent pouvoir être présentés aux autorités compétentes en cas de réclamation.

8.1.4.3 Influence sur l'autorité de la vanne

Le débit nominal est indiqué par les fabricants de compteurs d'énergie thermique. D'importantes chutes de pression de 20 à 25 kPa surviennent, lorsque les compteurs d'énergie thermique sont effectivement conçus pour ce débit nominal. Elles entraînent régulièrement des erreurs d'interprétation, car les compteurs de débit sont souvent installés sur une section à débit variable, de sorte que l'écart entre les températures correspondant soit le plus grand possible (précision de mesure la plus élevée). En conséquence l'autorité de la vanne de réglage se détériore, entraînant un conflit d'objectif. Pour une autorité de la vanne correcte, la chute de pression sur le compteur doit d'une part être faible. D'autre part, une petite chute de pression diminue la précision dans la plage de débit inférieure. Les recommandations suivantes doivent être observées:

- Lorsque de petits compteurs d'énergie thermique sont conçus afin que le débit d'interprétation réel corresponde à environ 50% du débit nominal préconisé par le fabricant, des chutes de pression raisonnables de 5 kPa surviennent pour une précision acceptable.
- Les divers types de conceptions proposées actuellement permettent de toujours trouver des solutions adaptées. Avec des capteurs de débit magnéto-inductif, des compteurs d'énergie thermique de plus grande taille peuvent être fabriqués présentant une chute de pression plus faible.

Tableau 8.2 Evaluation des méthodes de mesure de débit les plus importantes [21].

	Mécanique	Magnéto-inductif	Ultrason
Rapport Q_N/Q_{\min}	25-100 60-190*	100-150	100-150
Chute de pression en cas de débit nominal Q_N [kPa]	10-15	7-15	7-20
Précision de mesure	moyenne	élevée	élevée
Sensibilité de la précision de mesure à la qualité de l'eau	faible	élevée	faible à moyenne**
Usure / coûts de maintenance	élevée/élevés	faible(s)	faible(s)
Sensibilité de la précision de mesure aux perturbations électriques	faible à modérée***	élevée	faible

* Modèle spécial (compteur Woltmann); ** Encombrement du réflecteur passif en cas de faible diamètre nominal; *** en cas de contacteur à induction

8.1.5 Limitation de pression

La limitation de pression en cas de **raccordement direct** peut s'effectuer sans réduction ni limitation de pression, si la pression maximale dans le réseau $p_{N\max}$ est inférieure ou égale à la pression admissible de la sous-station ou de l'installation domestique p_{Hzul} . Autrement une réduction de pression et une limitation de pression sont requises, comme spécifié dans la Fig. 8.1 et le Tableau 8.3 conformément à la norme DIN 4747-1 [78].

En cas de **raccordement indirect**, le circuit primaire de l'échangeur de chaleur doit être mesuré pour la pression du réseau maximale $p_{N\max}$. Les agencements des dispositifs de sécurité contre des dépassements de pression de service du circuit secondaire doivent être effectués en accord avec SN EN 12828 [98] ou DIN EN 12953 [108]. Il convient d'observer le cahier technique A 2 AD 2000 [119] concernant le réservoir sous pression à sécuriser. Pour ce faire, chaque échangeur de chaleur du circuit secondaire doit être sécurisé contre les dépassements de la pression de service admissible à l'aide de vannes de sécurité. Les points suivants doivent être respectés:

- raccordement de trois vannes de sécurité maximum par échangeur de chaleur,
- montage vertical avec colonne humide aussi courte que possible, 1 mètre max.,
- installation de conduites sans fermeture, sans filtre ni pièces façonnées, conduisant à un étranglement de la section,
- disposition dans un emplacement facilement accessible,
- installation en position verticale exclusivement,
- pose d'un panneau de signalisation,
- conduite de purge séparée avec pente, embouchure libre et observable,
- soupape de sécurité obligatoirement homologuée.

Si le chauffage dans l'échangeur de chaleur est possible par le circuit secondaire, il faut donc prendre des mesures de limitation de pression dans le circuit primaire. Chaque échangeur de chaleur doit au minimum être relié à un réservoir d'expansion.

La conception et la masse des vannes de sécurité à membrane pour le circuit secondaire doivent au moins correspondre aux spécifications du Tableau 8.4.

8.1.6 Limitation de température

Un dispositif de limitation de température dans la chaufferie dépend de la température de l'installation domestique maximale et de la température d'amenée primaire maximale. La norme DIN 4747-1 spécifie les exigences conformément au Tableau 8.5.

Si une installation de chauffage de l'eau chaude d'une sous-station ou d'une installation pour le chauffage des locaux avec régulateur de température d'amenée et dispositif de limitation de température est montée en aval, la température moyenne d'exploitation primaire est déterminante pour la conception de l'équipement technique de sécurité relatif à la limitation de température du chauffage de l'eau chaude, et non la température d'amenée primaire maximale (Tableau 8.6).

Si des appareils de commande avec dispositifs de sécurité sont nécessaires conformément aux Tableau 8.5 et Tableau 8.6 des impulsions de contrôle peuvent impacter un appareil de commande commun, s'il est standardisé. Des régulateurs de débit sans alimentation extérieure, qui sont équipés d'un actionneur à dispositif de sécurité, peuvent aussi être utilisés comme des appareils de commande homologués.

La plage de réglage de l'équipement technique de sécurité ne doit pas dépasser de plus de 10% la température admissible maximale de l'installation domestique, limitée au maximum à 5 K.

L'appareil de commande doit être disposé afin d'éviter le risque d'évaporation ou de marche à vide de la chaufferie ou de l'installation domestique. Dans les installations de chauffage de l'eau chaude, l'appareil de commande doit être placé dans l'amenée.

Afin de mesurer la température le plus rapidement et avec le plus d'exactitude possible, les capteurs de température pour l'impulsion de contrôle doivent être installés en raccordement direct afin de saisir la température de mélange en toute sécurité.

En cas de raccordement indirect, les sondes de température doivent être disposées de préférence dans ou à proximité de l'échangeur de chaleur.

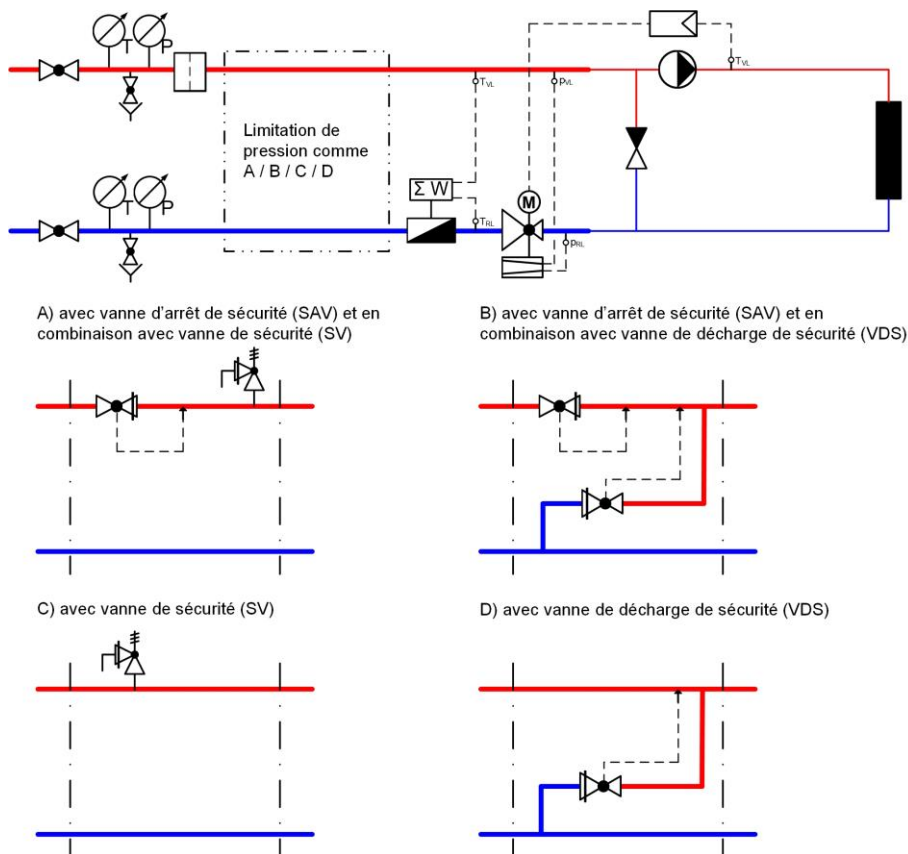


Fig. 8.1 Schéma de principe pour l'équipement d'une sous-station avec raccordement direct avec dispositif de sécurité pour la limitation de pression (selon DIN 4747-1 [78]). Voir également le Tableau 8.3.

Tableau 8.3 Dispositif de sécurité pour la réduction de pression selon DIN 4747-1 [78].

Pression de service admissible dans l'installation domestique	Raccordement direct					Raccordement indirect (secondaire)	
	SAV avec SV*	ou SAV avec VDS*	ou SV	ou VDS	Réservoir d'expansion	SV	Réservoir d'expansion
$\geq p_{Nmax}$	pas requis	pas requis	pas requis	pas requis	pas requis	requis	requis
$< p_{Nmax}$	requis	requis	requis	requis	pas requis	requis	requis

SAV = Vanne d'arrêt de sécurité, homologuée
 SV = Vanne de sécurité, homologuée
 VDS = Vanne de décharge de sécurité, homologuée
 * Conception SV et VDS au moins pour 1% de la valeur k_{vs} du SAV

Tableau 8.4 Choix des vannes de sécurité à membrane contre le dépassement de pression suite à la dilatation de l'eau pour des raccordements indirects selon DIN 4747-1 [78]. Valable pour une pression de tarage ≤ 3.0 bar.

		Puissance de soufflage pour l'eau en l/h = puissance thermique nominale en kW		
		≤ 100	≤ 350	≤ 900
Alimentation	Diamètre minimal ou diamètre nominal minimal DN	15	20	25
	Raccordement*	G 1/2	G 3/4	G 1
Puissance de soufflage	Diamètre minimal ou diamètre nominal minimal DN	20	25	32
	Raccordement*	G 3/4	G 1	G 1 3/4

* Filetage conforme à la norme DIN ISO 228-1

Tableau 8.5 Dispositif de sécurité pour la limitation de température de sous-stations pour le chauffage de locaux selon DIN 4747-1 [78].

Mode opératoire du réseau	Température d'amenée primaire maximale	Température d'installation domestique admissible maximale	Régulation de la température d'amenée	Régulateur de température TR ^a	Contrôleur de température de sécurité TS ^a	Dispositif de sécurité conforme à SN EN 14597 [71]
Mode opératoire du réseau constant	≤ 120°C	≥ Température d'amenée primaire	requis	pas requis	pas requis	pas requis
		< Température d'amenée primaire	requis	pas requis	requis	requis
	> 120°C	< Température d'amenée primaire	requis	requis	requis	requis
mode opératoire du réseau continu et continu-constant	≤ 120°C	≥ Température d'amenée primaire	pas requis ^b	pas requis	pas requis	pas requis
		< Température d'amenée primaire	requis	pas requis	requis	requis ^{c, d}
	> 120°C ≤ 140°C	< Température d'amenée primaire	requis	pas requis	requis	requis ^{c, d}
		> 140°C	< Température d'amenée primaire	requis	requis	requis

a) Définition conforme à la norme SN EN 14597

b) Régulation de température décentralisée avec vannes de radiateur thermostatiques

c) Pas requis pour les installations dont le débit volumique mis à disposition dans le circuit primaire reste inférieur à 1 m³/h. En cas de suppression du TS, un TR est requis. Les systèmes de chauffage par surfaces et les installations de chauffage de l'eau chaude sont exclus de l'allègement.d) En référence à la norme SN EN 14597, l'appareil de commande répond à l'exigence d'étanchéité interne (0.05% de la valeur k_{VS})

Tableau 8.6 Dispositif de sécurité pour la limitation de la température de sous-stations pour le chauffage de l'eau chaude selon DIN 4747-1 [78].

Mode opératoire du réseau	Température d'exploitation moyenne primaire	Température de l'installation domestique admissible maximale ^d	Régulation de la température d'amenée	Régulateur de température TR ^a	Contrôleur de température de sécurité TS ^a	Dispositif de sécurité conforme à SN EN 14597 [71]	
Constant, continu et continu-constant	≤ 100°C	≤ 75°C	requis	requis	requis $T_{H_{Zul}}$ max.	requis	
Mode opératoire du réseau	> 100°C ≤ 120°C	> 75°C	requis	pas requis	requis	pas requis	
		≤ 75°C	requis	requis	requis $T_{H_{Zul}}$ max.	requis	
	> 120°C	> 75°C	requis	requis	requis	pas requis	pas requis ^e
		≤ 75°C	requis	requis	requis	requis $T_{H_{Zul}}$ max.	requis ^e
		> 75°C	requis	requis	requis 75°C ^b max.	requis ^{b, c}	

a) Définition conforme à la norme SN EN 14597

b) Pas requis pour les installations de chauffage de l'eau chaude avec chauffe-eau instantané dont le débit volumique mis à disposition dans le circuit primaire reste inférieur à 2 m³/h.c) En accord avec la norme DIN 32730, l'appareil de commande répond à l'exigence d'étanchéité interne (0.05% de la valeur k_{VS})

d) La régulation de la température de l'eau chaude peut déjà être donnée par l'équipement technique de sécurité.

e) Tant que le dispositif de sécurité est requis par la norme SN EN 14597, il est possible d'utiliser une vanne de réglage (primaire) déjà existante pour le chauffage des locaux.

8.1.7 Dispositifs de réglage

Pour la régulation de la température d'amenée du circuit secondaire, il faut recourir à une vanne combi avec dispositif de sécurité (organe de relais avec régulateur intégré de pression différentielle / de débit). Le régulateur de pression différentielle garantit une pression différentielle du réseau constante au niveau de l'organe de commande, ce qui explique qu'une autorité de la vanne élevée soit visée. La puissance conclue dans le contrat de fourniture de chaleur est réglée à l'aide du régulateur de débit. La valeur finale de pression différentielle de la vanne combi s'élève à 20 kPa. Le débit minimum du compteur d'énergie thermique requis doit être garanti du point de vue de la technique de régulation (ouverture de vanne). Le dispositif de sécurité ferme la vanne à l'état hors tension, en évitant les coups de bélier.

La température d'amenée du circuit secondaire de la chaufferie peut p. ex. être régulée avec une sonde de température extérieure. La température retour du circuit primaire doit se limiter à la température retour admissible maximale conforme au contrat de fourniture de chaleur.

Si la température retour est trop élevée, deux dispositifs sont autorisés. Tant que la température retour est trop élevée, soit la vanne combi du circuit primaire est fermée soit la température retour du circuit primaire est utilisée comme variable de contrôle à la place de la température d'amenée du circuit secondaire.

Les sondes de mesure de la température d'amenée du circuit secondaire et de la température retour du circuit primaire doivent être installées immédiatement à l'entrée de l'échangeur de chaleur. Les sondes d'applique ne doivent pas être utilisées.

8.1.8 Température retour

Les températures retour spécifiées dans les prescriptions de raccordement techniques doivent être comprises comme valeurs maximales. Il faut tendre dans la mesure du possible vers des températures retour plus basses.

A aucun moment il ne faut dépasser la température retour maximale. Des exceptions peuvent être concédées en cas de charge d'eau chaude, mais doivent se limiter à une courte période. Les conditions pour les températures retour maximales doivent être prévues dans le contrat de fourniture de chaleur (prescriptions techniques de raccordement TAV).

Certaines mesures sont adaptées pour diminuer la température retour comme: de grandes surfaces pour les échangeurs de chaleur, des préparateurs d'eau chaude sanitaire (ECS) à échangeur externe ou systèmes de charge d'eau chaude sanitaire, vannes thermostatiques pour radiateurs, limitation des eaux de circulation pour l'eau chaude ainsi qu'une comparaison hydraulique de la chaufferie et de l'installation domestique.

8.1.9 Echangeur de chaleur

Concernant la conception relative à la résistance et la déclaration de conformité, il faut respecter l'Ordonnance

sur la sécurité des équipements sous pression (Ordonnance sur les équipements sous pression) [66]. L'exécution du transfert de chaleur doit fondamentalement s'effectuer selon le principe de circulation à contre-courant.

La pression de conception, la température de conception et la température différentielle doivent être spécifiées dans les prescriptions techniques de raccordement. Il faut définir comme valeur cible une **température différentielle** de 4 à 5 K dans des conditions d'application (température extérieure la plus basse) et une température différentielle de ≤ 3 K dans la plage de charge partielle. En conséquence l'échangeur de chaleur présente une surface de transfert suffisamment grande.

Les modèles suivants entrent en ligne de compte comme échangeurs de chaleur:

- échangeur de chaleur à plaques (vissé, fixé par brasure ou par soudure),
- échangeur de chaleur tubulaire,
- échangeur de chaleur spiralé.

Si les échangeurs de chaleur fixés par brasure ne sont pas autorisés en raison de soudure du cuivre ou du nickel ou pour d'autres raisons, les prescriptions techniques de raccordement doivent obligatoirement le révéler.

Les échangeurs de chaleur doivent être montés exempts de toute tension d'un point de vue mécanique. Aucune force axiale ni couple de flexion ne sont transmis aux raccords de l'échangeur de chaleur.

La température de sortie de l'échangeur de chaleur du circuit secondaire ne doit être ni trop élevée ni trop basse. On recommande une température de sortie augmentée d'environ 5°C par rapport à la température d'amenée requise la plus élevée de tous les circuits d'eau chaude et de chauffage raccordés.

8.1.10 Mise à la terre

La station de transfert et la chaufferie doivent être raccordées à la liaison équipotentielle. Les éléments basse tension notamment, comme le système de bus, doivent en plus être équipés d'un dispositif de protection contre les surtensions.

8.1.11 Saisie des données

Dans la mesure du possible, il faut intégrer à la sous-station une transmission des données directe ou indirecte à la centrale thermique (connexions bus, p. ex. Modbus, etc.), ce qui permet principalement de simplifier la facturation, la détection des dysfonctionnements et l'optimisation de l'installation.

8.1.12 Filtre

Un filtre à grande échelle avec filtre de support et filtre fin aux propriétés suivantes doit être installé dans la conduite d'amenée du circuit primaire:

- Filtre de support avec ouverture de maille de 0,8 mm
- Filtre fin avec ouverture de maille de 0,25 mm

8.2 Chauffage de l'eau chaude

Le chauffage de l'eau potable ou le chauffage de l'eau chaude avec chauffage à distance est possible toute l'année, à condition que le fournisseur d'énergie exploite le réseau de chauffage à distance sur l'ensemble de l'année à la température nécessaire au chauffage de l'eau chaude.

Conformément à la température d'amenée, au rapport de pression dans le réseau primaire et à la toxicité de l'eau de circulation (catégorie de liquide 3 ou 4 selon le chapitre 4.8.1), il faut veiller à un transfert de chaleur adéquat entre l'eau de circulation et l'eau chaude.

Si l'eau de circulation correspond à la catégorie de liquide 3, la séparation entre l'eau de circulation et l'eau chaude peut s'effectuer avec une simple paroi.

Les liquides de catégorie 4 doivent être néanmoins séparés à l'aide d'une paroi double. Une séparation à paroi double se compose d'au moins deux zones ou réservoirs fixes et hermétiques formant une zone intermédiaire neutre entre l'eau chaude d'un côté et l'eau de circulation de l'autre. La zone intermédiaire peut contenir un gaz, un matériau poreux inerte ou un liquide de catégorie 1, 2 ou 3 et être raccordée à une alarme visuelle ou sonore [88].

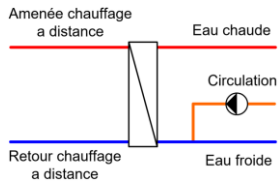
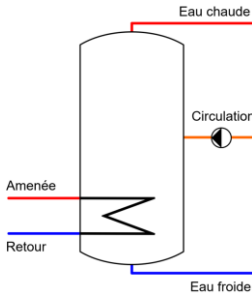
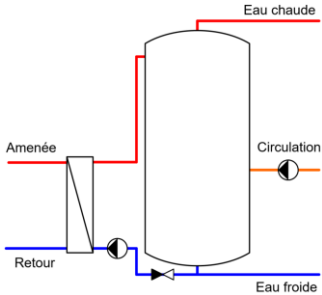
Il faut recourir aux normes SIA 385/1 [83] et SIA 385/2 [84] lors de la mise en place des installations d'approvisionnement en eau chaude avec eau potable dans les bâtiments. Il faut par ailleurs veiller aux points suivants lors de la fourniture de chaleur avec chauffage à distance:

- spécifications des prescriptions techniques de raccordement,
- température d'amenée primaire minimale et maximale (pour un fonctionnement continu ou continu-constant),
- température retour primaire admissible maximale.

Le système de chauffage de l'eau chaude global doit être dimensionné à la température d'amenée du circuit primaire minimale (mi-saison et été) et à la température d'amenée maximale du circuit primaire. Cela concerne particulièrement le dimensionnement de l'échangeur de chaleur et la régulation. Le système global doit continuer à être dimensionné à une température retour primaire la plus basse possible. Trois différentes variantes existent pour le chauffage de l'eau chaude:

- chauffe-eau instantané (station d'eau fraîche),
- chauffe-eau à réservoir (avec échangeur de chaleur interne),
- chauffe-eau avec échangeur de chaleur externe.

Tableau 8.7 Variantes pour le chauffage de l'eau chaude.

	Chauffe-eau instantané (station d'eau fraîche)	Chauffe-eau à réservoir (avec échangeur de chaleur interne)	Réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur externe
			
Description	Dans le cas du chauffe-eau instantané, l'eau chaude est directement chauffée à la date du besoin sur un échangeur de chaleur à plaques. Raccordement au circuit primaire généralement.	Chauffe-eau sous forme d'un réservoir avec surfaces chauffantes intégrées, dans lesquelles l'eau froide est chauffée et stockée. Les pics de consommation sont couverts par le réservoir. Raccordement au circuit secondaire généralement.	Cette variante associe le principe de débit et le principe du ballon d'eau chaude. La charge stockée du ballon s'effectue par un échangeur de chaleur externe et une pompe de charge (circulation avec eau chaude). Les pics de consommation sont couverts par le réservoir.
Avantage	Température retour basse Coûts faibles Faible encombrement Pertes de maintien faibles Réduction de la problématique liée aux légionelles	Volume de soutirage élevé possible Résistance au calcaire Faibles exigences en matière de régulation	Température retour basse Volume de soutirage élevé possible Capacité de charge constante faible (réduction de la puissance connectée) Taux d'utilisation élevé du réservoir
Inconvénient	Puissance de raccordement requise élevée (avec accumulateur de chaleur en amont négligeable) Régulation (complexe) correcte requise Sensibilité à une teneur élevée de l'eau en calcaire	Température retour croissante au cours du processus de charge Rejets de chaleur du réservoir Puissance de montée en température croissante au cours du processus de charge Problématique liée aux légionelles	Coûts d'investissement élevés Régulation complexe requise Rejets de chaleur du réservoir Problématique liée aux légionelles

Les variantes décrites dans le Tableau 8.7 peuvent être raccordées directement (circuit primaire) ou indirectement à un échangeur de chaleur dans le réseau de chauffage à distance (circuit secondaire).

Dans le cas d'un chauffe-eau instantané, un réservoir d'eau chaude en amont p. ex. permet de compenser la puissance de raccordement relativement élevée, le raccordement s'effectuant d'ailleurs sur le circuit secondaire. Sinon le raccordement n'est pertinent du point de vue énergétique que s'il est effectué sur le circuit primaire. Il présente néanmoins l'inconvénient de nécessiter une puissance de raccordement élevée.

Les systèmes de stockage sont également adaptés au raccordement au circuit secondaire (selon l'échangeur de chaleur principal). Les systèmes de stockage, notamment les chauffe-eau à réservoir avec échangeur de chaleur interne, doivent si possible être conçus comme circuit prioritaire d'eau chaude (anciennement: dispositif d'enclenchement prioritaire). Ils mettent la priorité sur l'approvisionnement en chaleur du réservoir d'eau chaude, par rapport aux besoins en chauffage des locaux p. ex. La puissance de raccordement convenue peut être définie à la baisse grâce au circuit prioritaire. Pour le circuit prioritaire ou le chauffage de l'eau chaude, la puissance du circuit de chauffage n'est revue à la baisse au moyen d'un système de régulation intelligent que dans la mesure où la puissance de raccordement convenue dans le contrat de fourniture de chaleur n'est pas dépassée et où la puissance relative au chauffage de l'eau chaude est disponible en quantité suffisante. Le chauffage de l'eau chaude doit pouvoir également être transféré au cours de la nuit.

Des températures retour primaires constamment basses sont possibles dans le cas d'un réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur externe. Lors du chauffage et du retrait de l'eau chaude et de l'eau de circulation, il faut veiller à une parfaite stratification de l'eau froide et de l'eau chaude (p. ex. vitesse d'écoulement en cas d'injection de 0,1 m/s max.).

Un échangeur de chaleur supplémentaire pour le pré-chauffage de l'eau froide permet de baisser encore la température retour primaire et d'offrir une possibilité pour les trois variantes de chauffage de l'eau chaude susmentionnées.

8.3 Problématique liée aux légionelles

La problématique liée aux légionelles constitue un phénomène grave auquel il faut accorder une attention particulière lors du stockage et de la distribution de l'eau chaude. La norme SIA 385/1 [83] et le cahier technique de la SSIGE [88] fournissent des informations. Les modèles suivants ont été résumés à partir de [69].

Les légionelles sont des bactéries en forme de bâtonnets qui peuvent induire des maladies chez les êtres humains. Legionella pneumophila est le type de légionelles le plus connu, principal responsable de la légionellose. Toutefois ces bactéries ne s'avèrent dangereuses que si l'on respire des aérosols contaminés par des légionelles sous forme de gouttelettes d'eau très fines d'environ 5 µm de diamètre qui atteignent les poumons. Inversement, on peut tout à fait boire sans danger de l'eau potable chargée en légionelles.

La prolifération de légionelles se produit essentiellement à des températures comprises entre 25°C et 45°C. Les légionelles commencent à mourir dès 55°C (Tableau 8.8). En dessous de 20°C elles sont viables, mais incapables de se reproduire.

Tableau 8.8 Durée de survie des légionelles [69].

Température °C	Durée min	Effet
55.0	19	Réduction du nombre de légionelles jusqu'à une puissance de 10 (valeur D)
57.5	6	
60.0	2	
70.0	quelques secondes	

Les normes suivantes visent à prévenir la prolifération des légionelles:

- Aucune conduite inutilisée ne doit être remplie d'eau dans le système de distribution d'eau chaude. Ceci s'applique notamment lors de l'arrêt ultérieur d'un point de prélèvement.
- L'eau potable restant inutilisée pendant plus de 24 heures à une température comprise entre 25°C et 50°C doit être désinfectée thermiquement: elle doit être chauffée à 60°C pendant une heure. Cette règle n'est recommandée que dans les bâtiments présentant un faible risque.
- L'approvisionnement en eau chaude est conçu de sorte que la température de l'eau à la sortie du chauffe-eau atteigne 60°C, pour parvenir à 55°C dans les conduites maintenues chaudes et à 50°C aux points de prélèvement.
- Les températures minimales ne s'appliquent pas pour les chauffe-eau instantanés, si l'eau chaude ne reste pas plus de 24 heures à une température comprise entre 25°C et 50°C dans le système de distribution d'eau chaude raccordé jusqu'à son prélèvement.
- La quantité d'eau chaude à stocker est définie de manière concise (aucun réservoir d'eau chaude surdimensionné).
- Les réservoirs d'eau chaude doivent régulièrement être nettoyés et surtout détartrés. Les dépôts de

rouille, calcaire et autres favorisent la formation de biofilms et servent de supports au développement des légionelles et d'autres bactéries.

- Les conduites d'eau froide doivent être installées afin d'éviter un chauffage dû aux conduites de chauffage ou aux conduites d'eau chaude parallèles et dans le but d'atteindre une température d'eau froide de 20°C maximum.
- Les points de prélèvement rarement utilisés doivent être régulièrement purgés.

Pour des raisons systémiques, la **température de l'eau dans un réservoir** de préchauffage ne dépasse pas 45°C, conditions idéales pour la prolifération des légionelles. L'eau potable chauffée doit donc se trouver le moins possible dans cette plage de température. Par conséquent le volume disponible du réservoir ne doit jamais descendre en dessous de 60°C dans la zone de réchauffement de l'eau potable. Le volume disponible correspond au pic de volume à attendre (habituellement ce volume correspond aux horaires de pointe) et au

volume suffisant jusqu'au point d'activation de la charge stockée du ballon. Le réchauffement de l'eau potable peut s'effectuer à l'aide d'une source d'énergie secondaire capable elle aussi d'atteindre au moins 60°C.

Afin d'empêcher le refroidissement du système de conduites d'eau chaude lors des arrêts, la **pompe de circulation ou le ruban chauffant** doit fonctionner en exploitation continue. Ceci entraîne malgré tout des rejets de chaleur élevés, ce qui peut perturber la stratification dans le réservoir d'eau chaude.

Lors de l'utilisation d'**organes mélangeurs centralisés** les conduites d'approvisionnement et d'émission fonctionnent à des températures d'eau potable situées dans une plage idéale pour la prolifération des légionelles (25°C à 45°C). C'est pourquoi ces installations ne sont pas adaptées aux classes de risque 1 et 2 sans mesures spécifiques (p. ex. ionisation ou ozonisation). Il est recommandé pour la classe de risque 3 de chauffer l'eau chaude dans l'installation une fois par jour durant au moins une heure à 60°C (Tableau 8.9).

Tableau 8.9 Classes de risque pour les bâtiments et installations et les mesures spécifiques pour les légionelles [69].

Classe de risque	Description	Catégorie de bâtiment	Mesures recommandées conformes à la SSIGE
1 Risque élevé	Bâtiments dans lesquels se trouvent des personnes avec un système immunitaire affaibli. Bâtiments avec des systèmes de conduites complets ainsi que des installations avec prélèvements d'eau irréguliers (stagnations prolongées).	Hôpitaux avec soins intensifs, services de transplantation et départements spécialisés respectifs (oncologie, néonatalogie).	Respect des instructions compilées par les responsables de l'hygiène. Contrôles de routine des températures de l'eau chaude et analyses bactériologiques.
2 Risque modéré	Dans ces bâtiments, les risques résultent essentiellement d'installations de grande envergure avec des phases de stagnation partiellement longues.	Immeubles locatifs avec approvisionnements en eau chaude centralisés, écoles avec douches, hôtels, casernes, prisons, hôpitaux sans services susmentionnés, maisons de repos et de retraite, salles de sport, piscines couvertes et de plein air	Contrôles réguliers de la température de l'eau chaude (au moins tous les 2 mois) Conformité de la température de l'eau chaude: dans l'installation de traitement globale au moins 60°C pendant une heure par jour, au niveau des points de soutirage au moins 50°C. Si pour des raisons techniques ou à la suite d'économies d'énergie, les températures de sécurité ne sont pas respectées, il faut prévoir des contrôles bactériologiques ou des systèmes alternatifs (ionisation, ozonisation ou autres). Les analyses d'eau concernant les légionelles ne sont nécessaires qu'en cas de maladies ou pour les raisons susmentionnées. Des mesures supplémentaires doivent être prises en cas de maladies et de résultat positif de l'analyse de l'eau.
3 Risque faible	Bâtiments avec phases de stagnation généralement longues.	Maisons individuelles, bâtiments d'habitation sans approvisionnement d'eau chaude centralisé, administration, écoles sans douches, commerces, restaurants, lieux de rassemblement, entrepôts.	En cas de doute concernant l'hygiène des installations d'eau potable, des analyses correspondantes peuvent être effectuées. Des mesures doivent être prises en cas de maladies et de résultat positif à l'analyse de l'eau.

8.4 Hydraulique

8.4.1 Concept de base hydraulique

Le transfert de chaleur peut s'effectuer selon le chapitre 5.2 indirectement sur un échangeur de chaleur ou directement. Le transfert de chaleur indirect est généralement privilégié de nos jours. Afin d'atteindre une température retour la plus basse possible, la chaufferie du circuit secondaire et l'installation domestique ne doivent présenter aucun court-circuit hydraulique entre l'amenée et retour.

Les dispositifs suivants ne sont par conséquent pas autorisés:

- réservoirs d'expansion ouverts,
- distributeur double (système de tubes à double paroi, carré),
- by-pass (sur distributeur, chez les consommateurs, etc.),
- soupapes et vannes de décharge entre amenée et retour,
- branchements en injection avec vannes à trois voies,
- conduites de dérivation avec vannes à trois voies,
- vanne mélangeuse à quatre voies,
- batterie de chauffe / dispositifs de ventilation sans vanne de zone.

Tableau 8.10 Branchement en mélange, branchement en injection avec vanne à passage et branchement à étranglement.

	Branchement en mélange	Branchement en injection avec vanne à passage	Branchement à étranglement
Propriétés	<ul style="list-style-type: none"> • Température retour basse en cas de faible charge (tout à fait appropriée en cas de générateur de chaleur à condensation) • Débit massique constant avec température d'amenée variable dans le circuit consommateur, si aucun régulateur de débit massique (p. ex. vannes thermostatiques) n'est installé pour la conversion du travail mécanique • débit massique variable sur le circuit producteur (régulé par pompe). • Répartition homogène de la température sur le circuit de chauffage 	<ul style="list-style-type: none"> • Température retour basse • Débit massique constant avec température d'amenée variable dans le circuit consommateur, si aucun régulateur de débit massique (p. ex. vannes thermostatiques) n'est installé pour la conversion du travail mécanique • Débit massique variable sur le circuit producteur (régulé par pompe) • Répartition homogène de la température sur le circuit de chauffage • Une pompe principale doit toujours être prise en considération en cas de branchements en injection avec organe de relais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Température retour basse • Débit massique variable au niveau du consommateur et du circuit producteur • Vitesses d'écoulement lentes en cas de charge partielle • Répartition homogène de la température sur le circuit de chauffage • Une pompe principale doit toujours être prise en considération en cas de branchements à étranglement avec organe de relais
Utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Régulation des radiateurs et des planchers chauffants • Installations avec générateurs de chaleur à basse température (production de chaleur à condensation; chaudière à condensation) ou pompes à chaleur 	<ul style="list-style-type: none"> • Raccordements de chauffage à distance (directs / indirects) • Régulation des radiateurs et des planchers chauffants • Installations avec générateurs de chaleur à basse température (production de chaleur à condensation; chaudière à condensation) ou pompes à chaleur • Production de l'eau chaude sanitaire avec limitation de température max. en cas d'eau dure ou limitation de température retour max. • Générateur d'air chaud (batterie de chauffe) avec risque de gel 	<ul style="list-style-type: none"> • Raccordements de chauffage à distance (indirects) • Accumulateur de chaleur • Régulation de zones des radiateurs et des planchers chauffants • Régulation par pièce (p. ex. sur les vannes thermostatiques) • Batterie de refroidissement dans des systèmes de grande taille • Générateur d'air chaud (batterie de chauffe) • Installations avec générateurs de chaleur à basse température (production de chaleur à condensation; chaudière à condensation)

	Branchement en mélange	Branchement en injection avec vanne à passage	Branchement à étranglement
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Températures retour basses • Facilité de réglage en cas de recours à des distributeurs sans pression ou à faible pression • Différents circuits de chauffage s'influencent faiblement (ajustement simplifié, stable) 	<ul style="list-style-type: none"> • Températures retour basses 	<ul style="list-style-type: none"> • Températures retour basses • Régulation par pièce simple sur les vannes thermostatiques
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune pression différentielle du réseau circuit primaire autorisée (distributeur à faible pression) 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de deux pompes de circulation min. • Le distributeur de chauffage doit être sans découplage hydraulique 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de gel pour générateur d'air chaud (batterie) • Le distributeur de chauffage doit être sans découplage hydraulique

8.4.2 Circuits de base

En pratique, tous les circuits en technique du bâtiment reposent sur les circuits de base hydrauliques suivants:

- Branchement en mélange
- Conduite de dérivation
- Branchement en injection
- Branchement à étranglement

Dans les modèles suivants, seuls sont détaillés le branchement en mélange, le branchement en injection avec vanne à passage et le branchement à étranglement (Tableau 8.10). Il s'agit aujourd'hui des circuits les plus répandus en technique du bâtiment. Le branchement en injection avec vanne à passage et le branchement à étranglement sont utilisés comme circuits de base pour le raccordement de chauffage à distance du circuit primaire.

8.4.2.1 Branchement en mélange

Les groupes de chauffage sur le circuit secondaire (distributeur à faible pression) sont privilégiés comme branchement en mélange. L'eau de retour est ainsi mélangée à l'eau d'amenée à la température d'amenée souhaitée du groupe de chauffage. La température d'amenée souhaitée du groupe de chauffage est définie à l'aide de la courbe de chauffage et dépend de la température extérieure. En cas d'utilisation de vannes thermostatiques, le débit massique est variable dans le circuit d'émission de chaleur, c'est pourquoi il faut obligatoirement recourir à des pompes de circulation régulées. Si la température d'amenée primaire du fournisseur de chauffage à distance s'avère dans les conditions d'application supérieure à la température d'amenée secondaire requise dans le groupe de chauffage (p. ex. système de chauffage par le sol), un **by-pass interne** doit être installé au niveau du branchement en mélange sur le circuit secondaire. La règle est d'employer un by-pass interne, si le rapport de température suivant (amenée distribution – retour circuit de chauffage) / (amenée circuit de chauffage – retour circuit de chauffage) est supérieur à 2,5. En mélangeant constamment l'eau de retour refroidie à l'aide d'un by-pass, la température d'amenée baisse et l'organe de commande de l'ensemble de l'unité est à disposition pour la régulation. L'organe de commande est donc utilisé de manière optimale pour le réglage.

8.4.2.2 Branchement en injection avec vanne à passage

Dans le cas de distributeurs de chauffage sans découplage hydraulique, une pression différentielle est mise à la disposition du circuit consommateur grâce à la pompe du circuit producteur (p. ex. pompe de chauffage à distance dans le circuit primaire). Selon la position de la vanne à passage, le consommateur de chaleur injecte plus ou moins d'eau d'amenée du fournisseur d'énergie (générateur de chaleur, circuit primaire). Une régulation de température se produit dans le circuit consommateur à débit constant, ainsi qu'une régulation de débit dans le circuit consommateur à débit variable. C'est pourquoi il faut obligatoirement utiliser une pompe de réseau avec variateur de fréquence.

Un branchement en injection avec vanne à passage est privilégié en cas de raccordements directs à un réseau de chauffage à distance. On peut ainsi éviter une température retour élevée en charge partielle. Le chauffage de l'eau chaude constitue un domaine d'application supplémentaire. En effet, en cas d'eau dure il est possible d'empêcher une calcification du circuit secondaire de l'échangeur de chaleur, causée par une température d'amenée du circuit primaire trop haute.

8.4.2.3 Branchement à étranglement

Le branchement à étranglement est, comme le branchement en injection, un branchement hydraulique sans découplage hydraulique, qui est utilisé p. ex. dans des raccordements de chauffage à distance indirects au circuit primaire.

Contrairement au branchement en injection avec vanne à passage, une régulation de débit à débit variable se produit dans le circuit consommateur. C'est pourquoi il faut également utiliser une pompe de réseau avec variateur de fréquence.

8.4.3 Vanne de réglage

Tous les circuits de base ont recours aux vannes de réglage, dans de nombreux modèles:

- Vannes de passage avec une entrée et une sortie
- Vannes à trois voies avec deux entrées et une sortie (vannes mélangeuses) ou une entrée et deux sorties (vannes de distribution, plutôt rarement utilisées).

Pour la détermination de la perte de pression des vannes de réglage et la conception de l'hydraulique, le coefficient de débit k_{VS} et la valeur k_V doivent en premier lieu être définis.

Dans le cas de vannes de réglage et de manière générale de robinetterie réglable, la perte de pression n'est pas calculée avec des résistances unitaires, comme pour la robinetterie normale ou les installations de conduites, mais avec la **valeur k_{VS}** . Les fabricants de vannes de réglage indiquent d'ailleurs une valeur k_{VS} pour chaque vanne de réglage. Elle correspond à un débit volumique en m^3/h entre l'entrée et la sortie de la vanne de réglage complètement ouverte à une perte de pression de 1 bar ($\Delta p_{V100} = 1 \text{ bar}$). Cette corrélation s'applique pour l'eau froide à une température entre 5°C et 30°C . Une hausse de température entraîne une plus grande densité de l'eau. En effet, l'eau à 100°C possède une densité inférieure d'environ 4% par rapport à 20°C , ce qui doit être pris en compte à des températures d'eau élevées.

La valeur k_{VS} permet de déterminer la perte de pression en cas de dimensionnement dans le cas d'une vanne de réglage complètement ouverte, pour permettre ensuite une conception correcte la vanne de réglage.

$$k_{VS} = \frac{\dot{V}_{\max}}{\sqrt{\Delta p_{V100}}}$$

$$\Delta p_{V100} = \left(\frac{\dot{V}_{\max}}{k_{VS}} \right)^2$$

max correspond au débit volumique maximal en cas de dimensionnement

Si la vanne concerne une course déterminée (course entre 0% – 100%), la **valeur k_V** d'une vanne désigne le débit volumique en m^3/h qui apparaît en cas de différence de pression entre l'entrée et la sortie d'une vanne de 1 bar (cas de charge partielle).

$$k_V = \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta p}}$$

La courbe caractéristique de base (course en fonction du débit) désigne le comportement hydraulique des vannes de réglage. Les vannes de passage ainsi que les vannes à trois voies sont couramment proposées avec deux courbes caractéristiques de base différentes:

- Courbe caractéristique de base linéaire: variations de course identiques entraînant des variations de débit identiques.
- Courbe caractéristique de base exponentielle: variations de course identiques résultant dans une variation identique en proportion du débit actuel.

La Fig. 8.2 représente une courbe caractéristique de base linéaire et une courbe caractéristique de base exponentielle relatives à une vanne de réglage. En cas de vanne ouverte (c'est-à-dire course maximale H_{100}), la valeur k_V la plus élevée est atteinte, désignée comme valeur k_{VS} . Lors de l'ouverture de la vanne (aucune course) une réponse transitoire d'environ 1% à 5% de k_{VS} se produit. Les vannes devraient par conséquent être

dimensionnées de manière précise, afin de ne pas avoir à les régler dans cette zone.

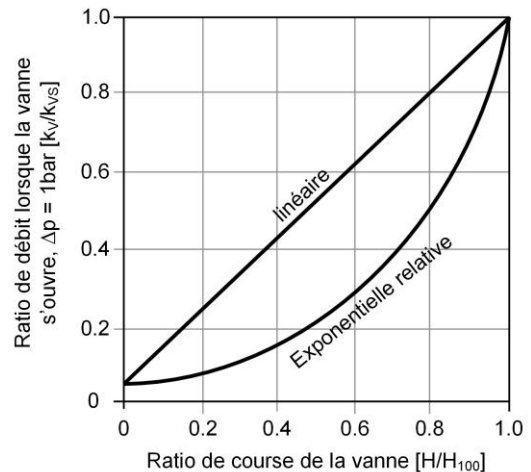


Fig. 8.2 Courbe caractéristique de base linéaire et une courbe caractéristique de base exponentielle relatives à une vanne de réglage.

Dans le cas d'une courbe caractéristique de base **linéaire**, des variations de la valeur k_V similaires se produisent pour la course de la vanne ΔH . Dans le cas d'une courbe caractéristique de base **exponentielle** des variations identiques en pourcentage de la valeur k_V se produisent pour la course de la vanne ΔH .

Lors de la conception des vannes, en plus de l'autorité de la vanne, le comportement de transfert d'éventuels échangeurs de chaleur joue un rôle dans le circuit de régulation, qui est exprimé par la valeur caractéristique a (valeur a) de l'échangeur de chaleur. Etant donné que le calcul de la valeur a est relativement complexe, elle est habituellement prise en compte en choisissant la courbe caractéristique de base appropriée de la vanne de réglage. Cette simplification est en général autorisée, tant qu'une autorité de la vanne de $\geq 0,5$ est respectée. Ainsi la règle simplifiée suivante s'applique dans le choix de la courbe caractéristique de base:

- Circuit de régulation sans échangeur de chaleur = vanne de réglage avec courbe caractéristique de base linéaire (voir Fig. 8.2)
- Circuit de régulation avec échangeur de chaleur = vanne de réglage avec courbe caractéristique de base exponentielle (voir Fig. 8.2)

8.4.4 Autorité de la vanne

Si une vanne est installée dans un branchement hydraulique, elle ne se comporte plus conformément à la courbe caractéristique de base, car la pression différentielle sur la vanne se transforme en une part variable de la chute de pression globale de l'installation. En conséquence la courbe caractéristique de base subit des déformations plus ou moins fortes. Avec une déformation progressive, la précision et la vitesse de régulation continuent d'être toujours plus perturbées. Dans les cas extrêmes, le circuit de régulation est instable et commence à osciller. L'autorité de la vanne sert à mesurer la déformation de la

courbe caractéristique de base, qui est définie comme suit:

L'**autorité de la vanne** est le rapport entre la pression différentielle sur la section standard de la vanne ouverte en cas de débit nominal Δp_{V100} et la pression différentielle maximale apparue sur la section standard de la vanne fermée, lorsque celle-ci commence juste à s'ouvrir Δp_{V0} .

Ce faisant, la chute de pression joue un rôle essentiel sur la partie du branchement, dont le débit variable est influencé par la vanne (en gras dans le Tableau 8.10).

Il n'y a aucun problème pour les branchements avec des **vannes à trois voies**, tant que:

$$P_V = \frac{\Delta p_{V100}}{\Delta p_{V100} + \Delta p_{var100}} \geq 0,5$$

Pour un débit à 100%, la chute de pression sur la vanne à trois voies ouverte (Δp_{V100}) doit être supérieure ou égale à la chute de pression sur la section à débit variable (Δp_{var100}): $\Delta p_{V100} \geq \Delta p_{var100}$.

Il n'y a aucun problème pour les branchements avec des **vannes de passage**, tant que:

$$P_V = \frac{\Delta p_{V100}}{\Delta p_{V0}} \geq 0,3$$

Une autorité de la vanne $P_V \geq 0,5$ est aussi considérée à proprement parler comme valeur cible, mais dans le cas de vannes à passage il faut souvent choisir la valeur limite $P_V \geq 0,3$. En cas de débit à 100% (Δp_{V100}) la chute de pression sur la vanne à passage ouverte doit au moins atteindre 30% de la pression différentielle maximale apparue (ou 3000 Pa minimum) sur la vanne fermée, lorsque celle-ci commence à peine à s'ouvrir (Δp_{V0}):

$$\Delta p_{V100} \geq 0,3 \Delta p_{V0}$$

Etant donné que la chute de pression Δp_{V100} nécessaire résulte de Δp_{V0} , le problème se résume à la question de savoir quelle pression différentielle maximale apparue sur la vanne fermée Δp_{V0} doit être utilisée. Dans le pire des cas (pompe non régulée), cette dernière correspond à la hauteur de refoulement maximale de la pompe avec un débit nul, soit une valeur très élevée, surtout pour les pompes à courbes plates. Il en résulte des valeurs nettement plus basses, à condition de veiller aux points suivants:

- Définir avec exactitude le point de fonctionnement considéré comme le pire des cas pour la pression différentielle maximale apparue. (se cumulant également aux autres possibilités).
- Utiliser une pompe de circuit de chauffage à distance avec régulation de la pression constante. Il en résulte une courbe caractéristique des pompes plate (voir chapitre 3.3.3).
- Prévoir le site de mesure pour la régulation de la pression différentielle du réseau de la pompe de circuit de chauffage à distance dans le réseau de chauffage plutôt que sur la pompe (voir chapitre 3.5).

- Utiliser une pompe de circuit de chauffage à distance avec régulateur de pression proportionnelle (voir chapitre 3.3.3).
- Intégrer un régulateur de pression différentielle automatique au niveau du consommateur de chaleur. La valeur prévue d'un tel régulateur est en général réglée entre 10 et 100 kPa. Ainsi des vannes de réglage rationnelles peuvent certes être conçues sans problème, mais des pressions différentielles de raccordement supérieures sont également nécessaires (voir chapitre 8.4.5.2).
- Installer des vannes combi (vannes de réglage indépendantes de la pression). Dans cette conception, des régulateurs de pression différentielle sont installés dans un corps sans énergie auxiliaire ni vanne de réglage. La mesure de la pression différentielle pour la régulation hydraulique de la vanne s'effectue ici directement sur la vanne de réglage (voir chapitre 8.4.5.3).

Remarque:

Plusieurs groupes sont souvent raccordés comme branchement en mélange avec une faible pression différentielle. Chaque pompe de groupes récupère ainsi l'eau à partir de la vanne et la section à débit variable. Dans ce contexte se pose la question: «Quelle est la pression différentielle maximale sur la section à débit variable?» Si cette pression différentielle est effectivement trop importante, les différents groupes (pompes) s'influencent mutuellement. Pour l'éviter, en plus de la règle sur l'autorité de la vanne, il convient de respecter la règle suivante:

Si plusieurs groupes sont raccordés avec une faible pression différentielle comme branchement en mélange, la pression différentielle maximale sur la section à débit variable ne doit pas être supérieure à 20% de la hauteur de refoulement de la plus petite pompe de groupes au point d'application.

8.4.4.1 Régulateur de pression différentielle automatique

Actuellement dans les réseaux de chauffage, ce sont souvent des régulateurs de pression différentielle automatiques qui sont installés chez le consommateur de chaleur. La valeur prévue d'un tel régulateur est en général réglée entre 10 et 100 kPa. On peut donc installer sans problème des vannes de réglage rationnelles, mais des pressions différentielles de raccordement supérieures sont également nécessaires (voir chapitre). L'ampleur des variations de pression différentielle dans le réseau de chauffage est primordiale pour la conception des régulateurs de pression différentielle et des vannes de réglage. Le chemin jusqu'au consommateur de chaleur déterminant, en général le plus éloigné, conditionne le calcul du réseau de conduite. D'où les recommandations suivantes:

- L'utilisation de régulateurs de pression différentielle sans énergie auxiliaire est pertinente, si des rapports de pression clairement définis doivent prévaloir chez chaque consommateur de chaleur.
- Dimensionner une chute de pression la plus basse possible pour un échangeur de chaleur au niveau du consommateur de chaleur le moins bien situé. Dimensionner une chute de pression sur la vanne de réglage conformément à une autorité de la vanne 0,3...0,5.
- Calculer de manière réaliste la pression différentielle éventuelle maximale sur le régulateur de pression différentielle presque fermé, qui commence tout juste à s'ouvrir:
 - Utiliser la valeur la plus élevée théoriquement possible pour de petits réseaux de chauffage afin de calculer l'autorité de la vanne et réaliser une autorité de la vanne suffisamment élevée $\geq 0,2$ à 0,3
 - Pour de grands réseaux de chauffage, pour lesquels les nombreux consommateurs de chaleur raccordés présentent une charge dépendante des conditions météorologiques plus ou moins égale, il est possible de calculer la pression différentielle maximale apparue avec une valeur plus basse (p. ex. 50%) ou d'accepter en conséquence une autorité de la vanne plus mauvaise (p. ex. $\geq 0,1$ à 0,15).
- Prévoir une chute de pression suffisante sur le régulateur de pression différentielle ouvert (cas de dimensionnement) pour des consommateurs de chaleur plus proches, car une pression différentielle de raccordement suffisamment importante y est toujours disponible.
- Concernant des installations avec mesure de la pression différentielle dans le réseau ou des pompes avec régulateur de pression proportionnelle, il est possible en cas de faible charge de l'ensemble de l'installation que le consommateur de chaleur en début de réseau ait soudain une pression différentielle trop faible pour la pleine charge. Il est judicieux donc de choisir ici une autorité de la vanne qui ne soit pas inutilement trop élevée.

8.4.4.2 Vanne de régulation indépendante de la pression différentielle (vanne combi)

Concernant la vanne combi, des régulateurs de pression différentielle sont installés dans un corps sans énergie auxiliaire ni vanne de réglage (Fig. 8.4). La mesure de la pression différentielle s'effectue ici directement sur la vanne de réglage. Ainsi l'autorité de la vanne de réglage dépend uniquement de la bande proportionnelle du régulateur de pression différentielle. La chute de pression globale sur la vanne combi se compose donc de la manière suivante:

Δp vanne combi = Δp vanne de réglage + Δp régulateur de pression différentielle

La pression différentielle sur la vanne de réglage est fixée par le fabricant (p. ex. 20 kPa) et la chute de pression sur le régulateur de pression différentielle est indiquée par sa valeur k_{vs} . Ici aussi il est de règle de respecter une autorité de la vanne minimale concernant le régulateur de pression différentielle.

Les vannes combi présentent l'avantage de loger dans un seul corps le régulateur de pression différentielle et la vanne de réglage à bon marché. Autrement les modèles de régulateurs de pression différentielle automatiques ci-dessus constituent la norme, à la différence que la mesure de la pression différentielle s'effectue directement sur la vanne de réglage.

8.4.5 Systèmes en cas de réseaux variables

Les systèmes hydrauliques efficaces du point de vue énergétique sont conçus et construits de sorte que de nombreuses sections partielles soient traversées par un débit massique variable. Cela signifie que le débit massique requis réagit aux conditions d'exploitation et que par conséquent la pompe de circulation s'adapte aussi à la vitesse de rotation. Ce chapitre explique le comportement du système hydraulique à l'ouverture et à la fermeture des vannes de réglage chez les consommateurs. Des détails se trouvent dans [70] et sont résumés ci-après.

8.4.5.1 Equilibrage hydraulique statique

Une répartition des tâches existe pour l'équilibrage hydraulique statique entre:

- la **vanne de régulation** caractérisée par une tâche clairement orientée sur la technique de régulation et
- la **vanne d'équilibrage** caractérisée par une tâche clairement hydraulique de l'équilibrage statique.

La vanne d'équilibrage statique (vanne de régulation de voie) permet de régler manuellement les systèmes hydrauliques. Les vannes disposent d'une fonction de pré-réglage intégrée pour déterminer précisément la capacité de débit. Les vannes de régulation de voie possèdent des paramètres par défaut fixes. Les caractéristiques de l'équilibrage statique sont:

- L'équilibrage hydraulique statique entraîne un sous-alimentation et un sur-alimentation des consommateurs en froid et en chaleur.
- Les différents débits massiques influencent les températures retour sur la production de chaleur dans la zone de charge partielle.
- Un sur-alimentation peut entraîner une hausse de la température retour (débit massique élevé, ΔT faible) et un sous-alimentation (faible débit massique, ΔT élevé) une chute de cette même température retour.
- Ceci peut avoir un impact sur le rendement ou la température d'amenée selon l'intégration hydraulique du générateur de chaleur.
- En cas de charge partielle, les réseaux peuvent être organisés de manière équilibrée, si les pompes sont réglées sur Pression = constante. Cette mesure porte cependant préjudice à l'efficacité énergétique et au besoin en électricité pour la pompe de circulation.

En raison des inconvénients fondamentaux, le type d'hydraulique avec équilibrage statique et régulation n'est plus d'actualité, pour le réseau de chauffage à distance comme pour la distribution de chaleur interne.

8.4.5.2 Equilibrage hydraulique avec régulateur de pression différentielle automatique

La répartition des tâches suivante est valable pour l'équilibrage hydraulique avec un régulateur de pression différentielle automatique :

- la **vanne de régulation** caractérisée par une tâche clairement orientée sur la technique de régulation et
- une **vanne d'équilibrage** dynamique caractérisée par une mission clairement hydraulique d'équilibrage hydraulique dans chaque cas d'utilisation.
- avec chaque vanne de pression différentielle automatique, la pression sur le consommateur et la vanne de réglage est maintenue constante dans chaque cas d'utilisation (fonctionnement en charge partielle).

Dans les systèmes hydrauliques les rapports de pression entre les différents consommateurs et les branches peuvent fortement fluctuer en fonction de la demande de puissance nécessaire à chaque consommateur. Il est donc indispensable de créer dans tous les tronçons d'installations des rapports de pression équivalents, indépendamment du besoin de chaque consommateur. La sous-station constitue un exemple pour un tel consommateur dans le circuit primaire d'un réseau de chauffage à distance. Les branches montantes, radiateurs, surfaces réfrigérantes de plafond, distributeurs de chauffage au sol, ventilo-convecteurs, unités à induction ou générateurs d'air chaud sont des exemples dans le circuit secondaire.

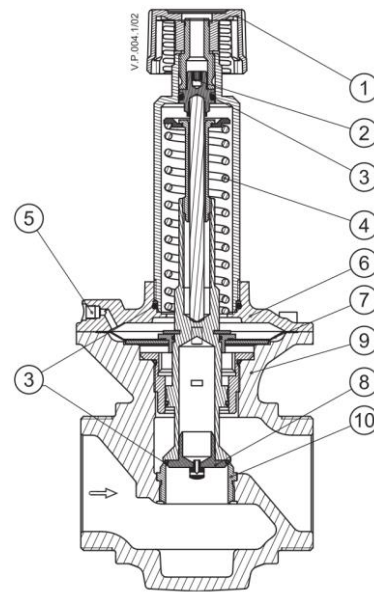


Fig. 8.3 Section régulateur de pression différentielle automatiques ASV (Danfoss).

Les régulateurs de pression différentielle automatiques assurent une pression différentielle du réseau constamment réglable sur un tronçon d'installation. Sur un raccordement interne et avec le ressort de consigne, la pression dans le retour agit sur la partie inférieure de la membrane de régulation (Fig. 8.3; 7), alors que sur une conduite d'impulsion (Fig. 8.3; 5) la pression d'amenée agit sur le haut de la membrane. Avec la force du ressort pré-réglée, la pression différentielle du réseau réglée est maintenue constante dans le tronçon d'installation suivant au moyen de la vanne de pression différentielle. Des régulateurs de pression différentielle automatiques doivent être installés dans le retour, combinés à une vanne partenaire (vanne de régulation de voie) dans l'amenée. Des régulateurs de pression différentielle automatiques ne limitent pas seulement la pression différentielle du réseau dans les conditions d'application, mais également en cas de charge partielle.

Les bruits de débit dans la robinetterie peuvent être évités en régulant la pression en cas de charge partielle. La régulation de la pression différentielle du réseau permet à la robinetterie de régulation suivante, par exemple les vannes thermostatiques, d'économiser une autorité de la vanne supérieure et donc d'obtenir une régulation des températures plus précise et plus stable, et donc d'économiser de l'énergie.

Les principales caractéristiques de l'équilibrage hydraulique avec régulateur de pression différentielle automatique sont :

- L'équilibrage n'entraîne en pratique aucun sous-alimentation ni sur-alimentation.
- Le régulateur de pression différentielle automatique prend en charge l'équilibrage hydraulique avec un fonctionnement en charge partielle et réagit aux variations du débit massique.
- La régulation de l'échangeur de chaleur ou des groupes dans les systèmes d'émission de chaleur doit

moins réagir à la variation hydraulique et être plus stable et plus efficace du point de vue énergétique.

- Les différents débits massiques ont une influence faible sur les températures retour et donc sur le générateur de chaleur.
- Le rendement ou la température d'amenée du générateur de chaleur ne sont pas impactés par un équilibrage hydraulique incorrect avec un fonctionnement en charge partielle.
- Une grande importance doit être accordée à la courbe caractéristique de régulation de la pompe, afin que les consommateurs ayant un besoin élevé de froid et de chaleur ne soient pas exposés à une pression trop faible et donc sous-alimentés dans un comportement en cas de charge partielle.

8.4.5.3 Equilibrage hydraulique avec vanne de régulation indépendante de la pression différentielle (vanne combi)

Avec l'équilibrage hydraulique avec vannes de régulation indépendantes de la pression différentielle (vanne combi), la répartition des tâches entre la vanne de réglage et une vanne d'équilibrage statique ou automatique n'est plus prise en compte. Dans ce système, les fonctions hydrauliques et techniques sur le plan de la régulation sont intégrées dans une vanne dynamique. Avec la vanne combi, la pression sur le consommateur et la vanne de réglage est maintenue constante dans chaque cas d'utilisation (fonctionnement en charge partielle) avec une vanne.

La vanne combi (Fig. 8.4) se compose d'un régulateur de pression différentielle et d'une vanne de réglage.

Le **régulateur de pression différentielle** maintient une pression différentielle du réseau constante sur la vanne de réglage. La force du ressort agit à l'inverse sur la pression différentielle du réseau Δp_{cv} (p_2-p_3) au niveau de la membrane. Si la pression différentielle du réseau se modifie sur la vanne de réglage (en cas de changement de la pression disponible ou en raison d'une action de la vanne de réglage), le cône creux glisse dans une nouvelle position, conduisant à un nouvel équilibre et maintenant à un niveau constant la pression différentielle du réseau.

La **vanne de réglage** présente une caractéristique linéaire. Elle dispose d'un pré-réglage de la valeur k_v sous la forme d'une limitation maximale de la course de la vanne. La valeur de pourcentage indiquée sur l'échelle correspond à la part en pourcentage de la capacité de débit. Avec la vanne de Danfoss (AB-QM) montrée dans cet exemple, le réglage peut être modifié, en relevant le pré-réglage et en tournant la partie supérieure de la vanne dans la position souhaitée (la valeur en pourcentage indiquée sur l'échelle). Un mécanisme de verrouillage empêche un déplacement involontaire de la vanne.

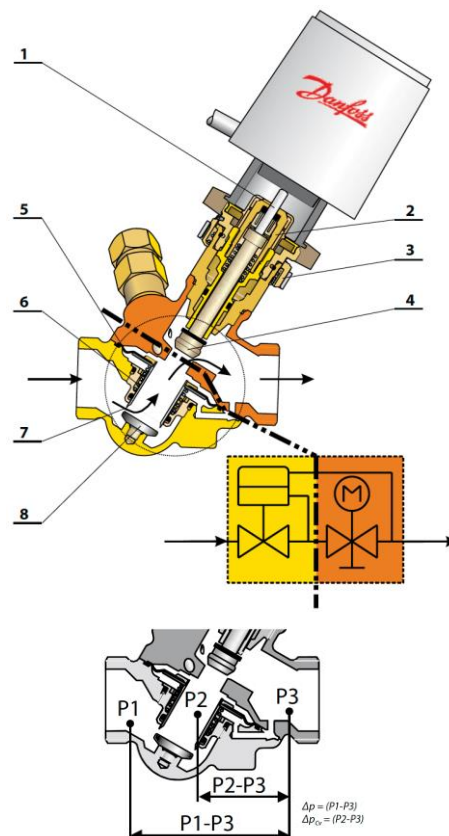


Fig. 8.4 Section d'une vanne de régulation indépendante de la pression différentielle AB-QM (Danfoss). La vanne se compose d'un régulateur de pression différentielle (jaune) et d'une vanne de réglage (orange).

Comme décrit plus haut, la pression différentielle est constamment maintenue sur la vanne de réglage. La perte de pression sur la vanne de réglage est donc constante en cas de dimensionnement et dans tous les cas de charge partielle. Ainsi on peut partir d'une **autorité de la vanne constante** $P_v = 1.0$. La chute de pression sur la partie variable de la section partielle n'est pas pertinente, car la chute de pression sur la vanne de réglage n'est pas constamment maintenue.

Les principales caractéristiques de l'équilibrage hydraulique avec vannes combi sont:

- L'équilibrage n'entraîne en pratique aucun sous-alimentation ni sur-alimentation du consommateur.
- La vanne de réglage indépendante de la pression différentielle prend en charge l'équilibrage hydraulique avec un fonctionnement en charge partielle et réagit aux variations du débit massique.
- La régulation de l'échangeur de chaleur ou des groupes dans les systèmes d'émission de chaleur ne doit pas réagir à la variation hydraulique et être plus stable et plus efficace du point de vue énergétique.
- Les différents débits massiques n'ont aucune influence négative sur les températures retour et donc sur le générateur de chaleur.
- Le rendement ou la température d'amenée du générateur de chaleur ne sont pas impactés par un

équilibre hydraulique incorrect avec un fonctionnement en charge partielle.

- Une grande importance doit être accordée à la courbe caractéristique de régulation de la pompe, afin que les consommateurs ayant un besoin élevé de froid et de chaleur ne soient pas exposés à une pression trop faible et donc sous-alimentés dans un comportement en cas de charge partielle.
- Les données techniques des appareils de tous les fabricants doivent être vérifiées et être publiées par un institut de mesure neutre.

8.4.5.4 Comparaison des systèmes par rapport à l'équilibre hydraulique

Sur-alimentation et sous-alimentation

Les systèmes avec régulateur de pression différentielle automatique ou vanne combi ne produisent en pratique aucun sous-alimentation ni sur-alimentation par le biais du débit massique. Ainsi la différence de température et donc la température retour ne se différencient pas de la valeur prévue dans le cadre du fonctionnement en charge partielle. Les générateurs de chaleur peuvent être exploités sans perte d'efficacité énergétique.

Pression de la pompe

Les systèmes avec régulateur de pression différentielle automatique ou vanne combi nécessitent plus ou moins les mêmes pressions de refoulement et puissance absorbée électrique des pompes. Ainsi les deux systèmes peuvent être équipés avec des pompes à peu près identiques à haut rendement énergétique. Des systèmes avec équilibre statique ont besoin de capacités de pompes bien supérieures et donc de plus d'énergie. Une conception hydraulique incorrecte provoque une consommation électrique trop élevée pendant des années, voire même des décennies.

Courbe caractéristique de régulation de la pompe

Des systèmes avec **équilibre statique** peuvent en général être exploités avec des courbes caractéristiques de régulation de la pompe constante. Il est ainsi possible d'éviter un sous-alimentation des consommateurs. Ce système hydraulique ne doit plus être utilisé dans des systèmes de débit massique variables modernes.

En règle générale, des systèmes avec **régulateurs de pression différentielle automatiques** peuvent être exploités avec des courbes caractéristiques de régulation de la pompe proportionnelle, pour lesquels la pression de refoulement minimale dans la zone de charge partielle doit être suffisamment prise en compte au niveau de l'ensemble des consommateurs.

En règle générale, des systèmes avec **vanne combi** peuvent être exploités avec des courbes caractéristiques de régulation de la pompe proportionnelle, pour lesquels la pression de refoulement minimale dans la zone de charge partielle doit être suffisamment prise en compte au niveau de l'ensemble des consommateurs.

Tableau 8.11 Courbes caractéristiques de régulation de la pompe pour les différents systèmes d'équilibre hydrauliques et de régulation.
* Veiller à une pression de refoulement minimale en cas de charge partielle

Équilibre hydraulique	Courbe caractéristique de régulation de la pompe
Équilibre statique	Constant
Régulateur de pression différentielle automatique	Proportionnelle*
Vanne de réglage indépendante de la pression différentielle	Proportionnelle*

Débit volumique en cas de charge partielle

Le système avec vanne combi nécessite un débit volumique inférieur avec un fonctionnement en charge partielle, car l'autorité de la vanne est supérieure. En raison du débit volumique requis inférieur, il est donc possible d'économiser l'énergie de pompage électrique.

Des systèmes avec équilibre statique sont inefficaces du point de vue hydraulique et ne doivent plus être utilisés dans des systèmes de débit massique variables modernes.

Pour des systèmes hydrauliques dans lesquels est installée une robinetterie avec pression différentielle requise minimale intégrée, il convient de clarifier si ces pressions différentielles doivent également être respectées dans le cas d'un fonctionnement en charge partielle. Cette question a une influence prépondérante sur l'évolution de la courbe caractéristique de régulation de la pompe.

Des sous-systèmes d'un ensemble de l'installation sont aussi compatibles avec un fonctionnement en charge partielle de l'ensemble de l'installation à proximité du point d'application et donc peuvent presque nécessiter le débit volumique de conception. Un sous-alimentation peut donc survenir en cas de courbe caractéristique de régulation de la pompe basse pour tous les systèmes hydrauliques.

Il faut accorder la plus grande attention au choix de la courbe caractéristique de régulation de la pompe dans les systèmes hydrauliques variables.

8.5 Solutions standard

La Fig. 8.5 offre un aperçu des possibilités de raccordements de chauffage à distance. Elle est divisée de la manière suivante:

- raccordement direct ou indirect,
- avec ou sans chauffage de l'eau chaude,
- type de chauffage de l'eau chaude (chauffe-eau instantané et chauffe-eau avec échangeur de chaleur interne ou externe),
- raccordement du chauffage de l'eau chaude au niveau du circuit primaire ou secondaire.

Le chapitre 5.2 aborde en détails les raccordements directs et indirects. Les principales solutions standard pour les raccordements de chauffage à distance directs et indirects sont représentées schématiquement et décrites brièvement dans les pages suivantes. Sur la représentation schématique, une vanne de régulation indépendante de la pression différentielle (vanne combi) est systématiquement utilisée pour la régulation du débit volumique et de la pression différentielle du réseau. La régulation du débit volumique et de la pression différentielle du réseau peut s'effectuer alternativement sur une

vanne à passage séparée et un régulateur de pression différentielle.

Les schémas ne sont pas détaillés. Par souci de simplification on a en effet renoncé à une représentation détaillée de la technique de mesure et de régulation (p. ex. régulateur et lignes d'action).

Par ailleurs différentes solutions standards sont indiquées pour le chauffage de l'eau chaude. Les schémas détaillent les deux réservoirs d'eau chaude avec échangeur de chaleur interne ou externe. Les réservoirs d'eau chaude doivent être principalement chargés sur un circuit prioritaire d'eau chaude (anciennement: dispositif d'encenchement prioritaire). Le chargement peut aussi avoir lieu parallèlement. Le chargement parallèle du réservoir d'eau chaude est plus complexe du point de vue de la technique de régulation et plus coûteux. La puissance de raccordement doit certes être déterminée en conséquence, mais elle possède des avantages en cas de besoins en eau chaude élevés (p. ex. hôpital ou maison de retraite).

Deux solutions avec pompes à jet sont détaillées dans la suite.

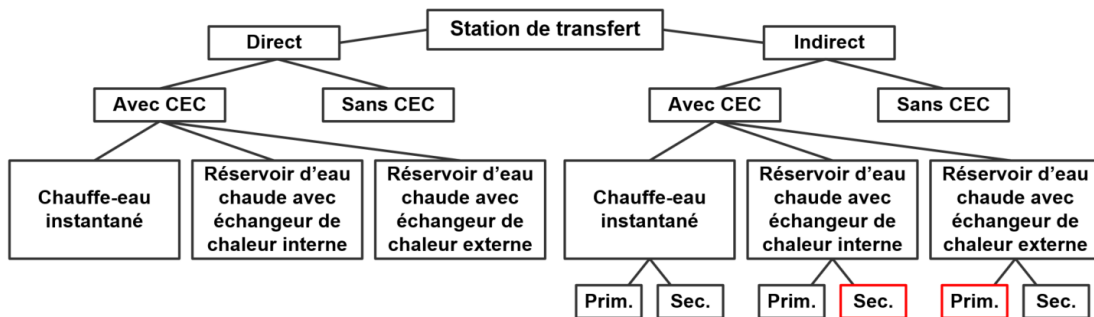


Fig. 8.5 Possibilités de raccordement de chauffage à distance avec ou sans chauffage de l'eau chaude. Le type de raccordement courant pour le chauffage de l'eau chaude en cas de raccordement indirect est caractérisé par un cadre rouge, pour lequel prim. désigne le raccordement du chauffage de l'eau chaude au circuit primaire et sec. le raccordement au circuit secondaire.

8.5.1 Raccordement direct

Les circuits de chauffage disposent d'une régulation de la température d'amenée en fonction des conditions climatiques et la température retour primaire est limitée si la température retour maximale admissible risque d'être dépassée au-delà d'une limitation de température retour.

Raccordement direct à un groupe de chauffage par le biais d'un **branchement à étranglement** conformément à la Fig. 8.6 (débit variable dans le groupe de chauffage, p. ex. raccordement à un générateur d'air chaud).

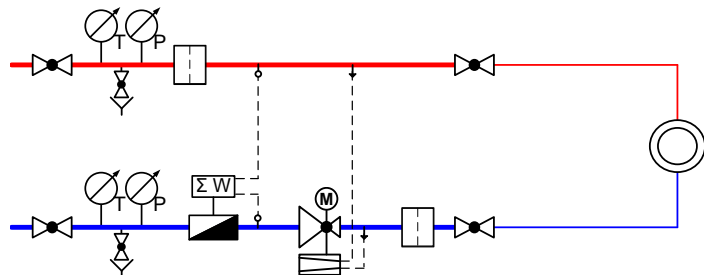


Fig. 8.6 Raccordement direct avec branchement à étranglement.

Raccordement direct à un groupe de chauffage par le biais d'un **branchement en injection** pour la régulation de température conformément à la Fig. 8.7 (p. ex. raccordement à un radiateur ou à un plancher chauffant).

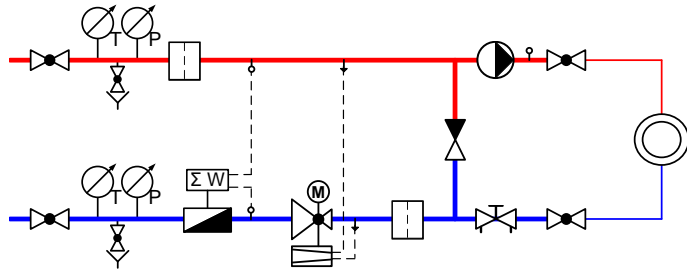


Fig. 8.7 Raccordement direct avec branchement à injection.

8.5.2 Raccordement indirect

Le raccordement à un réseau de chauffage à distance doit s'effectuer indirectement en cas de dénivélés géodésiques élevés et/ou en cas d'installation étendue, car la pression du réseau excède la pression maximale admissible dans l'installation domestique (p. ex. chauffage des bâtiments). Le circuit producteur est par conséquent séparé du point de vue hydraulique du circuit consommateur au moyen d'un échangeur de chaleur (circuit primaire et secondaire). Les circuits de chauffage disposent d'une régulation dépendante des conditions climatiques de la température d'amenée du circuit secondaire sur la vanne à passage du circuit primaire (vanne combi).

Le **raccordement indirect** au réseau de chauffage à distance s'effectue habituellement conformément à la Fig. 8.8 avec un branchement à étranglement. La température retour primaire est limitée si la température retour maximale admissible risque d'être dépassée avec une limitation de température retour.

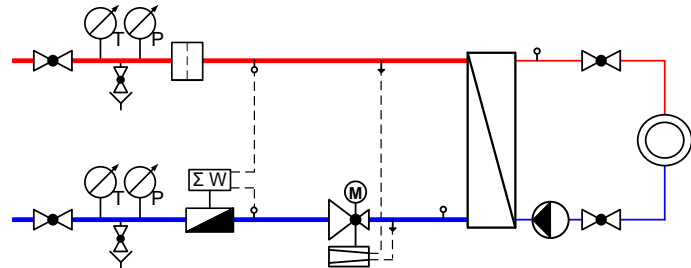


Fig. 8.8 Raccordement indirect avec branchement à étranglement.

Raccordement indirect avec un échangeur de chaleur du circuit primaire pour différents **groupes de chauffage** et **chauffe-eau** p. ex. La régulation du circuit secondaire s'effectue conformément aux explications du chapitre 8.4. Le chauffage de l'eau chaude est représenté de manière simplifiée, l'exécution doit s'effectuer selon les explications du prochain chapitre. La solution représentée dans la Fig. 8.9 n'est possible que si le raccordement du circuit secondaire de l'échangeur de chaleur s'effectue avec une faible pression différentielle et si les conditions-cadres suivantes sont remplies:

- L'autorité de la vanne $\geq 0,5$, c'est-à-dire la chute de pression sur la vanne à trois voies, est supérieure à la chute de pression sur la section à débit variable (correspondant à l'échangeur de chaleur et aux conduites de raccordement).
- La chute de pression maximale sur les sections partielles du circuit secondaire à débit variable correspond à $\leq 20\%$ de la hauteur de refoulement de la plus petite pompe de groupes, empêchant ainsi l'influence réciproque induite par une circulation erronée dans le cas de nombreux groupes de chauffage avec vanne à trois voies.

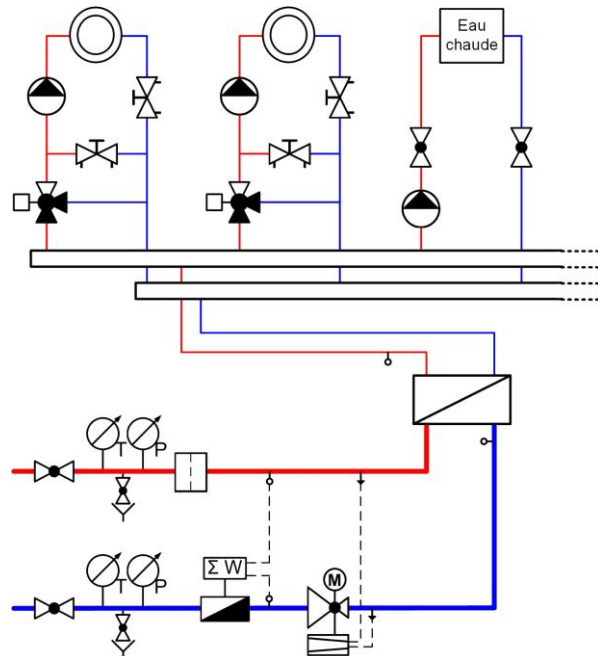


Fig. 8.9 Raccordement indirect avec branchement à étranglement pour circuit secondaire de plusieurs groupes de chauffage et chauffe-eau.

Raccordement indirect sur un accumulateur de chaleur décentralisé (Fig. 8.10) p. ex. pour plusieurs **groupes de chauffage** et **chauffe-eau** ou à **distribution secondaire ultérieure**. Des critères de mise en marche et de mise à l'arrêt pour le chargement de l'accumulateur de chaleur sont saisis sur la sonde de température en haut et en bas de l'accumulateur de chaleur. Le chauffage de l'eau chaude est représenté de manière simplifiée, l'exécution doit s'effectuer selon les explications du prochain chapitre.

Des raccordements avec une faible pression différentielle doivent être prévus sur le circuit secondaire. La régulation du circuit secondaire s'effectue conformément aux explications du chapitre 8.4. Ce raccordement est approprié p. ex. pour les consommateurs de chaleur présentant une importante charge de pointe. Attention: Il faut veiller à la pression nominale du réservoir en cas de raccordement direct de l'accumulateur de chaleur.

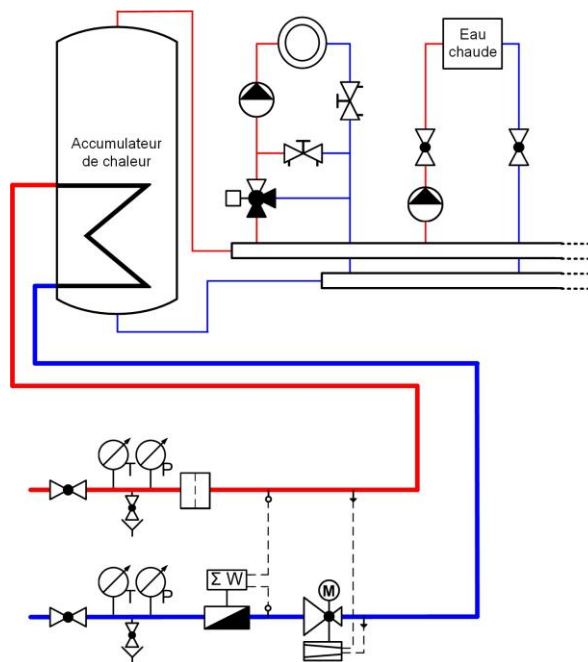


Fig. 8.10 Raccordement indirect sur un accumulateur de chaleur décentralisé pour plusieurs groupes de chauffage et chauffe-eau.

8.5.3 Chauffage de l'eau chaude

Les solutions standard suivantes abordent le chauffage de l'eau chaude. Les chauffe-eau doivent être principalement chargés sur un circuit prioritaire d'eau chaude (anciennement: dispositif d'enclenchement prioritaire). Le chargement peut aussi avoir lieu parallèlement. Le chargement parallèle du réservoir d'eau chaude est plus complexe du point de vue de la technique de régulation et plus coûteux. En outre la puissance de raccordement doit être déterminée en conséquence, mais elle possède des avantages en cas de besoins en eau chaude élevés (p. ex. hôpital ou maison de retraite).

Raccordement direct d'un réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur interne. La température retour maximale admissible doit être garantie par des mesures hydrauliques et techniques en matière de régulation adéquates. La saisie des critères de mise en marche et de mise à l'arrêt s'effectue sur la sonde de température dans le réservoir.

Avec la solution représentée dans la Fig. 8.11, le chargement du réservoir d'eau chaude est exécuté directement avec un échangeur de chaleur interne et à un débit constant.

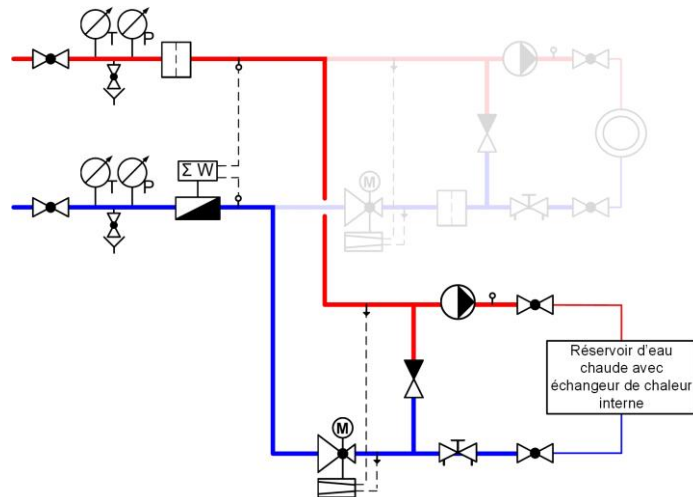


Fig. 8.11 Raccordement direct d'un réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur interne.

Raccordement d'un réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur externe. Produit une puissance de chauffage constamment élevée en cas de température d'eau chaude haute en continu et définit une température retour plus basse.

La même solution s'applique pour un **raccordement direct** à un **réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur interne**. La température retour maximale admissible doit être garantie par des mesures hydrauliques et techniques en matière de régulation adéquates.

La régulation du chargement du réservoir d'eau chaude s'effectue sur le circuit primaire avec un branchement en injection pour réguler la température à débit constant. La calcification dans l'échangeur de chaleur peut donc être évitée en cas de dureté supérieure de l'eau potable, en limitant la température de chargement primaire de l'échangeur de chaleur entre 65°C et 70°C.

La saisie des critères de mise en marche et de mise à l'arrêt s'effectue sur la sonde de température dans le chauffe-eau. Avec la solution représentée dans la Fig. 8.12, la régulation du chargement du circuit secondaire s'effectue à débit constant ou variable. En cas de débit variable, la pompe à variateur de fréquence démarre avec une rampe de démarrage définie et est réglée sur la température de sortie.

La pompe doit résister à la température et à la pression.

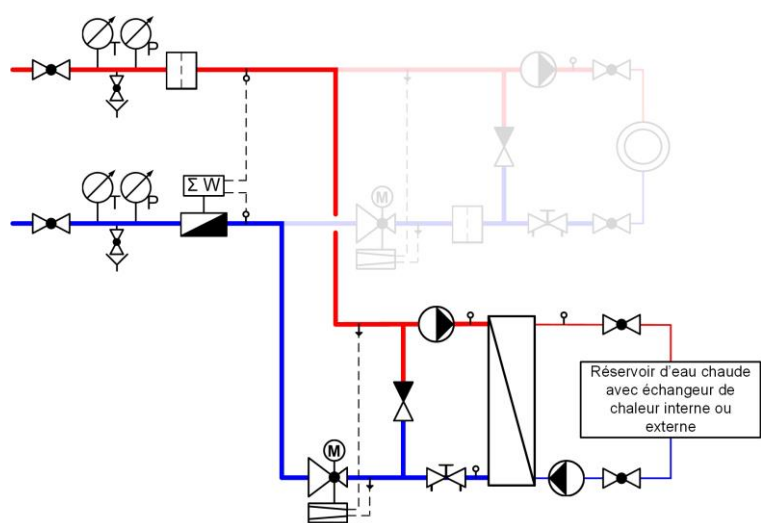


Fig. 8.12 Raccordement d'un réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur externe ou raccordement indirect d'un réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur interne.

Raccordement d'un réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur externe.

Produit une puissance de chauffage constamment élevée en cas de température d'eau chaude élevée en continu.

Avec le branchement en mélange représenté dans la Fig. 8.13 sur le circuit secondaire, le chargement du réservoir d'eau chaude s'effectue à débit constant. La température d'amenée sur le circuit secondaire peut donc être régulée sur le chauffe-eau, en évitant une température d'amenée trop basse au démarrage de la charge stockée du ballon. En cas de dureté supérieure de l'eau potable, un surchauffage dans l'échangeur de chaleur peut être évité à l'arrêt de la charge stockée du ballon, en refroidissant l'échangeur de chaleur pendant un certain dépassement de temps (p. ex. 5 min.).

La pompe doit résister à la température et à la pression.

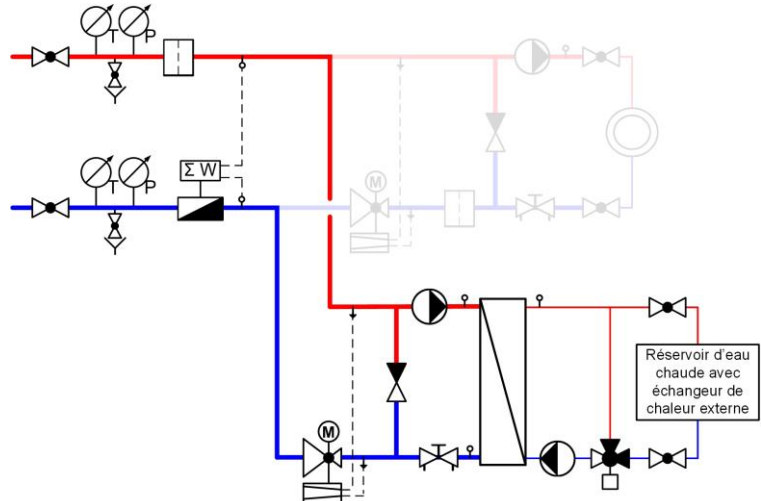


Fig. 8.13 Raccordement d'un réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur externe et branchement en mélange sur le circuit secondaire.

Des températures retour basses sont essentielles à une exploitation rentable des réseaux de chauffage à distance. Il faut surtout veiller à l'intégration hydraulique du consommateur de chaleur et particulièrement au chauffage de l'eau chaude si un potentiel d'optimisation existe. Par exemple, la température retour peut être encore abaissée au moyen du **préchauffage de l'eau froide** par un échangeur de chaleur supplémentaire (préchauffeur) ou un réservoir supplémentaire sur le circuit sanitaire.

Le principe de préchauffage de l'eau froide avec un échangeur de chaleur supplémentaire peut être utilisé pour toutes les variantes de production d'eau chaude (voir chapitre 8.2). La Fig. 8.14 illustre une variante de préchauffage de l'eau froide pour un réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur externe. La pompe doit résister à la température et à la pression.

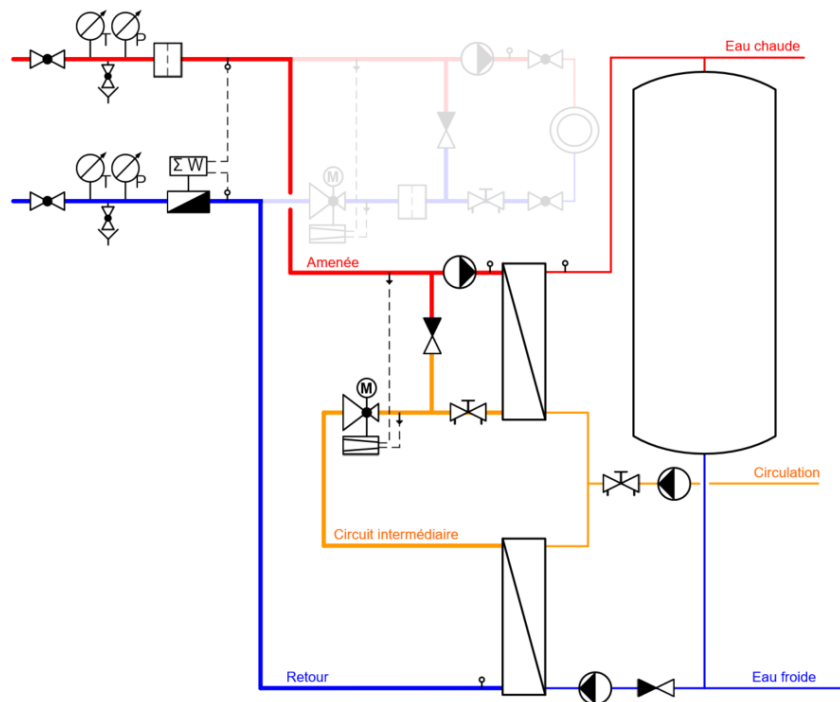


Fig. 8.14 Raccordement d'un réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur externe et préchauffage de l'eau froide par un échangeur de chaleur supplémentaire.

Les réservoirs d'eau chaude avec échangeur de chaleur interne montés en série offrent une autre variante de préchauffage avec échangeur de chaleur interne, où le premier réservoir d'eau chaude (à droite) sert au préchauffage et le réservoir d'eau chaude monté en aval (à gauche) est réchauffé à la température requise pour éviter les légionelles (Fig. 8.15).

La température de l'eau dans un réservoir de préchauffage ne dépasse pas 45°C en règle générale, constituant des conditions idéales pour la prolifération des légionelles. C'est pourquoi l'eau chaude dans le surchauffeur doit être chauffée une heure par jour à plus de 60°C.

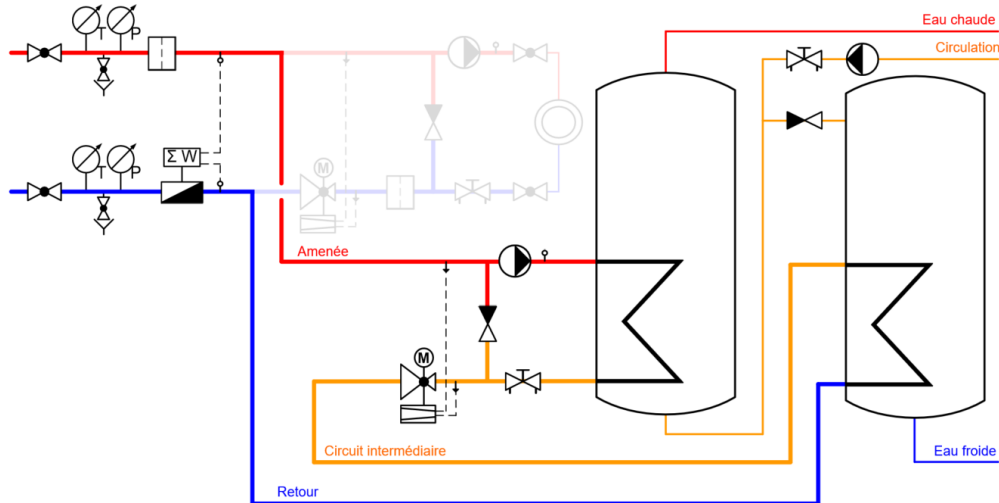


Fig. 8.15 Raccordement de deux réservoirs d'eau chaude branchés en série avec échangeur de chaleur interne.

8.5.4 Pompe à jet

Le raccordement avec **pompe à jet** constitue une autre possibilité de raccordement. Cette solution s'utilise de manière analogue à celles décrites plus haut comme le raccordement direct (Fig. 8.16) ou le raccordement indirect (Fig. 8.17).

La pompe à jet permet une régulation de la température à débit variable. La pompe à jet prend en charge le fonctionnement de la régulation du débit volumique et de la pression différentielle du réseau, où généralement la vanne combi n'est pas utilisée.

A titre de comparaison:

Le branchement à étranglement dans la Fig. 8.6 entraîne une régulation de débit variable, alors que le branchement en injection dans la Fig. 8.7 provoque une régulation de température à débit constant.

En raison du débit variable il faut être prudent dans le cas de réseaux de chauffage mal ajustés (risque de «destruction» de pièces d'installation en cas de faible charge).

Afin de réduire la calcification de l'échangeur de chaleur en cas de dureté supérieure de l'eau potable, la température de chargement primaire de l'échangeur de chaleur peut être limitée, sans avoir besoin d'une pompe de circulation ni d'une vanne anti-retour (par rapport au branchement en injection).

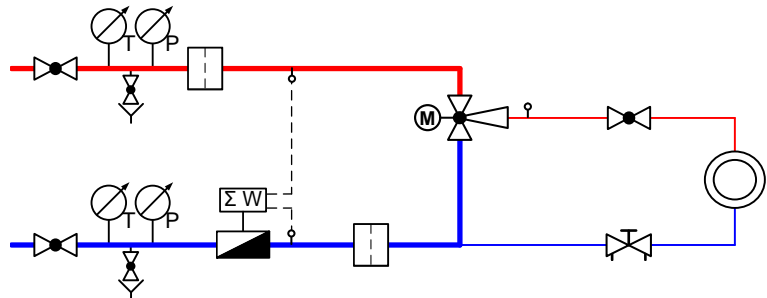


Fig. 8.16 Raccordement direct avec pompe à jet.

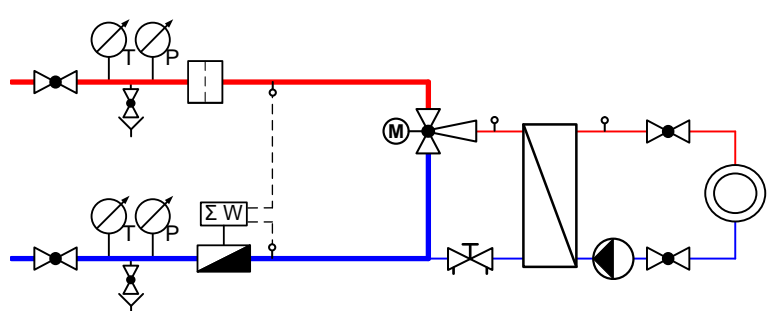


Fig. 8.17 Raccordement indirect avec pompe à jet.

8.6 Exigence de transfert de chaleur

Les exigences suivantes concernent la technique du bâtiment, le système de chauffage, le dispositif de ventilation, le chauffage de l'eau chaude et la technique de régulation, donc principalement le circuit secondaire détenu par le consommateur de chaleur (installation domestique). Du point de vue du fournisseur d'énergie un grand intérêt réside néanmoins dans la situation technique du circuit secondaire du consommateur de chaleur. La chaleur fournie doit être utilisée le plus efficacement possible et les températures retour primaires doivent rester idéalement basses. Du point de vue juridique, il n'existe cependant aucune obligation d'action du fournisseur d'énergie sur la technique du bâtiment du consommateur de chaleur, sauf si cela a été convenu dans le contrat (p. ex. dans le contrat de fourniture de chaleur).

Les recommandations suivantes s'adressent principalement aux fournisseurs d'énergie. Elles mettent en exergue les éléments à prendre en compte en priorité concernant les consommateurs de chaleur potentiels, les recommandations à donner aux clients raccordés et éventuellement les sujets devant faire l'objet d'un accord contractuel.

Les recommandations détaillées ici ne traitent pas de la chaleur industrielle. Les recommandations relatives à la chaleur industrielle ne diffèrent cependant pas de celles présentées ici.

8.6.1 Technique du bâtiment

- Pour une température retour (primaire) la plus basse possible, aucun court-circuit hydraulique entre amenée et retour ne doit survenir sur les circuits primaire et secondaire, c'est pourquoi les dispositifs suivants ne sont pas autorisés:
 - réservoirs d'expansion ouverts,
 - distributeur double (système de tubes à double paroi, carré),
 - by-pass (sur distributeur, chez les consommateurs, etc.),
 - soupapes et vannes de décharge entre amenée et retour,
 - branchements en injection avec vannes à trois voies,
 - conduites de dérivation avec vannes à trois voies,
 - vanne mélangeuse à quatre voies.
- Les raccordements nouveaux ou à construire doivent être conçus afin de pouvoir dans la mesure du possible être isolés sans interruption (retirer suffisamment les robinets à tournant sphérique avec rallonges de tige, indications de température et de pression, ainsi que robinets de remplissage et de vidange).
- Supprimer ou éviter des by-pass non régulés et des séparateurs hydrauliques entre conduites d'amenée

et de retour (p. ex. maintenir la chaleur au niveau de la conduite d'approvisionnement pour des dispositifs de ventilation).

- Dans le circuit primaire, les by-pass ou les vannes de volume de décharge ne sont admissibles que pour assurer un débit minimal à la fin de la ligne (p. ex. prévention des «doigts froids») si aucune autre solution n'est possible et s'il est possible de garantir un débit minimal.
- Afin d'éviter une montée de la température retour en cas de circulation erronée ou lorsque le débit du circuit primaire est supérieur au débit du circuit secondaire (p. ex. erreur dans la vanne à passage), des vannes anti-retour dans les by-pass sont utilisées en cas de branchements en injection sur le circuit primaire. Il faut tenir compte des inconvénients d'une vanne anti-retour dans le cadre de la conception de la solution et si possible éviter une circulation erronée:
 - Découplage hydraulique unilatéral
 - Des pressions sont ajoutées lors d'une circulation erronée.
 - Le groupe devient chaud en dépit de la pompe placée, lorsque la vanne à passage est ouverte involontairement.
- Equilibrage hydraulique des systèmes de surfaces chauffantes et de circulation d'eau chaude sanitaire pour assurer des débits volumiques corrects.
- Installation de limiteurs de température retour (dans le circuit primaire) en cas de raccordements domestiques indirects et directs.
- Dans le cas de réseaux ramifiés avec plusieurs distributeurs (circuit secondaire) il est judicieux d'employer avant chaque distributeur une vanne de régulation indépendante de la pression différentielle pour la régulation du débit volumique et de la pression différentielle du réseau (vanne combi). La régulation du débit volumique et de la pression différentielle du réseau peut s'effectuer alternativement sur une vanne à passage séparée et un régulateur de pression différentielle. En combinaison avec une pompe principale à variateur de fréquence, on s'assure que chaque distributeur est suffisamment approvisionné.
- Les pompes existantes doivent être remplacées le cas échéant (p. ex. en cas de défaut) par des pompes à vitesse variable. Par ailleurs, il faut vérifier le dimensionnement, car les pompes existantes sont souvent surdimensionnées.

8.6.2 Système de chauffage

- Utilisation des systèmes de chauffage par surfaces avec des surfaces de transfert de chaleur de taille adéquate (p. ex. chauffage au sol et mural).
- Exploitation des écarts de température entre amenée et retour et réduction des débits volumiques.
- Toutes les surfaces chauffantes doivent être équipées de vannes thermostatiques à effet automatique composées d'actionneur et d'appareil de commande pour la régulation de la température ambiante. Il faut prévoir des vannes thermostatiques avec possibilité de préréglage.

- Si aucune vanne thermostatique n'est utilisée (p. ex. ancien bâtiment), il convient de discuter des alternatives appropriées avec le consommateur de chaleur ou de négocier une stratégie d'optimisation en cas de besoin.
- Utilisation de températures retour élevées issues de circuits de chauffage (p. ex. ventilation, surfaces chauffantes statiques, etc.) pour approvisionner d'autres consommateurs (p. ex. chauffage au sol ou mural).
- Utilisation de distributeurs de circuits de chauffage avec séparation thermique entre amenée et retour pour éviter un échange de chaleur non régulé.
- Afin de garantir un fonctionnement correct du dispositif de régulation de la température, un **équilibre hydraulique** doit obligatoirement être effectué.

8.6.3 Dispositif de ventilation

- Des dispositifs de ventilation (individuels ou en situation exceptionnelle groupés) avec dispositifs de régulation doivent être prévus. La température ambiante, la température de ventilation et celle de l'air extrait peuvent servir de variable de contrôle. Des vannes à passage doivent être utilisées comme vannes de réglage pour le raccordement direct. Des vannes à passage tout comme des vannes à trois voies peuvent être employées pour le raccordement indirect.
- Il faut prévoir des dispositifs de ventilation supplémentaires à air extérieur avec une commutation antigel et éventuellement un circuit de démarrage.

8.6.4 Chauffage de l'eau chaude et circulation

- Des réservoirs d'eau chaude purs avec échangeur de chaleur interne sont évités. Sinon il faut prévoir une limitation de température retour ou une régulation pour éviter un réchauffement.
- Un chauffage de l'eau chaude avec eau dure (≥ 15 °fH; moyennement dure) est possible. Pour éviter la calcification des échangeurs de chaleur, il faut raccorder ceux-ci avec un mélange au circuit de retour (de manière analogue aux Fig. 8.11 ou Fig. 8.12). Si l'eau est douce ou si la température d'amenée de chauffage à distance reste inférieure à 70°C, le raccordement peut s'effectuer comme sur la Fig. 8.8 (branchement à étranglement), c'est-à-dire suppression de la pompe et de la vanne anti-retour.
- Aucun dépassement des températures d'eau chaude prescrites pour éviter une défaillance due au calcaire et au sel dans les conduites, la robinetterie et des échangeurs de chaleur.
- En cas d'eau dure (≥ 15 °fH; moyennement dure) il faut en plus prévoir pour des échangeurs de chaleur de grande taille (> 200 kW) des organes d'arrêt et des raccords de rinçage pour le nettoyage de l'échangeur de chaleur. Pour un échangeur de chaleur et notamment un échangeur de chaleur à plaques < 200 kW, il faut veiller à un remplacement à court

terme ou à la disponibilité du stock (stockage chez l'exploitant).

- Pour l'échangeur de chaleur, des raccordements pour eau froide et température retour doivent être intégrés pour un refroidissement rapide.
- Réduction de rejets de chaleur inutiles pour des système de circulation de l'eau chaude en isolant les conduites.
- Optimiser la position de sonde de température pour un dimensionnement suffisant du réservoir d'eau chaude, le déplacer vers le haut. Pour des réservoirs d'eau chaude de grande taille (≥ 500 litres), ajouter une deuxième sonde de température.
- Les sondes de température doivent être installées en cas de réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur interne au-dessus de la batterie.
- Ne pas intégrer la circulation dans la zone chaude ou à proximité de la sonde de température.
- Si de nombreux réservoirs d'eau chaude sont raccordés, il faut opter pour un montage en série du montage en parallèle. En cas de fonctionnement à faible charge (p. ex. saison intermédiaire) le fonctionnement d'un réservoir individuel doit être possible. Ainsi les pertes de maintien sont réduites et les conditions d'hygiène améliorées.

8.6.5 Technique de régulation

- Utilisation d'organes de réglage hermétiques et d'une commande correcte du point de vue de la technique de régulation pour éviter une convection incontrôlée.
- Des vibrations dans des circuits de régulation montés les uns derrière les autres (p. ex. régulation / régulation installation du client) sont évitées grâce à un temps de réaction plus rapide et un fonctionnement du circuit de régulation suivant.
- La conception hydraulique et technique en matière de régulation doit donc suivre les règles de la technique. Les exigences conformes au chapitre 8.4 doivent notamment être observées:
 - autorité de la vanne vannes à trois voies $\geq 0,5$,
 - autorité de la vanne vannes à passage $\geq 0,3$.
 - Les solutions doivent être conçues afin que la température retour maximale admissible puisse être respectée dans chaque cas d'utilisation, conformément aux prescriptions techniques de raccordement.

9 Rentabilité

Afin d'évaluer la rentabilité des projets de chauffage à distance, il faut déterminer les coûts de revient de la chaleur spécifiques en ct/kWh, se composant des coûts de la chaleur à partir de la centrale thermique et les coûts de distribution de chaleur. De plus, les coûts de revient de la chaleur des générateurs de chaleur décentralisés en question dans la zone d'approvisionnement sont intéressants comme base de comparaison.

Etant donné qu'il s'agit, dans la construction d'installations de chauffage et de réseaux de chauffage à distance, d'investissements à long terme, l'évolution temporelle doit être considérée comme fondement pour une décision d'investissement. Pour ce faire, une observation d'année en année est en général de mise, sur une période de 20 ans par exemple. Durant cette période, une évaluation des risques en cas d'écarts est aussi intéressante par rapport à l'évolution planifiée. Les principaux risques sont: l'installation finale prévue n'est pas finalisée, un besoin de chaleur réduit à cause de la rénovation des bâtiments ou de changement des conditions économiques, ainsi que des variations au niveau des prix énergétiques, du montant des investissements et du taux d'intérêt du capital.

La considération de la dimension temporelle est certes indispensable pour décider d'investir, mais une première évaluation s'effectue souvent par le biais de la rentabilité en état stationnaire. Tant que cette évaluation est peu attrayante, une poursuite du projet sous la forme prévue n'est la plupart du temps pas nécessaire. Au préalable une comparaison des variantes est éventuellement possible sur la base de la situation stationnaire, en éliminant par exemple des consommateurs de chaleur inintéressants ou des réseaux partiels. Différentes méthodes relatives à l'étude de rentabilité sont utilisées au cours du projet en fonction des questions et des moments. Elles sont décrites dans le chapitre suivant. Avant la mise en œuvre d'une étude de rentabilité, il faut déterminer les responsabilités, comme cela est expliqué dans le préambule.

9.1 Responsabilités

La responsabilité de l'évaluation de la rentabilité incombe fondamentalement au responsable du projet. Le maître d'ouvrage peut réaliser l'étude de rentabilité ou mandater le planificateur ou un tiers.

Dans tous les cas, le planificateur a pour mission de mettre à disposition les données techniques requises pour l'étude de rentabilité et de conseiller le maître d'ouvrage. Les principales hypothèses économiques suivantes relatives à l'étude de rentabilité doivent néanmoins être formulées par le maître d'ouvrage:

- Taux d'intérêt du capital théorique (également taux de rendement minimal),
- Période d'observation théorique ou périodes d'observation, à condition par exemple de choisir des périodes d'observation plus longues pour les

bâtiments et le réseau de chauffage à distance que pour les chaudières,

- Taux d'inflation (hausse des prix),
- Augmentation des coûts d'exploitation,
- Prix énergétiques en début de projet, également le prix de l'électricité et selon le générateur de chaleur les prix de la ou les sources d'énergie principales et des sources d'énergie complémentaires,
- Augmentations des prix énergétiques,
- Frais de personnel (ou pour simplifier un pourcentage de l'investissement par exemple).

Il est recommandé de convenir par écrit de ces hypothèses de base. L'entreprise de planification met à disposition les données techniques suivantes:

- Besoin de puissance et de chaleur du consommateur de chaleur prévu,
- Coûts d'investissement en fonction des composants principaux,
- Coûts liés à la consommation, dans le cas d'un combustible, notamment la teneur en énergie de ce combustible et les frais de combustible,
- Consommation d'énergie auxiliaire et coûts en résultant,
- Coûts de maintenance et de remise en état.

Les facteurs de coûts détaillés sont décrits dans le chapitre suivant 9.2. Les responsabilités entre le maître d'ouvrage et la planification sont en général réparties comme suit:

Le maître d'ouvrage a pour missions de:

- Décider des consommateurs de chaleur potentiels à prendre en compte,
- Décider de la date de raccordement visée (influence la date des coûts d'investissement supplémentaires et des recettes escomptées issues de la vente de chaleur).

Le planificateur, quant à lui, est chargé de:

- Déterminer les appels de puissance thermique y compris la courbe de charge et les besoins annuels en chaleur prévus des consommateurs de chaleur potentiels,
- Déterminer les coûts d'investissement pour le raccordement des consommateurs de chaleur potentiels.

9.2 Structure des coûts

Lors de la détermination des coûts des installations de technique du bâtiment, la directive VDI 2067 [117] différencie les quatre groupes de coûts suivants:

- Coûts liés au capital y compris remise en état et renouvellement,
- Coûts liés à la consommation,
- Coûts liés à l'exploitation,
- Frais divers.

Dans le Tableau 9.1, les coûts sont répartis en quatre groupes. Les charges par nature sont estimées pour l'étude de rentabilité en se basant sur les valeurs de

référence, par exemple un pourcentage du montant de l'investissement ou de la chaleur produite. Il faut définir les charges par nature à attribuer à chaque groupe de coûts. Selon la directive VDI 2067, la «maintenance» regroupe l'ensemble des mesures de préservation et de remise en état de l'état souhaité, comprenant les trois charges par nature: «remise en état», «maintenance» et «inspection», définies comme suit:

1. La remise en état regroupe des mesures de remise en état de l'état souhaité.
2. La maintenance rassemble des mesures de préservation de l'état souhaité.
3. L'inspection réunit des mesures de détermination et d'évaluation de l'état réel.

Le Tableau 9.3 décrit les charges par nature et montre les données de base à utiliser pour les calculer. Dans certains cas, des valeurs indicatives sont aussi spécifiées, servant d'orientation pour les générateurs de chaleur avec chauffages au bois automatiques. Il faut tenir compte du fait que les coûts spécifiques dépendent du combustible et de la technique sélectionnée. Ils sont par ailleurs influencés par la taille de l'installation et le nombre d'heures d'exploitation à pleine charge.

Le Tableau 9.3 décrit les valeurs indicatives pour la durée d'utilisation et les coûts de remise en état conformément à la directive VDI 2067. La période d'observation à adopter pour l'étude de rentabilité doit être déterminée avec le maître d'ouvrage et le cas échéant avec les bailleurs de fonds.

Tableau 9.1 Groupes de coûts et charges par nature selon VDI 2067 [117].

Coûts liés au capital	Coûts liés à la consommation	Coûts liés à l'exploitation	Frais divers
Charges financières des composants de l'installation et des bâtiments	Coûts de combustible	Coûts d'utilisation, de nettoyage, de maintenance et d'inspection	Assurances
Coûts de remise en état	Coûts de l'énergie auxiliaire	Location ou bail	Impôts
	Coûts des combustibles	Ramoneurs	Frais administratifs
	Coûts d'élimination	Mesure d'émission	Taxes générales
	Redevances de concession		

Tableau 9.2 Charges par nature et données de base à utiliser pour le calcul des coûts annuels ainsi que des valeurs indicatives. Les valeurs indicatives s'appliquent par exemple pour les générateurs de chaleur avec chauffages au bois automatiques. Les coûts de maintenance sont compris dans les frais de personnel, en dérogation à la directive VDI 2067 [21].

Charges par nature	Base pour la détermination des coûts annuels	Valeurs indicatives pour les chauffages à bois automatiques
Charges financières des composants de l'installation et des bâtiments (investissement)	Montant de l'investissement des corps de métier, taux d'intérêt du capital théorique, période d'observation théorique	Durée d'utilisation: Tableau 9.3 Taux d'intérêt du capital selon la situation de chaque pays et prescriptions du maître d'ouvrage ou du bailleur
Coûts de remise en état (réparations conformément à la directive VDI 2067)	Montant de l'investissement des corps de métier, pourcentage du montant de l'investissement	
Coûts de combustible	Consommation de combustible, pouvoir calorifique et prix du combustible	Prix effectifs basés sur les offres
Energie auxiliaire (électricité) pour production de chaleur et distribution de chaleur	Pourcentage de la quantité de chaleur (produite ou distribuée) et prix de l'électricité	Pour production de chaleur: 1% à 1.5% par an de chaleur produite, pour le réseau de chauffage: 0.5% à 1% par an de la chaleur distribuée
Combustibles production de chaleur	Prix, volume de consommation	Coûts effectifs à estimer
Frais de personnel sans l'administration (utilisation, nettoyage, maintenance et inspection)	Frais de personnel effectifs ou en simplifiant pourcentage des coûts d'investissement pour la production de chaleur	1.5% par an des coûts d'investissement de la production de chaleur, mais dépendant du combustible (p. ex. supérieurs pour le vieux bois)
Elimination des cendres	Utilisation de combustible, teneur en cendres, méthode d'élimination	Coûts effectifs à estimer
Redevances de concession, loyer, bail, ramoneurs, mesure d'émission	En fonction des cas particuliers	Coûts effectifs à estimer
Frais divers	Pourcentage du montant d'investissement	0.5% à 1.5% par an de l'investissement total

Tableau 9.3 Valeurs indicatives pour la durée d'utilisation et les coûts de remise en état conformément à la directive VDI 2067. La période d'observation à adopter pour l'étude de rentabilité doit être déterminée avec le maître d'ouvrage et éventuellement avec les bailleurs de fonds. *La durée d'utilisation moyenne pour la planification doit être pondérée avec les coûts de planification pour chaque corps de métier.

Corps de métier	Durée d'utilisation Années	Coûts de remise en état spécifiques % des coûts d'investissement par an
Parties de l'installation pour la production de chaleur (régulation et gestion comprises)	20	2 – 3
Hydraulique	20	2
Installation électrique et du bâtiment	20	2
Composants de l'installation et aménagement	50	1
Réseau de distribution de chaleur (conduites et terrassement compris)	40	1
Stations de transfert de chaleur	30	2
Véhicules	15	3
Planification	moyen*	0

9.3 Calculs des coûts de revient de la chaleur

Pour l'analyse des systèmes énergétiques qui indiquent généralement une durée d'utilisation longue et pour lesquels des modifications futures sont importantes telles que la hausse des prix, des méthodes de calculs dynamiques s'avèrent pertinentes pour l'étude de rentabilité. Les modifications attendues dans la période d'observation sont estimées ou définies à l'aide de valeurs moyennes statistiques, afin de prévoir les coûts annuels pour l'ensemble de la durée d'utilisation de l'installation.

Les méthodes statiques en revanche considèrent uniquement les rapports au moment de la réalisation de l'installation. Sur des périodes supérieures à 15 ans, des écarts nets peuvent survenir par rapport aux méthodes dynamiques. Il est très souvent possible de se baser sur des hypothèses simplifiées concernant les méthodes dynamiques, afin que des formules simplifiées puissent être utilisées pour le calcul de la rentabilité et que la durée de calcul ne soit pas fondamentalement supérieure aux méthodes statiques.

Les principales méthodes de calculs dynamiques sont:

- la méthode de la valeur actuelle nette,
- la méthode des annuités,
- la méthode du taux d'intérêt interne.

Concernant les coûts de revient de la chaleur, la **méthode des annuités** est la plus courante. Elle est détaillée dans la directive VDI 2067 [117]. La méthode des annuités permet de déterminer les coûts annuels moyens sur la période d'observation. Cette méthode ne suffit généralement pas pour évaluer la rentabilité de l'exploitation d'une installation. Les documents du programme d'impulsion RAVEL [60] et [61] offrent des principes de base et des recommandations utiles supplémentaires concernant l'utilisation de la méthode des annuités.

La directive VDI 2067 décrit une méthode de calcul utilisable lorsque différents taux d'inflation sont à prendre en compte pour les coûts de combustible et les coûts de

maintenance et de remise en état. A des fins de simplification, une hausse de prix annuelle unique e est adoptée ci-après. Dans de nombreux cas les simplifications suivantes sont possibles à l'égard de la méthode détaillée dans la directive VDI 2067:

- Les investissements concernent uniquement le début de la période d'observation,
- Correspondant à la durée de vie des investissements. Cela signifie qu'aucun remplacement n'est nécessaire dans la période d'observation et qu'aucune valeur résiduelle ne persiste à la fin de la période d'observation.

Compte tenu de ces simplifications, les **coûts annuels K** sont calculés comme suit:

$$K = I a + A d a$$

- I Coûts d'investissement du projet examiné
- A Coûts d'exploitation des investissements (coûts de combustible, coûts de maintenance et de remise en état par rapport aux prix actuels)
- a Facteur d'annuité: Le facteur d'annuité se calcule à partir du taux d'intérêt calculé i et de la période de calcul théorique n .
- $$\text{pour } i = 0: a = \frac{1}{n} \quad \text{pour } i > 0: a = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$
- d Facteur de valeur actuelle (VDI 2067 [117]) ou facteur de somme du taux d'actualisation (RAVEL [61]). Il se calcule à partir du taux d'intérêt calculé i , de la hausse de prix e et de la période d'observation théorique n . Calcul selon la directive VDI 2067 ou les tableaux correspondants.
- d · a Facteur d'annuité dynamique (VDI 2067) ou facteur de pondération (RAVEL).

Des valeurs indicatives pour la durée d'utilisation et les coûts de remise en état se trouvent dans le Tableau 9.3. La période d'observation théorique peut être déterminée sur la base de la durée d'utilisation ou être spécifiée par le maître d'ouvrage, un créancier ou une source financière éventuelle. Si la période d'observation diffère

de la durée d'utilisation, il convient d'observer les points suivants, comme la directive VDI 2067 le précise:

- Pour des investissements de remplacement éventuels durant la période d'observation, leur valeur actualisée doit être majorée de l'investissement initial I.
- Si la fin de la durée d'utilisation n'est pas encore atteinte à la fin de la période d'observation, la valeur actualisée de la valeur indicative se déduit de l'investissement I.

La méthode des annuités fournit les coûts annuels attendus. Les **coûts de revient de la chaleur k** résultent de la chaleur utile fournie au consommateur de chaleur Q_{Nutz} :

$$k = \frac{K}{Q_{Nutz}} = \frac{I a + A d a}{Q_{Nutz}}$$

En pratique la méthode des annuités est souvent utilisée de manière simplifiée sans tenir compte de la hausse des prix (inflation) et comme taux d'intérêt calculé par exemple du taux d'intérêt actuel des prêts bancaires. Avec cette simplification, la méthode des annuités devient une considération statique relativement imprécise qui ne prend pas en compte l'évolution future. Des erreurs considérables peuvent être produites si l'on compare deux systèmes de chauffage, lorsqu'ils indiquent différentes structures des coûts. Dans le cadre d'un examen préliminaire, une comparaison de systèmes avec taux d'intérêt actuel et sans hausse de prix est généralement suffisamment pertinente, si les variantes comparées présentent de manière similaire une part élevée de charges par nature liées au capital et une hausse des prix comparable pour les charges par nature liées à la consommation et à l'exploitation.

Si l'on considère uniquement les **coûts de revient de la chaleur pour le réseau de distribution de chaleur** (sans production de chaleur), par exemple comme comparaison de variantes des différentes structures de réseau, il est possible d'utiliser les corrélations suivantes. Les coûts sont déterminés grâce à la méthode des annuités et se composent des éléments suivants:

1. Charges financières
2. Coûts d'exploitation:
 - Coûts pour l'énergie auxiliaire, notamment les coûts de l'électricité pour les pompes de réseau entre autres,
 - Coûts de combustible pour couvrir les rejets de chaleur du réseau,
 - Coûts de maintenance et d'entretien.

Etant donné que les coûts indiqués ici couvrent exclusivement la distribution de chaleur, les coûts de maintenance et d'entretien sont faibles par rapport aux autres parts de coûts et sont ignorés dans les calculs. Les **coûts de distribution de chaleur spécifiques** résultent donc des coûts de capital et d'exploitation spécifiques:

$$k_{wv} = k_K + k_{Be}$$

Les **charges financières spécifiques k_K** résultent des charges financières annuelles K_K se rapportant à la chaleur fournie au consommateur de chaleur (chaleur utile):

$$k_K = \frac{K_K}{Q_{Nutz}} = \frac{\sum k_{Ti} L_{Ti} a}{Q_{Nutz}}$$

Les charges financières annuelles K_K pour le réseau de distribution de chaleur résultent de la somme des coûts d'investissement spécifiques pour toutes les lignes partielles multipliée par leur longueur de tracé et le facteur d'annuité. Les coûts d'investissement se composent des frais de matériel, de pose, de travaux de fouille et de restauration des surfaces. Concernant les coûts d'investissement spécifiques par mètre de tracé, les prix indicatifs par exemple dans le Tableau 13.8 peuvent être utilisés pour différents types de conduites. Une ligne partielle est définie comme une section du tracé avec un diamètre nominal constant de la conduite amenée et retour d'un nœud à l'autre. Un nœud est défini comme une dérivation de la ligne (raccordement domestique, jonction de réseau, etc.) ou une modification du diamètre nominal (élargissement, rétrécissement).

$$K_K = \sum k_{Ti} L_{Ti} a$$

Les **coûts d'exploitation spécifiques k_{Be}** se composent des coûts de pompage spécifiques, des coûts de rejets de chaleur et des coûts d'entretien et de maintenance:

$$k_{Be} = k_P + k_V + k_U$$

Les coûts de pompage spécifiques k_P résultent des coûts de pompage annuels K_P se rapportant à la chaleur fournie au consommateur de chaleur (chaleur utile):

$$k_P = \frac{K_P}{Q_{Nutz}} = \frac{E_P P_S}{Q_{Nutz}}$$

Les coûts de pompage annuels K_P sont calculés à partir des besoins énergétiques des pompes de réseau (chapitre 7.4.5) et du prix de l'électricité:

$$K_P = E_P P_S = P_P \tau_{WA} P_S$$

Les coûts de pompage spécifiques k_P résultent des coûts de pompage annuels K_P se rapportant à la chaleur fournie au consommateur de chaleur (chaleur utile):

$$k_V = \frac{K_V}{Q_{Nutz}} = \frac{Q_{V-a} k_{Br}}{Q_{Nutz}}$$

Les coûts de rejets de chaleur annuels K_V couvrent la charge supplémentaire en combustible afin de couvrir les rejets de chaleur dans le réseau. Les coûts de rejets de chaleur sont calculés à partir des rejets de chaleur annuels (chapitre 7.1.4) et des coûts de combustible spécifiques:

$$K_V = Q_{V-a} k_{Br}$$

Les coûts de combustible spécifiques en Ct/kWh sont calculés à partir du prix du combustible et du taux d'utilisation annuel du générateur de chaleur:

$$k_{Br} = \frac{P_{Br}}{\eta_a}$$

9.4 Comparaison de variantes

Pour comparer des variantes, les coûts de revient de la chaleur susmentionnés peuvent être déterminés, afin de comparer les différents systèmes de chauffage sur une durée plus longue. On peut supposer que le taux d'inflation et le taux d'intérêt du capital se comportent approximativement de manière parallèle et donc en cas de renchérissement constant les taux d'intérêt restent également constants. Cette hypothèse permet de calculer simplement avec le taux d'intérêt réel. Le taux réel correspond à l'intérêt dépassant le renchérissement général et s'obtient approximativement comme différence entre le taux d'intérêt du capital ou le taux d'intérêt nominal et le taux de renchérissement. Exemple: En cas d'intérêt nominal (taux d'intérêt du capital) de 5% par an et un renchérissement général de 3% par an, l'intérêt réel s'élève à 2% par an. Dans l'étude de rentabilité, le taux d'intérêt et le taux d'inflation ne doivent pas être déterminés de manière indépendante, car ils sont étroitement liés l'un à l'autre. Il faut par conséquent faire la différence entre **approche nominale** et **réelle**.

En cas d'**approche nominale** (VDI 2067) le renchérissement est considéré durant les dernières années pour la détermination des coûts et des bénéfices. Dans ce cas, l'intérêt à payer effectivement doit être utilisé comme taux d'intérêt calculé pour les prêts bancaires.

Dans le cas de l'**approche réelle**, le calcul s'effectue avec des prix actuels sur la période d'observation totale. Dans ce cas, l'intérêt réel (différence entre taux d'intérêt et taux de renchérissement) doit être utilisé comme taux d'intérêt calculé. Il faut prendre en compte que, même si la relation entre les coûts est représentée de manière correcte, les coûts de revient de la chaleur déterminés ne correspondent néanmoins pas aux réels. Pour des calculs simples, on suppose pour l'approche réelle que le remplacement des installations s'effectue à l'échéance de la durée d'utilisation aux mêmes prix réels qu'initialement. Il faut tenir compte du fait que les durées d'utilisation peuvent considérablement différer des variantes. La période d'observation doit donc correspondre à la durée d'utilisation moyenne la plus longue des différentes variantes. D'autres recommandations se trouvent dans la documentation RAVEL [61].

Si l'on considère les règles ci-dessus, l'approche réelle et nominale entraîne des résultats qualitatifs identiques. Si l'on prend en compte le renchérissement lors de la comparaison des coûts de revient de la chaleur des différents systèmes de chauffage, le taux d'intérêt réel doit être utilisé comme taux d'intérêt calculé.

Afin de tenir compte des aspects écologiques lors de la comparaison des systèmes énergétiques, les coûts

externes peuvent être considérés comme majorations des prix énergétiques théoriques pour les dommages écologiques. Le Tableau 9.4 montre les majorations des prix énergétiques proposés par la Confédération en Suisse au cours de l'année de référence 1997. Une partie des coûts externes est dans l'intervalle couverte par la taxe sur le CO₂ sur les combustibles fossiles. La taxe sur le CO₂ à partir du 1.1.2016 en Suisse s'élève à Fr. 84.– par tonne de CO₂ fossile. Pour le mazout avec un pouvoir calorifique d'environ 10 kWh par litre et des émissions de CO₂ d'environ 2,65 kg par litre, cela correspond à près de 2.24 Ct/kWh, soit la moitié de la majoration théorique proposée pour le mazout en 1997.

Tableau 9.4 Majorations des prix énergétiques en considérant les coûts externes en Suisse (selon OFEN und OFEV état 1997) [21].

Source d'énergie	Exemple prix énergétique	Majoration de prix énergétique	Exemple majoration de prix énergétique avec coûts externes
	Ct/kWh	Ct/kWh	Ct/kWh
Mazout	5.5	4.5	10.0
Gaz naturel	6.0	3.0	9.0
Bois	4.0	1.5	5.5
Electricité	15.0	5.0	20.0

9.5 Plan d'affaires, bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel

Le terme allemand pour « plan d'affaires », « Businessplan », provient de l'anglais « business plan ». Il décrit un concept d'entreprise, soit une idée commerciale à mettre en place dans une entreprise. Un plan d'affaires constitue aussi un outil fournissant des renseignements sur la qualité d'une entreprise. Pour les modèles suivants, le **plan d'affaires** comporte un document composé des deux parties suivantes:

1. Partie textuelle: Il s'agit du plan d'affaires qui formule par écrit l'**idée commerciale** en ce qui concerne le produit, le service, les clients et le marketing. Le plan d'affaires renseigne sur l'évolution de l'entreprise et permet une évaluation des risques. Dans le cas d'un réseau de chauffage à distance, il est donc essentiel de montrer les impacts des différentes variantes du développement du réseau.

2. Partie financière: Il s'agit du **bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel** concernant les recettes et dépenses prévues, les subventions, le financement et la planification des liquidités. Le bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel s'effectue en général sur une période d'au moins 20 ans.

Les deux parties du **plan d'affaires** doivent couvrir les éléments suivants:

- Executive summary (deux pages max.)
- Entreprise (équipe fondatrice, profil d'entreprise, objectifs commerciaux)
- Produit ou service: avantage client/valeur client, état de développement, création
- Branche et marché: analyse sectorielle, analyse du marché et segmentation du marché, clients cibles, concurrence, analyse du site
- Marketing: pénétration du marché, concept de vente et marketing, promotion des ventes
- Management et personnes clés
- Plan de mise en œuvre
- Opportunités et risques
- Partie financière: planification pour les 20 à 25 prochaines années: planification RH, planification d'investissement et d'amortissement, compte de résultats prévisionnel, planification des liquidités, mise en évidence du besoin de financement
- Analyse de sensibilité comme complément au calcul des investissements qui répond aux questions suivantes en modifiant les valeurs d'intrants les plus importantes:
 - Quelles sont les valeurs d'intrants influençant fortement les résultats,
 - Dans quelles limites les valeurs d'intrants peuvent-elles fluctuer sans mettre en danger la réussite de l'entreprise.
- Les valeurs d'intrants essentielles sont entre autres:
 - Part importante en fonds étrangers pour le financement et intérêts sur dette financière,
 - Prix du combustible (et alimentation sécurisée),
 - Dépassement des coûts de construction et d'installation,
 - Prix de l'électricité
 - Frais de personnel,
 - Fonds d'encouragement non garantis.

Le maître d'ouvrage est en principe chargé de rédiger le plan d'affaires. Le maître d'ouvrage est d'une part responsable de l'idée commerciale et de l'autre celle-ci constitue la meilleure base pour représenter le plan d'affaires à l'extérieur. La mission du planificateur est de soutenir le maître d'ouvrage lors de l'élaboration du plan d'affaires.

Les paragraphes suivants abordent le **bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel**.

L'évaluation de la rentabilité d'une entreprise ne peut pas se baser uniquement sur le calcul de la moyenne des coûts de revient de la chaleur. Même si les coûts de revient de la chaleur sont inférieurs aux revenus sur une longue période d'observation, une compensation des éventuelles pertes des premières années d'exploitation par les bénéfices n'est pas possible dans les années suivantes, lorsque les liquidités ne sont pas protégées. Il faut notamment prendre en compte la trésorerie, d'où le bilan prévisionnel et compte de pertes et profits

prévisionnel avec justification de la situation économique pour chaque année. Il faut déterminer la répartition des tâches au début du projet. Une collaboration du planificateur s'avère pertinente lors du processus d'optimisation, étant donné que les conditions cadres comme la structure et la densité de raccordement du réseau de chauffage impactent la rentabilité et que ces données doivent être enregistrées par le planificateur.

La vérification de la rentabilité et les calculs de planification correspondants ne doivent donc pas s'effectuer uniquement durant la phase de planification, mais plutôt régulièrement pendant l'exécution du projet. Un contrôle des éventuelles optimisations des coûts vient en complément.

Même lors du calcul du bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel chaque année, il faut déterminer si le **renchérissement** doit être pris en compte et la manière de le prendre en compte. L'approche réelle simplifiée (voir chapitre 9.4) n'est donc pas admissible car la différence entre intérêt réel et intérêt bancaire est supérieure en cas de taux d'inflation élevé. Ceci conduit à une charge d'intérêts proportionnellement élevée au cours des premières années. L'utilisation de l'intérêt réel peut par conséquent entraîner, surtout durant les premières années, une sous-estimation des charges financières avec un risque correspondant.

Si le renchérissement n'est absolument pas pris en compte (intérêt nominal et aucune hausse des prix), la charge d'intérêts par rapport aux revenus dans le compte de pertes et profits prévisionnel sera par la suite plus élevée que dans la réalité. En cas de faible renchérissement, cet écart est négligeable par rapport à d'autres incertitudes. Si le compte de pertes et profits prévisionnel est utilisé comme outil d'optimisation du réseau de chauffage, le renchérissement peut généralement être négligé lui aussi. Le renchérissement a un effet aussi bien sur les dépenses que sur les recettes, mais il s'avère secondaire par rapport à d'autres incertitudes.

Le bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel fait la plupart du temps partie des documents (en général du plan d'affaires) qui sont soumis par un créancier potentiel. Les hypothèses relatives aux intérêts et au renchérissement doivent être discutées et convenues avec le créancier.

Optimisation

10 Analyse et optimisation des consommateurs de chaleur

10.1 Méthode

L'analyse des consommateurs de chaleur se base sur le principe selon lequel l'écart de température entre amenée et retour détermine la puissance thermique transmissible du réseau de chauffage à distance. Elle est également fortement influencée par les consommateurs de chaleur. Si les consommateurs de chaleur (stations de transfert) ne refroidissent pas suffisamment l'eau du réseau de chauffage à distance, la température retour s'élève et la capacité du réseau s'en trouve réduite. Simultanément, la consommation d'énergie pour le pompage et les rejets de chaleur du réseau augmentent, puisque le débit massique et la température du réseau sont en hausse.

En tant que démarche méthodologique, la qualité des consommateurs de chaleur et le potentiel d'optimisation du réseau sont déterminés en examinant la quantité de chaleur et d'eau transmise aux consommateurs de chaleur. Cette procédure a été utilisée par un bureau de planification suédois dans de nombreux réseaux de chauffage à distance [12] et entre autres également en Suisse [13]. Lors d'une étude pratique sur deux réseaux de chauffage à distance [17], pour chacun d'eux un consommateur de chaleur a été identifié, qui a nettement réduit l'efficacité et la capacité du réseau. Des mesures d'optimisation mises en place uniquement pour ce consommateur ont permis de baisser la température retour primaire globale de 1,5 K ou 1,2 K. Un écart de température de 30 K dans le réseau correspond à une hausse de la capacité ou à une réduction du débit volumique de 5% ou 4%. Une étude de rentabilité a montré que les coûts sont amortis en 2,3 ou 3,9 années et que simultanément, le rendement des réseaux de chauffage à distance est nettement amélioré.

Afin de déterminer les stations de transfert influençant le plus fortement la température retour primaire globale dans le réseau, on définit la quantité d'eau désignée comme consommation supplémentaire définie pour des réseaux de chauffage à distance existants, qui passe par la station de transfert en comparaison avec une exploitation présentant un écart de température de référence. L'influence à calculer d'un consommateur de chaleur sur la température retour désigne la différence de température à laquelle le retour primaire global du réseau baisse, si un consommateur de chaleur est exploité à l'écart de température de référence plutôt qu'à l'écart de température effective.

Bien que les gros consommateurs de chaleur soient fondamentalement plus importants pour la rentabilité d'un réseau de chauffage à distance que les petits, il convient de toujours prendre en compte pour l'analyse de la qualité du réseau l'ensemble des consommateurs de chaleur. En effet, un seul consommateur de chaleur peut aggraver l'ensemble du réseau en cas de net dépassement à la

baisse par rapport à l'écart de température de référence, même s'il ne présente qu'une faible puissance.

10.1.1 Bases

L'équation suivante relative au flux de chaleur (besoin de chaleur par puissance) constitue la base de calcul de la consommation supplémentaire et de l'influence sur la température retour. Si la densité et la capacité thermique spécifique de l'eau sont supposées constantes dans la plage de température considérée, la puissance thermique transmissible est proportionnelle à l'écart de température entre amenée et retour. L'équation suivante s'applique donc:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T = \dot{V} \rho c_p \Delta T$$

Pour évaluer les consommateurs de chaleur, les quantités de chaleur et d'eau sont enregistrées sur une période d'observation à partir des données du compteur d'énergie thermique selon la Fig. 10.1, puis l'écart de température moyen est calculé. A des fins de suivi, un enregistrement des données en continu sur une période d'observation est idéal accompagné d'une évaluation sur une période d'observation par exemple d'un mois et une année, ainsi qu'une évaluation journalière optionnelle. Si les données sont relevées manuellement, on recommande une évaluation sur un trimestre minimum durant la période de chauffage.

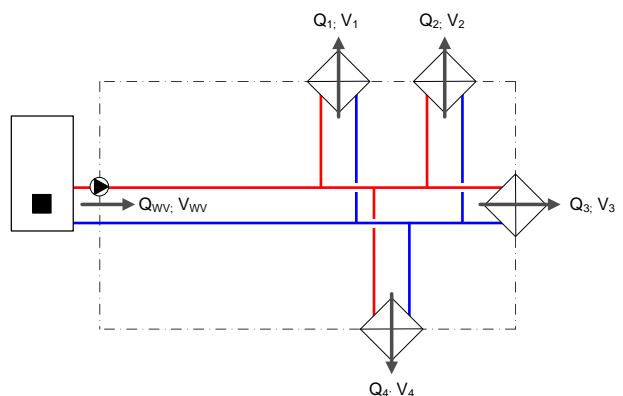


Fig. 10.1 Représentation schématique des valeurs caractéristiques à partir des données du compteur d'énergie thermique pour un réseau de chauffage avec un générateur de chaleur avec groupe principal pour la distribution de chaleur WV et quatre consommateurs de chaleur V1 à V4.

10.1.2 Consommation supplémentaire

La consommation supplémentaire constitue le volume d'eau passé au niveau d'une station de transfert durant la période considérée par rapport à un écart de température de référence. La consommation supplémentaire pour le consommateur de chaleur i se calcule donc à partir de la différence entre le volume mesuré et le volume idéal (se rapportant à un écart de température de référence) comme suit:

$$\begin{array}{rcl} V_{i,MV} & = & \Delta V_{i,WZ} - V_{i,REF} \\ \text{Consommation} & = & \text{Données} - \text{Valeur de référence} \\ \text{supplémentaire} & & \text{compteur d'énergie} \end{array}$$

La différence de volume mesurée pour le consommateur de chaleur i dans la période considérée se calcule à partir de la différence entre l'état du compteur d'énergie thermique au moment final (t_1) et l'état du compteur d'énergie thermique au moment initial (t_0) comme suit:

$$\Delta V_{i,WZ} = V_{i,WZ}(t_1) - V_{i,WZ}(t_0)$$

Le volume idéal pour le consommateur de chaleur i dans la période considérée à un écart de température de référence se calcule à partir du rapport entre la différence de quantité de chaleur mesurée pour le consommateur de chaleur i dans la période considérée et la densité de l'eau, de la capacité thermique spécifique de l'eau et de l'écart de température de référence comme suit:

$$V_{i,REF} = \frac{\Delta Q_{i,WZ}}{\rho c_p \Delta T_{REF}}$$

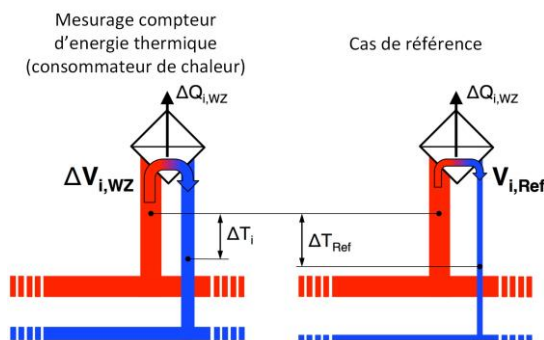


Fig. 10.2 Représentation de la consommation supplémentaire pour un consommateur de chaleur en comparant le volume d'eau des données du compteur d'énergie thermique et lors d'un écart de température de référence.

La différence de quantité de chaleur mesurée pour le consommateur de chaleur i dans la période considérée se calcule à partir de la différence entre l'état du compteur d'énergie thermique au moment final (t_1) et l'état du compteur d'énergie thermique au moment initial (t_0) comme suit:

$$\Delta Q_{i,WZ} = Q_{i,WZ}(t_1) - Q_{i,WZ}(t_0)$$

L'écart de température de référence doit reposer sur l'écart de température maximal des indications de température de l'amenée et retour spécifié dans les prescriptions techniques de raccordement. En cas d'absence de prescriptions techniques de raccordement,

il faut si possible choisir une valeur élevée techniquement réalisable comme écart de température de référence.

10.1.3 Influence sur la température retour

Une évaluation unique de la consommation supplémentaire ne suffit pas à estimer la nécessité d'une optimisation. L'influence de l'optimisation d'une station de transfert (sur l'écart de température de référence) sur la température de l'ensemble du retour primaire revêt une importance particulière. L'influence sur la température retour est représentée pour chaque consommateur de chaleur par un écart de température, qui précise l'ampleur de la baisser la température de l'ensemble du retour primaire, lorsque ce consommateur de chaleur est optimisé en passant à l'écart de température de référence.

La valeur se calcule à partir de la différence entre l'écart de température moyen issu des données du compteur d'énergie thermique principal et l'écart de température moyen avec station de transfert optimisée du consommateur de chaleur, de la manière suivante:

$$\Delta T_{i,RL} = \Delta T_{IST} - \Delta T^*_{IST}$$

L'écart de température moyen issu des données du compteur d'énergie thermique principal se calcule à partir du rapport de la différence des quantités de chaleur pour le compteur principal sur la période considérée avec la densité de l'eau, la capacité thermique spécifique de l'eau et la différence de volume pour le compteur principal dans la période considérée, de la manière suivante:

$$\Delta T_{IST} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho c_p \Delta V_{WV,WZ}}$$

L'écart de température moyen avec la station de transfert se calcule à partir du rapport de la différence des quantités de chaleur pour le compteur principal sur la période considérée avec la densité de l'eau, la capacité thermique spécifique de l'eau et la différence de volume pour le compteur principal dans la période considérée moins la consommation supplémentaire pour le consommateur de chaleur i , de la manière suivante:

$$\Delta T^*_{IST} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho c_p (\Delta V_{WV,WZ} - V_{i,MV})}$$

La différence des quantités de chaleur pour le compteur principal dans la période considérée se calcule à partir de la différence entre l'état du compteur d'énergie thermique au moment final (t_1) et l'état du compteur d'énergie thermique au moment initial (t_0) comme suit:

$$\Delta Q_{WV,WZ} = Q_{WV,WZ}(t_1) - Q_{WV,WZ}(t_0)$$

La différence de volume pour le compteur principal dans la période considérée se calcule à partir de la différence entre l'état du compteur d'énergie thermique au moment final (t_1) et l'état du compteur d'énergie thermique au moment initial (t_0) comme suit:

$$\Delta V_{WV,WZ} = V_{WV,WZ}(t_1) - V_{WV,WZ}(t_0)$$

En résumé, il en résulte l'équation suivante relative à l'influence sur la température retour:

$$\Delta T_{i,RL} = \frac{\Delta Q_{WV,WZ}}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{1}{\Delta V_{WV,WZ}} - \frac{1}{(\Delta V_{WV,WZ} - V_{i,MV})} \right)$$

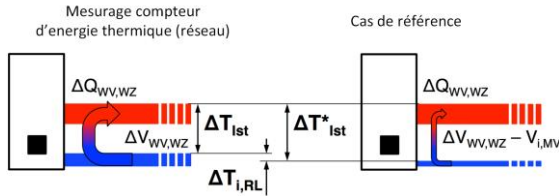


Fig. 10.3 Représentation de l'écart de température et des débits volumiques avant optimisation (à gauche) et après optimisation (à droite) d'un consommateur de chaleur.

10.2 Procédure

10.2.1 Saisie des données et évaluation

Saisie des données Le relevé du compteur d'énergie thermique pour le calcul de la chaleur fournie se déroule en général une à quatre fois par an. La plupart du temps seules les quantités de chaleur sont enregistrées.

Il est plus simple d'effectuer la saisie des données si les données du compteur d'énergie thermique sont enregistrées sur un site centralisé. Elle peut s'effectuer sur un serveur de données p. ex., qui enregistre au minimum les données de compteur d'énergie thermique des consommateurs. Un système de contrôle global enregistrant toutes les données pertinentes s'avère nettement plus confortable. L'évaluation et la facturation sont ainsi simplifiées. Pour évaluer les données du compteur d'énergie thermique, il faut obligatoirement enregistrer, en plus de la quantité de chaleur en kWh, le volume en m³. En cas d'absence de système de contrôle ou d'équivalent, les possibilités suivantes existent: relevé mensuel des

données de compteur d'énergie thermique sur site (coûteux), relevé trimestriel ou saisonnier des données de compteur d'énergie thermique (hiver, mi-saison, été) ou relevé au début et à la fin de la période de calcul.

Evaluation Le calcul de la consommation supplémentaire et la détermination de l'influence sur la température retour s'effectuent au plus simple à l'aide d'une feuille de calcul. Les modèles suivants se basent sur une évaluation des données exemplaire dans un tableau Excel au moyen d'un réseau de chauffage à distance fictif.

Le tableau regroupe une zone de saisie dans la première partie (Fig. 10.4) dans laquelle doivent être fixées des **grandeurs d'entrée (rouge)**. Dans l'exemple présenté, les valeurs suivantes sont saisies:

- Ecart de température de référence $\Delta T_{REF} = 35$ K
- Capacité thermique spécifique de l'eau $c_p = 4.185$ J/(kg K)
- Densité de l'eau $\rho_w = 980$ kg/m³
- Période de relevé compteur d'énergie thermique début 31 janvier 2016
- Période de relevé compteur d'énergie thermique fin 30 mai 2016

La deuxième partie regroupe une zone de sortie (Fig. 10.4) pour les **grandeurs calculées (bleu)** dans la période de relevé, qui sont fixées à partir des grandeurs d'entrée et des données du compteur d'énergie thermique. Comme dans l'exemple:

- Période de relevé t en jours 120 jours
- Période de relevé t heures 2880 h
- Ecart de température moyen 25.4 K
- Quantité de chaleur globale 1 848 043 kWh
- Quantité d'eau globale 63 853 m³
- Quantité d'eau spécifique 22.2 m³/h
- Puissance moyenne 641.7 kW
- Puissance libre moyenne par K 25.3 kW/K

Hypothèses		
écart de température de référence	K	35
Capacité thermique spécifique de l'eau	kJ/(kg K)	4.185
Densité de l'eau	kg/m ³	980
période de relevé compteur	31.01.2016	
	30.05.2016	
	d	120
	h	2880
Résultats		
écart de température moyen	K	25.4
Quantité de chaleur globale	kWh/t	1'848'043
Quantité d'eau globale	m ³ /t	63'853
Quantité d'eau spécifique	m ³ /h	22
Potentiel de performance et d'optimisation		
écart de température moyen	K	641.7
Quantité de chaleur globale	kWh/t	25.3

Fig. 10.4 Fichier Excel pour l'évaluation de la consommation supplémentaire et l'influence sur la température retour pour un réseau de chauffage fictif. Extrait avec grandeurs d'entrée et grandeurs calculées.

La troisième zone de saisie intègre les **données du compteur d'énergie thermique** du consommateur de chaleur (Fig. 10.5). La consommation supplémentaire et l'influence sur la température retour sont déterminées à partir de ces dernières et des grandeurs d'entrée. Les cinq colonnes à fond rouge sont réservées pour la saisie des données du compteur d'énergie thermique traitées des consommateurs de chaleur. Les données du compteur d'énergie thermique doivent être traitées dans un document séparé, puis copiées dans le document. Le traitement s'effectue selon les critères suivants:

- Numéro client: p. ex. numéro du compteur d'énergie thermique (pas obligatoire)
- Client: Nom du consommateur de chaleur
- Puissance convenue: Indication en kW (pas obligatoire, ici pour prévoir le nombre d'heures d'exploitation à pleine charge annuelles du consommateur de chaleur)
- Quantité de chaleur: quantité de chaleur transmissible en kWh dans la période de relevé
- Quantité d'eau: quantité d'eau écoulée en m³ durant la période de relevé.

Dans les colonnes suivantes les valeurs ci-dessous sont calculées pour chaque consommateur de chaleur:

- **Nombre d'heures d'exploitation à pleine charge:** Calcule le nombre d'heures d'exploitation à pleine

charge annuelles des consommateurs de chaleur. La valeur est surévaluée sur une année, si la période de relevé est inférieure à une année (8760 heures). Cette étape de calcul n'est pas nécessaire à l'évaluation et sert à la plausibilisation des données du compteur d'énergie thermique.

- **Consommation supplémentaire:** Indique les résultats pour la consommation supplémentaire selon le chapitre 10.1.2
- **Influence sur le retour:** Indique les résultats relatifs à l'influence sur la température retour selon le chapitre 10.1.3. Il convient de noter que les valeurs calculées de l'influence sur la température retour en cas d'optimisation ne sont en général pas atteintes, mais indiquent néanmoins le potentiel d'optimisation.
- **Ecart moyen:** L'écart de température moyen se calcule pour la période de relevé enregistrée et est comptabilisé. Cette indication est utile afin d'évaluer les résultats de la consommation supplémentaire et de l'influence sur la température retour.

La fonction d'Excel *Filtre et Trier les données par ordre croissant* permet de classer les consommateurs de chaleur par consommation supplémentaire croissante dans la première colonne «Rang». Le consommateur de chaleur avec la consommation supplémentaire la plus élevée est indiqué au rang 1.

Rang	Numéro client	Client	puissance convenue	Quantité de chaleur	Quantité d'eau	Nombre d'heures d'exploitation à pleine charge	Consommation supplémentaire	Influence sur le retour	Écart moyen
-	-	-	kW	kWh/t	m ³ /t	h/t	m ³ /t	°C	K
1	WZ_20	Consommateur 20	375	299'890	12'563	2432	5'042.01	-2.2	21.0
2	WZ_19	Consommateur 19	275	157'535	7'863	1742	3'912.16	-1.7	17.6
3	WZ_30	Consommateur 30	18	15'412	2'547	2'604	2'160.48	-0.9	5.3
4	WZ_43	Consommateur 43	65	60'787	2'398	2'845	873.01	-0.4	22.3
5	WZ_38	Consommateur 38	141	127'429	4'015	2'749	819.49	-0.3	27.9
6	WZ_29	Consommateur 29	75	81'245	2'774	3'295	736.74	-0.3	25.7
7	WZ_44	Consommateur 44	108	83'441	2'612	2'350	519.37	-0.2	28.0
8	WZ_39	Consommateur 39	61	63'688	2'074	3'176	476.76	-0.2	27.0
9	WZ_42	Consommateur 42	106	92'863	2'781	2'665	452.87	-0.2	29.3
10	WZ_33	Consommateur 33	31	27'976	1'144	2'745	442.29	-0.2	21.5

Fig. 10.5 Fichier excel pour l'évaluation de la consommation supplémentaire et l'influence sur la température retour. Les dix consommateurs de chaleur les plus mauvais d'un réseau de chauffage à distance fictif sont indiqués.

10.2.2 Evaluation

Il est possible sur la base de l'évaluation des données de déterminer les consommateurs de chaleur les plus mauvais présentant la consommation supplémentaire la plus élevée. Il ressort de l'exemple que le consommateur de chaleur 20 présente la consommation supplémentaire la plus élevée. Avec un écart de température moyen de seulement 21.0 K, il contribue à une température retour élevée. L'optimisation de ce consommateur de chaleur a pu refroidir l'ensemble du retour de 2.2 K.

Les trois consommateurs de chaleur suivants présentent un potentiel d'optimisation pour diminuer la température retour de 3 K. En comparaison, les autres consommateurs de chaleur ne présentent qu'une influence faible sur la température retour.

S'il apparaît dans la colonne «Ecart moyen» une valeur inhabituellement faible, par exemple de 5.3 K pour le consommateur de chaleur 30 (rang 3), cela indique un éventuel dysfonctionnement dans la station de transfert. Il faut y remédier le plus rapidement possible.

La procédure suivante consiste à découvrir les raisons de la consommation supplémentaire élevée du pire consommateur de chaleur. Elle vise également à élaborer et mettre en place des propositions d'amélioration. Pour ce faire, il est recommandé de procéder à une inspection de l'installation avec le consommateur de chaleur, l'exploitant du réseau de chauffage à distance et un spécialiste. Des mesures d'optimisation peuvent être conclues qui, en règle générale, doivent être réalisées par un spécialiste de la technique du chauffage à distance. Avant toute décision, on peut évaluer au préalable l'effet

économique de chaque mesure d'optimisation, le cas échéant.

Des composants mal conçus ou installés de façon incorrecte, une soudure et des défauts dus au vieillissement, ainsi que des paramètres inadéquats de la technique de mesure et de contrôle constituent les causes habituelles d'un écart de température faible et donc d'une consommation supplémentaire. Suite à une étude de l'Agence européenne de l'énergie (AIE), les trois catégories de techniques d'installation suivantes sont responsables du défaut [12]:

- La distribution de chaleur du circuit secondaire est responsable pour environ 60% des défaillances.
- La production de l'eau chaude sanitaire relève pour près de 30% des défauts.
- Les stations de transfert avec composants circuit primaire et secondaire sont responsables du reste des défauts.

Des causes concrètes de dysfonctionnements sont des commandes de vannes défectueuses, des vannes présentant des fuites, des réglages de régulateur inappropriés, ainsi qu'une intégration hydraulique inadaptée sur le circuit primaire et secondaire du consommateur de chaleur. Citons quelques exemples: réservoirs d'expansion ouverts, distributeurs doubles, by-pass, dispositifs de surintensité entre amenée et retour, branchements en injection avec vannes à trois voies, conduites de dérivation avec vannes à trois voies et vannes mélangeuses à quatre voies. Selon différentes sources de problèmes potentielles, une étude sur 52 réseaux de chauffage à distance montre que de nombreux réseaux n'atteignent pas l'écart de température prévu [16] en exploitation pratique.

10.2.3 Mise en place et contrôle des résultats

Dans le cadre de mesures d'optimisation sur le circuit primaire, la responsabilité tout comme les bénéfices incombent à l'exploitant du réseau de chauffage à distance. Par conséquent l'entière responsabilité de la mise en place des mesures d'optimisation peut être en général assumée par l'exploitant du réseau.

En revanche, il existe un éventuel conflit d'objectifs pour des mesures sur le circuit secondaire, car l'écart de température accru profite principalement au fournisseur d'énergie, la responsabilité de la mise en œuvre des mesures par contre incombant au consommateur de chaleur. Celui-ci profite certes d'une réduction de puissance de pompage et d'une diminution des pertes de distribution sur le circuit secondaire, mais les économies en résultant sont la plupart du temps faibles. C'est pour cette raison qu'il faut vérifier si les prescriptions techniques de raccordement comportent des conditions minimales relatives à l'écart de température et aux mesures et/ou s'il est question d'une participation du fournisseur d'énergie aux coûts.

Après la mise en place des mesures, l'optimisation doit être vérifiée à l'aide d'un contrôle des résultats.

10.3 Recommandations relatives à l'analyse des consommateurs de chaleur

L'analyse des consommateurs de chaleur au moyen de la consommation supplémentaire peut être facilement mise en œuvre. Les données des compteurs d'énergie thermique des consommateurs de chaleur et des générateurs de chaleur en constituent la base principale. Des connaissances fondamentales en thermodynamique et un savoir-faire pratique ou une expérience dans la technique du bâtiment et du chauffage à distance sont exigés. En fonction du progrès technique et du savoir-faire, la procédure présentée dans le Tableau 10.1 peut être réalisée par l'exploitant du réseau de chauffage à distance lui-même ou par un spécialiste expérimenté (planificateur).

Recommandations sur l'analyse des consommateurs de chaleur et la mise en place des mesures:

- Il est recommandé que toutes les **données de compteur d'énergie thermique** (consommateur de chaleur et générateur de chaleur) soient enregistrées sur un site centralisé. Ceci peut s'effectuer sur un serveur de données p. ex., qui enregistre au minimum les données de compteur d'énergie thermique des consommateurs de chaleur. Un système de contrôle global enregistrant toutes les données pertinentes s'avère nettement plus confortable. L'évaluation ainsi que la facturation sont donc simplifiées. Pour évaluer les données du compteur d'énergie thermique, il faut enregistrer, en plus de la quantité de chaleur habituelle en kWh, le volume en m³ durant la période d'observation.
- L'**évaluation des données de compteur d'énergie thermique** au moyen de la consommation supplémentaire s'effectue en général à l'aide d'une feuille de calcul (p. ex. Excel). Certaines charges initiales sont prévues pour l'analyse, pouvant être plus ou moins importantes selon le savoir-faire. Si les données de compteur d'énergie thermique sont facilement disponibles, l'investissement en temps sera relativement faible.
- Il est recommandé d'**analyser périodiquement** la consommation supplémentaire de tous les consommateurs de chaleur. Ainsi des variations peuvent être identifiées sans délai, causées p. ex. par des commandes de vannes défectueuses. Ces analyses doivent être réalisées selon les frais et le niveau d'automatisation de l'évaluation au moins une fois par trimestre, une fois par mois idéalement. Un système de contrôle permettrait d'automatiser cette évaluation et de comptabiliser la consommation supplémentaire p. ex. mensuellement, à condition qu'un contrôle des consommateurs de chaleur ne soit pas déjà réalisé au moyen du système de contrôle existant.
- Pour définir le besoin d'optimisation il est nécessaire que la situation soit clarifiée sur site par du **personnel qualifié** ou **des spécialistes externes**. La situation

actuelle doit être saisie avec le client raccordé afin de convenir de mesures d'optimisation. Un classement des mesures d'optimisation potentielles selon les avantages et les coûts est recommandé. Ceci facilite le processus décisionnel et permet de trouver la meilleure solution possible.

- La mise en place des mesures d'optimisation, nécessite de faire la différence entre deux **domaines de responsabilité ou domaines de compétences**. D'une part, si la mesure d'optimisation concerne le circuit primaire, la compétence relève du fournisseur d'énergie. D'autre part, si l'optimisation concerne également le circuit secondaire, la compétence relève dans ce cas de chaque consommateur de chaleur. Dans les deux cas, c'est le fournisseur d'énergie qui profite des mesures d'optimisation, tout comme de la capacité de raccordement accrue, de températures retour plus basses et en conséquence de coûts de revient de la chaleur plus faibles. Si la mesure d'optimisation concerne cette fois le circuit secondaire, le fournisseur d'énergie doit évaluer au moyen d'une mise en balance des intérêts dans quelle mesure un partage ou une prise en charge des coûts peut être considérée. Dans tous les cas, le consommateur de chaleur et le fournisseur d'énergie doivent convenir contractuellement que, dans l'éventualité d'une réhabilitation du circuit secondaire de l'intégration hydraulique, l'ensemble des mesures doit être conclu avec le fournisseur d'énergie et être également approuvé par ce dernier.
- Après la mise en place des mesures, l'optimisation doit être vérifiée et confirmée au moyen d'un **contrôle des résultats**.

Tableau 10.1 Procédure pour l'analyse et l'optimisation des consommateurs de chaleur.

Quoi	Description	Qui
Saisie des données et évaluation	Saisir les données de compteur d'énergie thermique	Exploitant / planificateur
	Indiquer la consommation supplémentaire et l'influence sur la température retour	Exploitant / planificateur
	Classer les consommateurs de chaleur selon leur consommation supplémentaire	Exploitant / planificateur
Evaluation	En se basant sur la saisie des données et l'évaluation, les pires consommateurs de chaleur sont déterminés pour une évaluation approfondie.	Exploitant / planificateur
	Evaluation sur site de la situation actuelle des pires consommateurs de chaleur	Exploitant / planificateur / consommateur de chaleur
	Déduction des mesures d'optimisation	Exploitant / planificateur
	Hiérarchisation des mesures d'optimisation au moyen des bénéfices et des coûts	Exploitant / planificateur
Mise en place et contrôle des résultats	Clarification des responsabilités	Exploitant / consommateur de chaleur
	Mise en balance des intérêts ou participation aux coûts si une mesure d'optimisation concerne sur le circuit secondaire (responsabilité consommateur de chaleur)	Exploitant
	Mise en place des mesures d'optimisation	Exploitant / consommateur de chaleur
	Contrôle de l'optimisation	Exploitant / planificateur

Annexe

11 Valeurs matérielles de l'eau

Tableau 11.1 Valeurs matérielles de l'eau en état de saturation [48].

Température °C	Pression de vapeur bar	Densité kg/m ³	Capacité thermique spécifique J/(kg K)	Conductivité thermique W/(m K)	Viscosité cinématique 10 ⁻⁶ m ² /s
0	0.0061	999.79	4.220	0.562	1.792
0.01	0.0061	999.79	4.220	0.562	1.792
5	0.0087	999.92	4.205	0.572	1.518
10	0.0123	999.65	4.196	0.582	1.306
15	0.0171	999.05	4.189	0.591	1.139
20	0.0234	998.16	4.185	0.600	1.003
25	0.0317	997.00	4.182	0.608	0.893
30	0.0425	995.61	4.180	0.615	0.801
35	0.0563	994.00	4.179	0.622	0.724
40	0.0738	992.18	4.179	0.629	0.658
45	0.0959	990.18	4.179	0.635	0.602
50	0.1235	988.01	4.180	0.641	0.554
55	0.1576	985.67	4.181	0.646	0.511
60	0.1995	983.18	4.183	0.651	0.474
65	0.2504	980.53	4.185	0.655	0.442
70	0.3120	977.75	4.188	0.660	0.413
75	0.3860	974.83	4.192	0.663	0.388
80	0.4742	971.78	4.196	0.667	0.365
85	0.5787	968.60	4.200	0.670	0.344
90	0.7018	965.30	4.205	0.673	0.326
95	0.8461	961.89	4.211	0.676	0.309
100	1.0142	958.35	4.217	0.678	0.294
110	1.4338	950.95	4.230	0.681	0.268
120	1.9867	943.11	4.246	0.684	0.246
130	2.7026	934.83	4.265	0.685	0.228
140	3.6150	926.13	4.286	0.685	0.212
150	4.7610	917.01	4.310	0.684	0.199
160	6.1814	907.45	4.338	0.682	0.188
170	7.9205	897.45	4.369	0.679	0.178
180	10.0260	887.01	4.406	0.675	0.169
190	12.5500	876.08	4.447	0.670	0.162
200	15.5470	864.67	4.494	0.663	0.155

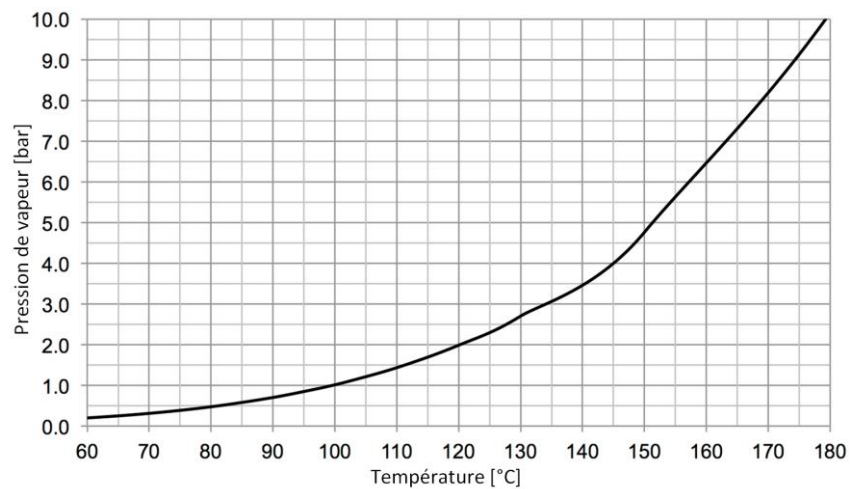


Fig. 11.1 Pression de vapeur d'eau en état de saturation [48] selon Tableau 11.1.

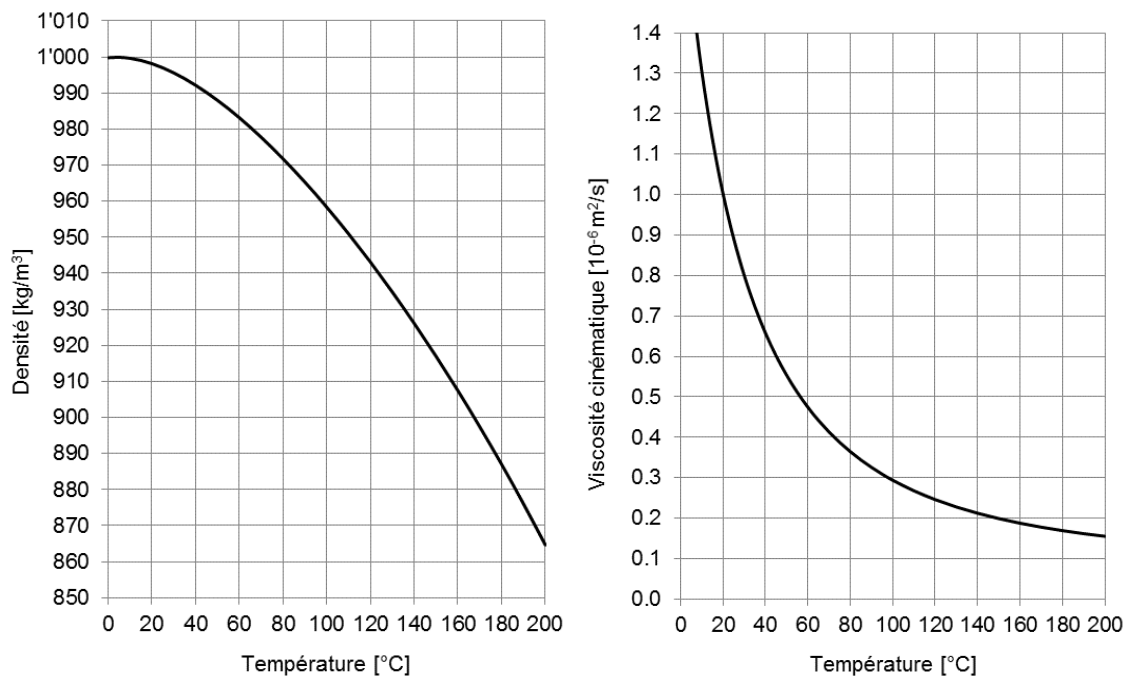


Fig. 11.2 Valeurs matérielles de l'eau en état de saturation [48] conformément au Tableau 11.1.
A gauche densité, à droite viscosité cinématique

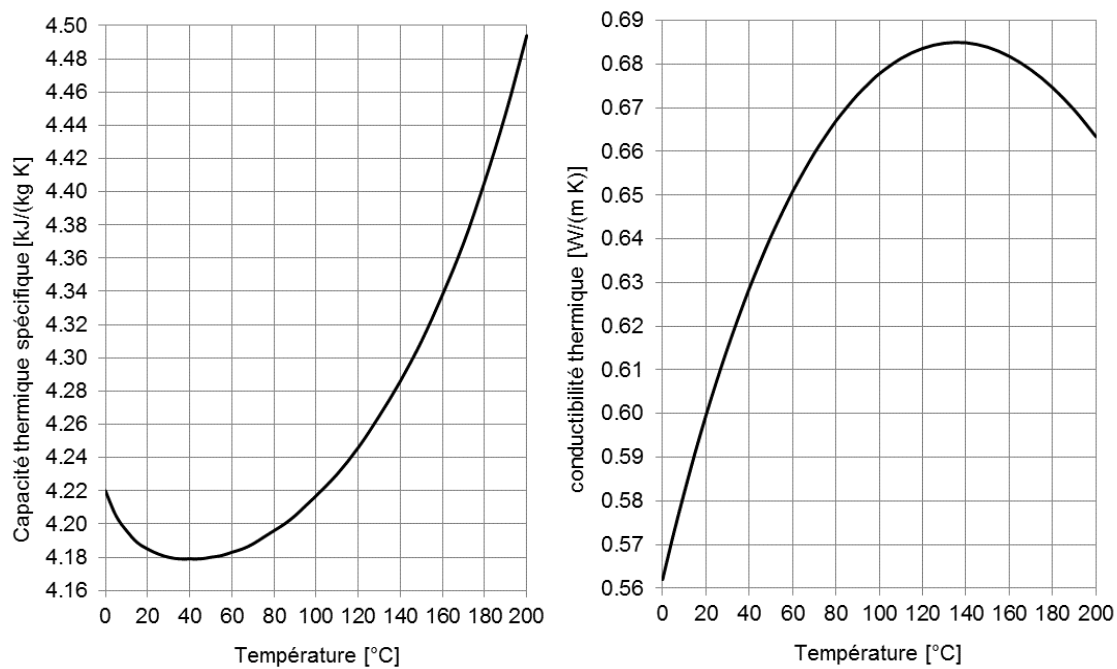


Fig. 11.3 Valeurs matérielles de l'eau en état de saturation [48] conformément au Tableau 11.1.
A gauche capacité thermique spécifique, à droite conductibilité thermique

12 Compléments relatifs à la qualité de l'eau

Les explications suivantes complètent le chapitre 4.8 Qualité de l'eau.

12.1 Grandeurs de mesure

La surveillance de la qualité de l'eau de circulation dans les réseaux de chauffage à distance peut être garantie par la mesure et le contrôle des valeurs suivantes:

Valeur du pH:

La valeur du pH constitue une valeur de mesure de la réaction acide, neutre ou alcaline de l'eau. Les acides séparent les ions hydrogène dans l'eau (H+). Les solutions alcalines (bases) séparent les ions hydroxyde dans l'eau (OH-). La valeur pH est donc la mesure de la concentration en ions hydrogène de l'eau (H+).

$$pH = -\log_{10}(H+)$$

Exemple: 0.00001 mol H+/l: $pH = -\log_{10} 0.00001 = 5$

Pour une température de 25°C, l'échelle du pH va de 0 à 14. L'eau est acide à $pH < 7$, neutre à $pH = 7$ et alcaline à $pH > 7$. Une modification de la valeur pH d'un point (par exemple de pH 8 à pH 9) signifie que la teneur de l'eau en acide s'est modifiée de dix fois.

Le pH est mesuré à l'aide d'indicateurs (papier réactif ou liquides) ou de manière électrochimique au moyen d'électrodes de pH.

Conductivité électrique:

La teneur en sel est en général déterminée en mesurant la conductivité électrique, dans laquelle entrent tous les composants dissous du milieu à analyser, c'est-à-dire les bases, les acides et les sels. Une conductivité croissante favorise les processus de corrosion électrochimiques.

La conductivité électrique représente la valeur réciproque de la résistance électrique ($S = 1/Ohm$) se rapportant à un cube d'eau de 1 cm à 25°C (unité: $\mu S/cm$; microsiemens/cm).

Dureté de l'eau:

Selon le système international d'unités, la teneur en ions alcalino-terreux, soit la dureté totale, est donnée en Mol par litre ou pour les faibles concentrations en millimoles par litre (mmol/l).

La dureté de l'eau était auparavant exprimée en degré allemand (°dH). Un degré allemand de dureté correspond à 10 mg d'oxyde de calcium par litre ou 10 g d'oxyde de calcium par mètre cube. En Suisse ce sont les degrés français de dureté °fH qui sont le plus répandus. Plus tard la dureté de l'eau a été exprimée dans l'unité d'équivalence pratique de quantités de substances millival par litre (mval/l) (voir Tableau 12.1). De nos jours, il s'agit des indications molaires susmentionnées qui sont également exigées.

Tableau 12.1 Conversion de la dureté de l'eau.

		°dH	°fH	mval/l	mmol/l
Degré allemand	°dH	1	1.78	0.357	0.1783
Degré français	°fH	0.56	1	0.2	0.1
Unité d'équivalence	mval/l	2.8	5	1	0.5
Système international d'unités	mmol/l	5.6	10	2	1

La qualité de l'eau peut être très différente selon les régions. Pour simplifier, on entend par dureté de l'eau la teneur en sels de calcium et sels de magnésium dissous (dureté totale GH). Par ailleurs on distingue la dureté carbonatée (CH) de la dureté non carbonatée (NCH). Les deux agents de dureté jouent un rôle particulier, car ils se déposent sur les parois des conduites et des réservoirs dès le chauffage à partir de 61°C sous forme de précipitations difficilement solubles (tartre).

- GH: somme des ions alcalino-terreux GH:
GH = calcium Ca^{2+} + magnésium Mg^{2+}
- CH: la part en calcium et magnésium, présente sous la forme d'hydrogénocarbonate (HCO_3^-) et de carbonate (CO_3^{2-}).
- NCH: part en calcium et magnésium, se liant à d'autres anions, comme chlorure (Cl⁻), sulfate (SO_4^{2-}), nitrate (NO_3^-)

L'équation suivante s'applique: **GH = CH + NCH**

En Suisse, l'eau se divise en six degrés de dureté (voir Tableau 12.1). La qualité de l'eau peut être très différente selon les régions. Les données générales de nombreuses régions sont par conséquent insuffisantes. De plus, les paramètres de l'eau peuvent notamment varier au cours de l'année, selon s'il s'agit de centrales d'eau de mer, d'eau souterraine et d'eau de source.

Tableau 12.2 Types d'eau en Suisse et leur division en degrés de dureté français

Type d'eau	Dureté de l'eau °fH
Très douce	0-7
Douce	7-15
Moyennement dure	15-25
Relativement dure	25-32
Dure	32-42
Très dure	> 42

Il est recommandé d'exiger l'analyse de l'eau correspondante de la société de distribution de l'eau compétente. L'eau potable est un aliment et en tant que telle est soumise à obligation de déclaration. Les données d'analyse nécessaires doivent donc être mises à disposition par la société de distribution de l'eau. En cas d'utilisation d'eau de surface et d'eau de pluie, l'analyse de l'eau doit être élaborée sur la base d'un échantillon représentatif.

Oxygène

L'eau de robinet normale contient généralement, selon l'origine, entre 5 et 12 mg/l d'oxygène. Dans un système hydraulique fermé, une concentration en oxygène plus faible est atteinte après quelques jours voire quelques semaines et sans autre réinjection.

Une concentration plus élevée en oxygène dans un système fermé (circuit de chauffage ou de refroidissement) n'est pas souhaitable. Elle peut provenir d'une réinjection ultérieure, mais aussi d'une diffusion de l'oxygène (par exemple par des tubes en plastique étanches à la diffusion).

Lors de la détermination de la concentration en oxygène de l'eau du robinet, il faut veiller à empêcher tout ajout d'oxygène dans l'échantillon.

Chlorure

La teneur en chlorure est importante dans le cadre de l'effet corrosif. En effet, le chlorure favorise la corrosion localisée (corrosion par piqûres, corrosion caverneuse). Aux concentrations les plus élevées, le chlorure peut également endommager l'acier chromé et l'acier chrome-nickel, particulièrement à des températures très hautes. La teneur en chlorure est exprimée en mg/l.

Sulfate

Le sulfate est également essentiel dans le cadre de l'effet de corrosion, car il a également un effet sur la corrosion localisée (corrosion par piqûres, corrosion caverneuse). La teneur en sulfate est exprimée en mg/l.

Nitrate

Le nitrate favorise lui aussi la corrosion localisée (corrosion par piqûres, corrosion caverneuse). Des valeurs en nitrate élevées dans l'eau potable, surtout dans des zones caractérisées par une utilisation agricole intensive, peuvent grandement influencer la résistance à la corrosion. La teneur en nitrate est exprimée en mg/l.

12.2 Procédé de traitement de l'eau

Les procédés de traitement de l'eau peuvent concerner l'eau d'appoint et/ou un flux partiel de l'eau de circulation. La qualité de l'eau de circulation peut se dégrader à cause d'infiltration d'eau parasite, d'introduction de gaz ou de processus de corrosion, mais aussi varier à cause de l'utilisation d'agents de conditionnement. À l'aide d'une installation de traitement du flux partiel (filtration, dégazage et échangeur d'ions) les composants en suspension et dissous dans le by-pass peuvent être supprimés. Les procédés suivants sont utilisés:

Filtration:

Lors de la suppression des substances insolubles, différents procédés mécaniques sont employés pour éviter les dépôts ou les dysfonctionnements des composants montés en aval. Pour les substances non dissoutes, il est possible de recourir p. ex. à des cartouches filtrantes, des filtres à manche ou des filtres à bougies suspendues.

Des filtres sont aussi installés pour de grosses particules d'impuretés.

Déminéralisation:

Une procédure d'échangeur d'ions permet d'éliminer les sels dissous dans l'eau (cations et anions) dans le but de réduire la conductivité électrique. Pour ce faire, on utilise habituellement des échangeurs de cations fortement acides associés à des échangeurs d'anions fortement basiques. Une déminéralisation large peut également être réalisée au moyen de la technique membranaire (osmose inverse). Lors de cette procédure, il faut veiller aux limites de températures dans l'exploitation à flux partiel.

L'électrodéionisation (EDI) constitue une déminéralisation électrochimique. Le processus associe une électrodialyse et un échangeur d'ions. Une installation EDI est utilisée en tant qu'étape de procédé pour la déminéralisation restante consécutive à une osmose inverse. Une conductivité jusqu'à 0,06 µS/cm peut être atteinte si le traitement préalable s'avère optimal. Un module EDI se compose de membranes de réponse ionique sélective et de résines échangeuses d'ions qui sont agencées en sandwich entre deux électrodes (anode (+) et cathode (-)). En mettant en place un courant continu aux pôles, les ions sont contraints de migrer conformément à leur charge. Les membranes sélectives aux anions laissent passer uniquement les anions, les membranes sélectives aux cations uniquement les cations. Les deux types de membranes sont étanches.

Adoucissement:

En utilisant des échangeurs de cations régénérables avec du sel gemme technique, les agents de dureté (ions calcium et magnésium) sont échangés contre des ions sodium. L'eau est donc adoucie et ne peut plus entraîner d'entartrage. Ce type de traitement de l'eau est généralement utilisé lors de la méthode d'exploitation contenant du sel.

Dégazage:

Afin de supprimer la part des gaz naturellement dissous dans l'eau, comme O₂, N₂ et CO₂, les procédés de dégazage thermique et de dégazage sous-vide (dégazage par pression nominale) ont fait leurs preuves dans la pratique.

Élimination de l'oxygène:

L'élimination partielle de l'oxygène peut aussi se produire lors du dégazage.

Dans les circuits fermés, le recours à des anodes sacrificielles pour la liaison de l'oxygène est approprié au traitement de l'eau. Les anodes de magnésium décomposent le magnésium, oxydé par l'oxygène, en liant l'oxygène. La boue Mg(OH)₂ ainsi formée doit être évacuée de manière appropriée.

12.3 Procédé de traitement de l'eau (conditionnement)

On entend par conditionnement le traitement de l'eau à des fins de stabilisation de la dureté, de protection anti-corrosion et de lutte contre les attaques biologiques avec des additifs adaptés. L'ajout d'agents chimiques peut être nécessaire pour ajuster les valeurs indicatives, mais peut aussi représenter une mesure d'atténuation des dommages par le biais d'infiltrations d'eau et d'air parasites la plupart du temps inévitables dans la pratique.

Il faut veiller à ce que l'agent de conditionnement puisse augmenter la conductivité électrique. Il faut être attentif à la compatibilité des matériaux et à la pureté des produits chimiques utilisés. Lors d'association d'agents de conditionnement, il faut également veiller à la compatibilité des produits chimiques les uns avec les autres. Si des agents de conditionnement sont employés, il convient de prendre garde, en plus des aspects sanitaires et toxicologiques, à leur impact environnemental.

Augmentation de la valeur pH:

Une augmentation de la valeur pH est effectuée pour repousser une dissolution de fer dans l'eau, se produisant avec la formation d'hydroxyde ferreux (II) et former une couche protectrice d'oxyde de fer (magnétite) (à température d'amenée $\gg 100^{\circ}\text{C}$). Pour viser une alcalinité protectrice suffisante, on utilise principalement de la soude caustique (NaOH) tout comme de l'amine qui a fait ses preuves ces dernières années.

Pour protéger le fer, une valeur pH d'environ 9.3 s'applique comme étant optimale. Des expériences pratiques montrent que pour des installations chauffées indirectement, les valeurs pH jusqu'à 8.5 suffisent pour une exploitation sans problème. Pour des matériaux à base de laiton, un risque d'érosion-corrosion existe à des valeurs pH > 9 et à une vitesse d'écoulement plus élevée localement.

Stabilisation de la dureté:

Le procédé de traitement de l'eau décrit plus haut garantit en principe le paramétrage du niveau de dureté correct. De faibles durcissements inévitables dus à des d'infiltrations d'eau parasite peuvent être rencontrés en utilisant des stabilisateurs de dureté et un agent anti-incrustation. Dans la pratique, des produits chimiques à base de phosphates, polyphosphates et polyacrylates ont fait preuve d'efficacité. Ils permettent, en plus de leur caractéristique phénotypique d'éviter des dépôts de tartre, ils peuvent également empêcher des dépôts de produits de corrosion et de matières solides en suspension.

Élimination de l'oxygène:

Dans le cadre d'un réseau de chauffage à distance largement fermé sans nécessité élevée d'eau de remplissage, l'apport d'oxygène est si faible dans une exploitation sans problème, qu'aucun dommage dû à la corrosion n'est à craindre. L'élimination de l'oxygène n'est ici techniquement pas nécessaire. Une élimination de l'oxygène est inversement utile, lorsqu'un apport d'oxygène élevé est à envisager en raison de conditions d'exploitation particulières. L'élimination peut s'effectuer en utilisant des installations de dégazage de flux partiel, en éliminant l'oxygène catalytique et électrochimique et en ajoutant l'un des liants d'oxygène suivants:

- Hydrazine: Encore admissible uniquement dans des cas exceptionnels et dûment justifiés à cause de sa qualification comme substance cancérigène. Interdit en raccordement direct du chauffage de l'eau chaude.
- Sulfite de sodium: Limité à la méthode d'exploitation saline, car il augmente continuellement la teneur en sel. Pour réduire le risque de corrosion, il ne faut pas dépasser une teneur en sulfate de 250 mg/l. Inapproprié en lien avec des matériaux contenant du cuivre.
- Liant d'oxygène organique comme l'acide ascorbique.

Inhibiteurs de corrosion:

Inhibiteurs de corrosion et leurs produits de réaction doivent, en cas d'utilisation conforme à l'usage prévu, soit réduire le transfert de chaleur, soit provoquer la corrosion. En plus des phosphates et des silicates, les mélanges de produits chimiques à base d'amines, de borate, de molybdène, de nitrite et de tanin appartiennent aux inhibiteurs de corrosion habituels. En tant que produits de décomposition, toutes ces substances forment des acides inorganiques et/ou organiques ou divers composés organiques. Ainsi la valeur pH doit être maintenue stable à l'aide de substances tampons appropriées (p. ex. phosphate).

13 Valeurs caractéristiques systèmes de conduites

13.1 Puissance de transfert pour différents écarts de température

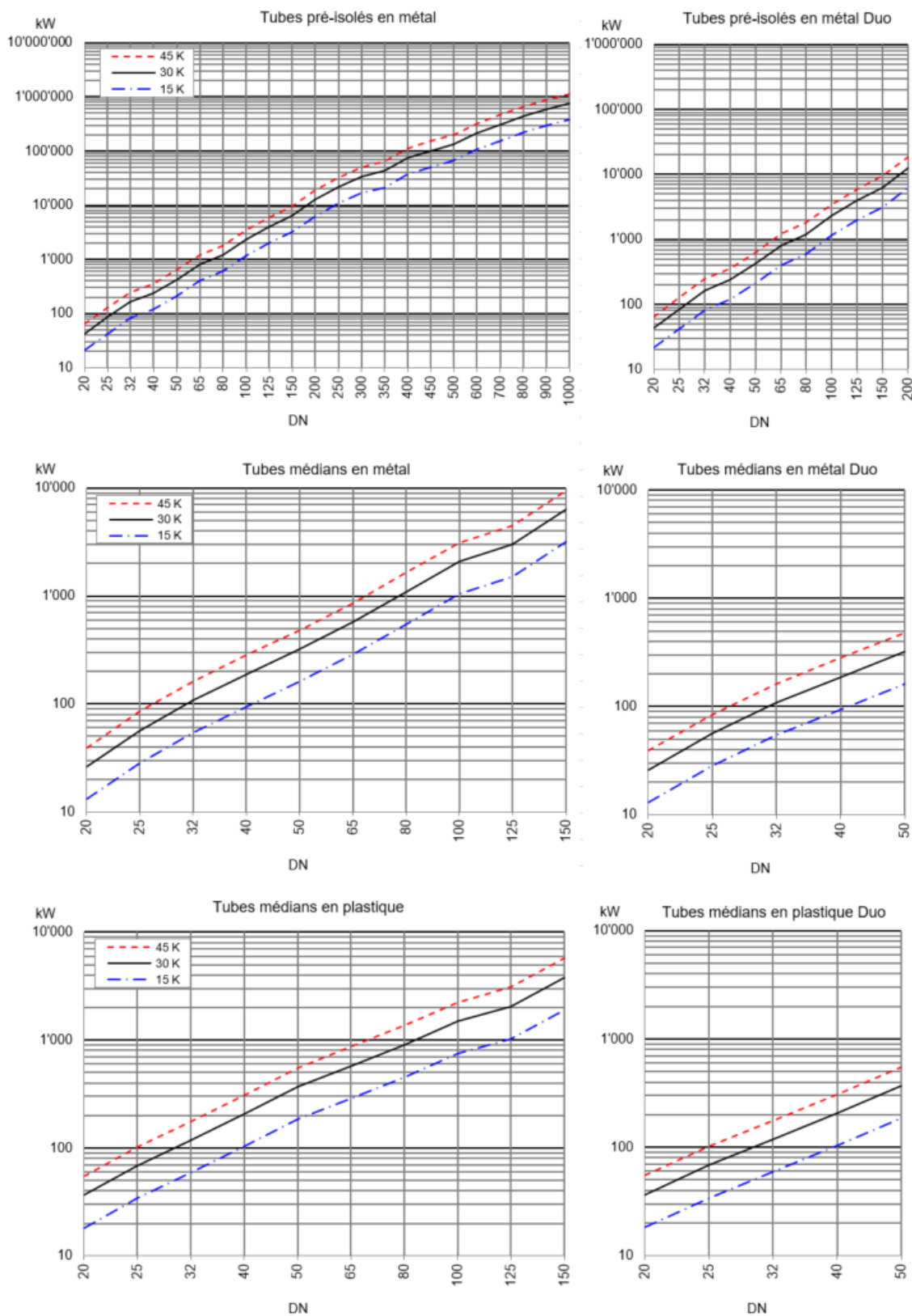


Fig. 13.1 Valeurs caractéristiques pour des puissances de transfert possibles pour différents écarts de température de 15, 30 et 45 K en cas de perte de pression spécifique de 300 Pa/m pour des tubes pré-isolés en métal (KMR), tubes médians en métal (MMR) et tubes médians en plastique (PMR).

13.2 Puissance de transfert en cas de pertes de pression spécifiques différentes

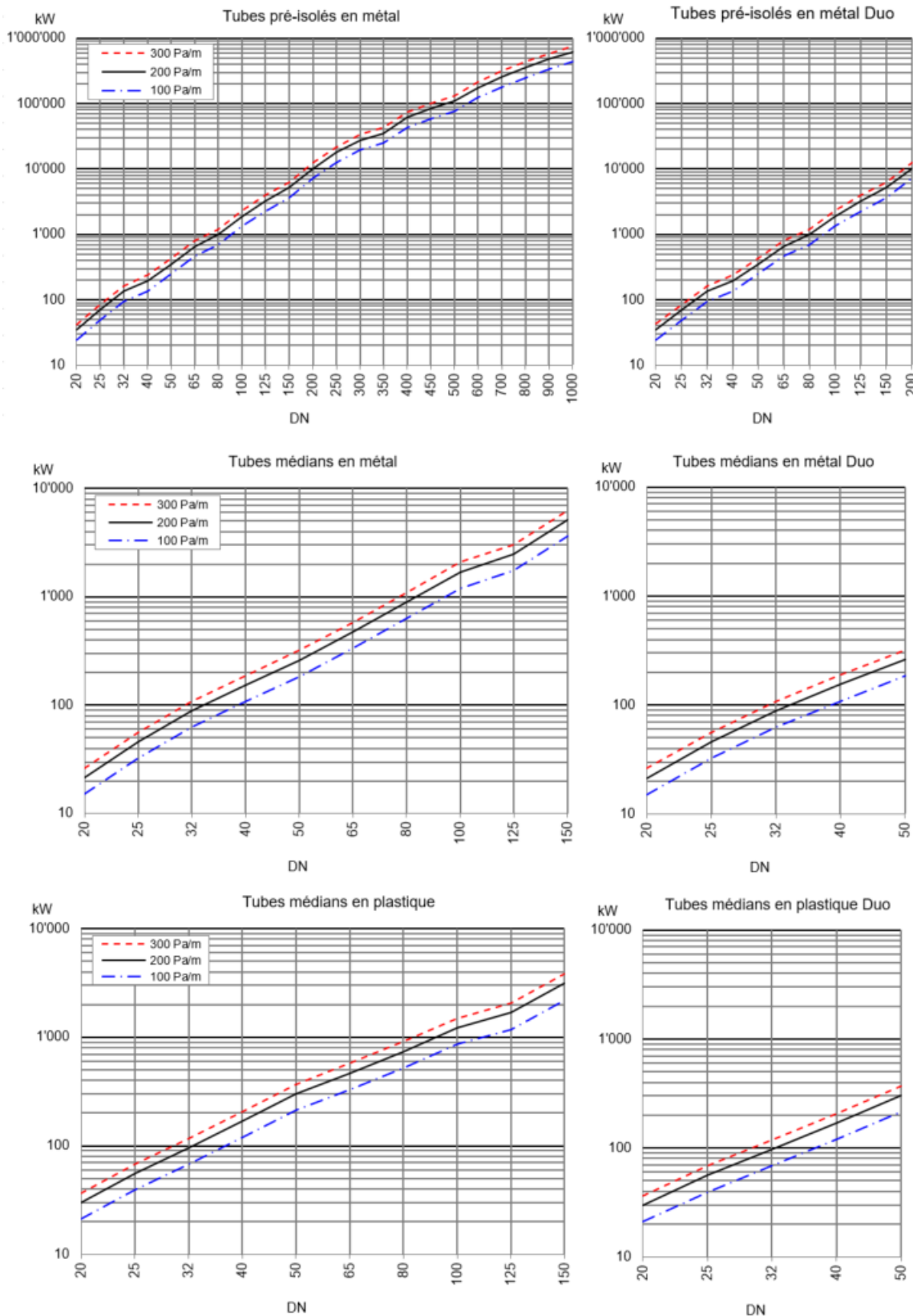


Fig. 13.2 Valeurs caractéristiques pour des puissances de transfert possibles en cas de perte de pression spécifique de 100, 200 et 300 Pa/m pour un écart de température de 30 K pour des tubes pré-isolés en métal (KMR), tubes médians en métal (MMR) et tubes médians en plastique (PMR).

13.3 Tableau valeur R pour tubes en acier sans soudure

Les tableaux suivants ont été tirés du Guide de planification de QM Chauffages au bois [21] et présentent la perte de pression spécifique par mètre de conduite (valeur R). Par ailleurs pour chaque valeur R, les valeurs suivantes ont été calculées pour les diamètres nominaux DN25, DN32, DN40, DN50, DN65, DN80, DN100, DN125, DN150, DN200 et DN250:

- Débit massique kg/h (désignée par «Massenstrom» dans le tableau)
- Vitesse d'écoulement moyenne m/s (désignée par «Geschwindigkeit» dans le tableau)
- Pression dynamique Pa (désignée par «Staudruck» dans le tableau)

Les tableaux ont été calculés avec les constantes suivantes:

- Température de l'eau 70°C
- Densité 977,7 kg/m³
- Viscosité cinématique 4,14 E-7 m²/s
- Rugosité 0,01 mm
- Diamètre intérieur de conduite DIN 2448 pour tubes en acier sans soudure

A partir de la perte de pression spécifique de la conduite par mètre longueur de conduite (valeur R), on calcule ce qui suit,

$$R = \frac{\lambda}{d_i} \frac{\rho_w}{2} w^2$$

la vitesse d'écoulement moyenne w peut être déterminée.

$$w = \sqrt{\frac{d_i}{\lambda} \frac{2}{\rho_w} R}$$

Le calcul du coefficient de friction de la conduite de l'écoulement dans la conduite (valeur lambda) a été effectué de manière itérative selon l'équation de Colebrook pour un flux turbulent dans la conduite:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{d_i} \frac{1}{3.71} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right)$$

Le débit massique et la pression dynamique sont déterminés à l'aide des équations suivantes:

$$\dot{m} = w \rho_w d_i^2 \frac{\pi}{4}$$

$$p_{dyn} = w^2 \frac{\rho_w}{2}$$

Nennweite DN [mm]		25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250
Rohr-Innendurchmesser [mm]		28.5	37.2	43.1	54.5	70.3	82.5	107.1	131.7	159.3	206.5	260.4
R [Pa/m]												
10	Massenstrom [kg/h]	303	626	933	1'759	3'490	5'363	10'786	18'731	31'092	61'957	114'561
	Geschwindigkeit [m/s]	0.135	0.164	0.182	0.214	0.255	0.285	0.34	0.391	0.443	0.526	0.611
	Staudruck [Pa]	8.9	13	16	22	32	40	57	75	96	135	183
12	Massenstrom [kg/h]	336	694	1'034	1'948	3'864	5'936	11'930	20'708	34'360	68'436	126'485
	Geschwindigkeit [m/s]	0.15	0.181	0.201	0.237	0.283	0.315	0.376	0.432	0.49	0.581	0.675
	Staudruck [Pa]	11	16	20	28	39	49	69	91	117	165	223
14	Massenstrom [kg/h]	367	757	1'128	2'124	4'211	6'466	12'989	22'539	37'385	74'428	137'511
	Geschwindigkeit [m/s]	0.164	0.198	0.22	0.259	0.308	0.344	0.41	0.47	0.533	0.631	0.734
	Staudruck [Pa]	13	19	24	33	46	58	82	108	139	195	263
16	Massenstrom [kg/h]	396	817	1'216	2'289	4'535	6'962	13'980	24'251	40'214	80'033	147'821
	Geschwindigkeit [m/s]	0.177	0.213	0.237	0.279	0.332	0.37	0.441	0.506	0.573	0.679	0.789
	Staudruck [Pa]	15	22	27	38	54	67	95	125	161	225	304
18	Massenstrom [kg/h]	424	873	1'299	2'445	4'842	7'431	14'916	25'868	42'884	85'319	157'540
	Geschwindigkeit [m/s]	0.189	0.228	0.253	0.298	0.354	0.395	0.47	0.539	0.611	0.724	0.84
	Staudruck [Pa]	17	25	31	43	61	76	108	142	183	256	345
20	Massenstrom [kg/h]	450	926	1'378	2'593	5'133	7'877	15'805	27'403	45'419	90'336	166'764
	Geschwindigkeit [m/s]	0.2	0.242	0.268	0.316	0.376	0.419	0.498	0.572	0.647	0.766	0.89
	Staudruck [Pa]	20	29	35	49	69	86	121	160	205	287	387
22	Massenstrom [kg/h]	475	977	1'454	2'734	5'412	8'302	16'654	28'868	47'839	95'124	175'563
	Geschwindigkeit [m/s]	0.212	0.255	0.283	0.333	0.396	0.441	0.525	0.602	0.682	0.807	0.937
	Staudruck [Pa]	22	32	39	54	77	95	135	177	227	318	429
24	Massenstrom [kg/h]	499	1'026	1'527	2'870	5'679	8'711	17'468	30'273	50'157	99'711	183'992
	Geschwindigkeit [m/s]	0.222	0.268	0.297	0.35	0.416	0.463	0.551	0.631	0.715	0.846	0.982
	Staudruck [Pa]	24	35	43	60	84	105	148	195	250	350	471
26	Massenstrom [kg/h]	522	1'074	1'597	3'001	5'936	9'103	18'251	31'624	52'387	104'121	192'095
	Geschwindigkeit [m/s]	0.233	0.281	0.311	0.365	0.434	0.484	0.576	0.66	0.747	0.883	1.02
	Staudruck [Pa]	26	39	47	65	92	114	162	213	273	381	513
28	Massenstrom [kg/h]	545	1'119	1'664	3'127	6'184	9'482	19'007	32'928	54'538	108'375	199'909
	Geschwindigkeit [m/s]	0.243	0.293	0.324	0.381	0.453	0.504	0.599	0.687	0.777	0.919	1.07
	Staudruck [Pa]	29	42	51	71	100	124	176	231	295	413	556
30	Massenstrom [kg/h]	566	1'163	1'730	3'249	6'424	9'849	19'738	34'188	56'618	112'488	207'462
	Geschwindigkeit [m/s]	0.252	0.304	0.337	0.396	0.47	0.523	0.622	0.713	0.807	0.954	1.11
	Staudruck [Pa]	31	45	55	77	108	134	189	249	318	445	599
35	Massenstrom [kg/h]	618	1'268	1'885	3'539	6'994	10'719	21'472	37'179	61'551	122'237	225'363
	Geschwindigkeit [m/s]	0.275	0.332	0.367	0.431	0.512	0.57	0.677	0.775	0.877	1.04	1.2
	Staudruck [Pa]	37	54	66	91	128	159	224	294	376	526	707
40	Massenstrom [kg/h]	666	1'367	2'031	3'811	7'527	11'534	23'094	39'975	66'162	131'346	242'084
	Geschwindigkeit [m/s]	0.297	0.357	0.395	0.464	0.551	0.613	0.728	0.834	0.943	1.11	1.29
	Staudruck [Pa]	43	62	76	105	148	184	259	340	435	607	815
45	Massenstrom [kg/h]	712	1'459	2'168	4'067	8'030	12'302	24'624	42'611	70'508	139'931	257'837
	Geschwindigkeit [m/s]	0.317	0.382	0.422	0.495	0.588	0.654	0.777	0.889	1.01	1.19	1.38
	Staudruck [Pa]	49	71	87	120	169	209	295	386	494	689	925
50	Massenstrom [kg/h]	755	1'548	2'299	4'311	8'509	13'032	26'076	45'113	74'632	148'074	272'775
	Geschwindigkeit [m/s]	0.336	0.405	0.448	0.525	0.623	0.693	0.822	0.941	1.06	1.26	1.46
	Staudruck [Pa]	55	80	98	135	190	235	331	433	553	771	1'035
55	Massenstrom [kg/h]	796	1'632	2'423	4'543	8'965	13'728	27'461	47'499	78'565	155'838	287'015
	Geschwindigkeit [m/s]	0.355	0.427	0.472	0.553	0.656	0.73	0.866	0.991	1.12	1.32	1.53
	Staudruck [Pa]	61	89	109	150	210	260	367	480	613	854	1'146
60	Massenstrom [kg/h]	836	1'713	2'543	4'766	9'402	14'396	28'789	49'786	82'332	163'272	300'649
	Geschwindigkeit [m/s]	0.372	0.448	0.495	0.581	0.688	0.765	0.908	1.04	1.17	1.39	1.6
	Staudruck [Pa]	68	98	120	165	232	286	403	527	673	938	1'258

Fig. 13.3 Tableau valeur R selon [21] pour les valeurs R de 10-60 Pa/m

Nennweite DN [mm]		25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250
Rohr-Innendurchmesser [mm]		28.5	37.2	43.1	54.5	70.3	82.5	107.1	131.7	159.3	206.5	260.4
R [Pa/m]												
65	Massenstrom [kg/h]	874	1'791	2'658	4'981	9'823	15'038	30'065	51'983	85'953	170'417	313'748
	Geschwindigkeit [m/s]	0.389	0.468	0.518	0.607	0.719	0.799	0.948	1.08	1.23	1.45	1.67
	Staudruck [Pa]	74	107	131	180	253	312	439	575	734	1'022	1'370
70	Massenstrom [kg/h]	911	1'866	2'769	5'188	10'229	15'657	31'296	54'103	89'443	177'303	326'373
	Geschwindigkeit [m/s]	0.406	0.488	0.539	0.632	0.749	0.832	0.987	1.13	1.28	1.5	1.74
	Staudruck [Pa]	81	116	142	195	274	339	476	622	795	1'106	1'482
75	Massenstrom [kg/h]	947	1'939	2'877	5'388	10'622	16'256	32'486	56'152	92'818	183'959	338'572
	Geschwindigkeit [m/s]	0.422	0.507	0.56	0.656	0.777	0.864	1.02	1.17	1.32	1.56	1.81
	Staudruck [Pa]	87	126	153	211	295	365	513	670	856	1'191	1'595
80	Massenstrom [kg/h]	982	2'009	2'981	5'583	11'002	16'836	33'640	58'137	96'087	190'405	350'386
	Geschwindigkeit [m/s]	0.437	0.525	0.581	0.68	0.805	0.895	1.06	1.21	1.37	1.62	1.87
	Staudruck [Pa]	93	135	165	226	317	391	550	719	917	1'275	1'708
85	Massenstrom [kg/h]	1'016	2'078	3'083	5'771	11'372	17'400	34'759	60'064	99'259	196'662	361'850
	Geschwindigkeit [m/s]	0.452	0.543	0.6	0.703	0.832	0.925	1.1	1.25	1.41	1.67	1.93
	Staudruck [Pa]	100	144	176	242	339	418	587	767	979	1'361	1'822
90	Massenstrom [kg/h]	1'049	2'145	3'181	5'955	11'731	17'948	35'849	61'938	102'345	202'744	372'994
	Geschwindigkeit [m/s]	0.467	0.561	0.62	0.725	0.859	0.954	1.13	1.29	1.46	1.72	1.99
	Staudruck [Pa]	107	154	188	257	360	445	625	816	1'041	1'446	1'936
95	Massenstrom [kg/h]	1'081	2'210	3'277	6'134	12'082	18'482	36'909	63'763	105'349	208'666	383'843
	Geschwindigkeit [m/s]	0.481	0.578	0.638	0.747	0.884	0.982	1.16	1.33	1.5	1.77	2.05
	Staudruck [Pa]	113	163	199	273	382	472	662	865	1'102	1'532	2'050
100	Massenstrom [kg/h]	1'112	2'273	3'371	6'308	12'424	19'003	37'944	65'542	108'279	214'441	394'420
	Geschwindigkeit [m/s]	0.495	0.594	0.656	0.768	0.909	1.01	1.2	1.37	1.54	1.82	2.1
	Staudruck [Pa]	120	173	211	289	404	499	700	913	1'165	1'618	2'164
110	Massenstrom [kg/h]	1'172	2'396	3'552	6'646	13'084	20'009	39'942	68'979	113'935	225'587	414'836
	Geschwindigkeit [m/s]	0.522	0.626	0.692	0.809	0.958	1.06	1.26	1.44	1.62	1.91	2.21
	Staudruck [Pa]	133	192	234	320	448	553	776	1'012	1'290	1'790	2'394
120	Massenstrom [kg/h]	1'230	2'514	3'726	6'969	13'716	20'974	41'856	72'270	119'350	236'257	434'373
	Geschwindigkeit [m/s]	0.548	0.657	0.726	0.849	1	1.11	1.32	1.51	1.7	2	2.32
	Staudruck [Pa]	147	211	257	352	493	607	852	1'111	1'415	1'964	2'625
130	Massenstrom [kg/h]	1'286	2'627	3'893	7'280	14'325	21'900	43'695	75'433	124'553	246'505	453'137
	Geschwindigkeit [m/s]	0.573	0.687	0.758	0.887	1.05	1.16	1.38	1.57	1.78	2.09	2.42
	Staudruck [Pa]	160	230	281	384	537	662	928	1'210	1'541	2'138	2'857
140	Massenstrom [kg/h]	1'340	2'736	4'055	7'580	14'911	22'794	45'468	78'481	129'567	256'381	471'214
	Geschwindigkeit [m/s]	0.597	0.715	0.79	0.923	1.09	1.21	1.43	1.64	1.85	2.17	2.51
	Staudruck [Pa]	174	250	305	417	582	717	1'005	1'310	1'668	2'312	3'089
150	Massenstrom [kg/h]	1'392	2'842	4'211	7'870	15'478	23'658	47'182	81'426	134'412	265'921	488'675
	Geschwindigkeit [m/s]	0.62	0.743	0.82	0.958	1.13	1.26	1.49	1.7	1.92	2.26	2.61
	Staudruck [Pa]	188	270	329	449	627	773	1'082	1'410	1'795	2'488	3'322
160	Massenstrom [kg/h]	1'443	2'944	4'362	8'151	16'028	24'495	48'842	84'279	139'104	275'158	505'581
	Geschwindigkeit [m/s]	0.642	0.77	0.849	0.993	1.17	1.3	1.54	1.76	1.98	2.33	2.7
	Staudruck [Pa]	202	290	353	482	673	829	1'160	1'510	1'922	2'664	3'556
170	Massenstrom [kg/h]	1'492	3'044	4'509	8'423	16'561	25'307	50'453	87'048	143'657	284'120	521'980
	Geschwindigkeit [m/s]	0.664	0.796	0.878	1.03	1.21	1.35	1.59	1.82	2.05	2.41	2.78
	Staudruck [Pa]	216	309	377	514	718	884	1'238	1'611	2'050	2'840	3'791
180	Massenstrom [kg/h]	1'539	3'140	4'652	8'689	17'080	26'097	52'019	89'739	148'082	292'830	537'917
	Geschwindigkeit [m/s]	0.686	0.821	0.906	1.06	1.25	1.39	1.64	1.87	2.11	2.48	2.87
	Staudruck [Pa]	230	329	401	547	764	940	1'316	1'712	2'178	3'017	4'026
190	Massenstrom [kg/h]	1'586	3'235	4'791	8'947	17'586	26'866	53'545	92'359	152'390	301'309	553'429
	Geschwindigkeit [m/s]	0.706	0.846	0.933	1.09	1.29	1.43	1.69	1.93	2.17	2.56	2.95
	Staudruck [Pa]	244	350	425	580	810	997	1'394	1'814	2'307	3'194	4'261

Fig. 13.4 Tableau valeur R selon [21] pour les valeurs R de 65-190 Pa/m

Nennweite DN [mm]		25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250
Rohr-Innendurchmesser [mm]		28.5	37.2	43.1	54.5	70.3	82.5	107.1	131.7	159.3	206.5	260.4
R [Pa/m]												
200	Massenstrom [kg/h]	1'631	3'327	4'927	9'200	18'078	27'617	55'032	94'914	156'590	309'574	568'549
	Geschwindigkeit [m/s]	0.727	0.87	0.959	1.12	1.32	1.47	1.74	1.98	2.23	2.63	3.03
	Staudruck [Pa]	258	370	450	614	856	1'053	1'472	1'916	2'436	3'372	4'497
220	Massenstrom [kg/h]	1'719	3'504	5'189	9'687	19'030	29'066	57'903	99'846	164'696	325'524	597'722
	Geschwindigkeit [m/s]	0.766	0.916	1.01	1.18	1.39	1.54	1.83	2.08	2.35	2.76	3.19
	Staudruck [Pa]	287	410	499	680	949	1'167	1'630	2'120	2'695	3'728	4'971
240	Massenstrom [kg/h]	1'803	3'675	5'440	10'153	19'941	30'453	60'651	104'565	172'453	340'783	625'628
	Geschwindigkeit [m/s]	0.803	0.961	1.06	1.24	1.46	1.62	1.91	2.18	2.46	2.89	3.34
	Staudruck [Pa]	315	451	549	748	1'042	1'281	1'789	2'325	2'954	4'086	5'446
260	Massenstrom [kg/h]	1'884	3'839	5'682	10'602	20'817	31'786	63'292	109'099	179'903	355'435	652'420
	Geschwindigkeit [m/s]	0.839	1	1.11	1.29	1.52	1.69	2	2.28	2.56	3.02	3.48
	Staudruck [Pa]	344	492	599	815	1'135	1'395	1'948	2'531	3'215	4'444	5'922
280	Massenstrom [kg/h]	1'962	3'997	5'915	11'034	21'662	33'070	65'836	113'467	187'080	369'548	678'223
	Geschwindigkeit [m/s]	0.874	1.04	1.15	1.34	1.59	1.76	2.08	2.37	2.67	3.13	3.62
	Staudruck [Pa]	373	534	649	883	1'229	1'510	2'107	2'738	3'477	4'804	6'400
300	Massenstrom [kg/h]	2'038	4'149	6'140	11'452	22'477	34'311	68'294	117'686	194'012	383'177	703'139
	Geschwindigkeit [m/s]	0.908	1.08	1.2	1.39	1.65	1.82	2.15	2.45	2.77	3.25	3.75
	Staudruck [Pa]	403	575	699	951	1'323	1'626	2'268	2'945	3'739	5'165	6'879
350	Massenstrom [kg/h]	2'217	4'512	6'674	12'443	24'410	37'251	74'114	127'673	210'417	415'427	762'085
	Geschwindigkeit [m/s]	0.987	1.18	1.3	1.52	1.79	1.98	2.34	2.66	3	3.52	4.07
	Staudruck [Pa]	477	680	826	1'123	1'561	1'916	2'671	3'466	4'398	6'071	8'080
400	Massenstrom [kg/h]	2'385	4'850	7'173	13'367	26'214	39'995	79'543	136'989	225'716	445'494	817'029
	Geschwindigkeit [m/s]	1.06	1.27	1.4	1.63	1.92	2.13	2.51	2.86	3.22	3.78	4.36
	Staudruck [Pa]	551	786	954	1'296	1'800	2'209	3'076	3'990	5'061	6'982	9'287
450	Massenstrom [kg/h]	2'542	5'169	7'643	14'238	27'912	42'577	84'653	145'754	240'107	473'771	868'692
	Geschwindigkeit [m/s]	1.13	1.35	1.49	1.73	2.04	2.26	2.67	3.04	3.42	4.02	4.63
	Staudruck [Pa]	627	893	1'083	1'470	2'041	2'503	3'484	4'517	5'727	7'897	10'499
500	Massenstrom [kg/h]	2'692	5'471	8'089	15'064	29'522	45'025	89'493	154'056	253'737	500'545	917'603
	Geschwindigkeit [m/s]	1.2	1.43	1.58	1.83	2.16	2.39	2.82	3.21	3.62	4.25	4.9
	Staudruck [Pa]	703	1'000	1'213	1'645	2'283	2'799	3'894	5'047	6'396	8'814	11'715
550	Massenstrom [kg/h]	2'835	5'760	8'514	15'851	31'056	47'356	94'104	161'962	266'715	526'035	964'162
	Geschwindigkeit [m/s]	1.26	1.51	1.66	1.93	2.27	2.52	2.97	3.38	3.8	4.46	5.14
	Staudruck [Pa]	779	1'108	1'344	1'822	2'526	3'097	4'306	5'578	7'067	9'735	12'933
600	Massenstrom [kg/h]	2'972	6'036	8'920	16'604	32'524	49'587	98'514	169'524	279'127	550'410	1'008'679
	Geschwindigkeit [m/s]	1.32	1.58	1.74	2.02	2.38	2.64	3.11	3.54	3.98	4.67	5.38
	Staudruck [Pa]	856	1'217	1'475	1'999	2'771	3'396	4'719	6'111	7'740	10'658	14'155
650	Massenstrom [kg/h]	3'103	6'301	9'311	17'328	33'934	51'730	102'749	176'784	291'042	573'806	1'051'402
	Geschwindigkeit [m/s]	1.38	1.65	1.81	2.11	2.48	2.75	3.24	3.69	4.15	4.87	5.61
	Staudruck [Pa]	934	1'326	1'607	2'177	3'016	3'695	5'133	6'645	8'414	11'583	15'380
700	Massenstrom [kg/h]	3'230	6'557	9'688	18'025	35'292	53'793	106'828	183'776	302'515	596'332	1'092'534
	Geschwindigkeit [m/s]	1.44	1.71	1.89	2.2	2.58	2.86	3.37	3.83	4.31	5.06	5.83
	Staudruck [Pa]	1'012	1'436	1'740	2'356	3'262	3'996	5'549	7'181	9'091	12'511	16'607
750	Massenstrom [kg/h]	3'353	6'804	10'052	18'699	36'603	55'787	110'767	190'527	313'592	618'078	1'132'239
	Geschwindigkeit [m/s]	1.49	1.78	1.96	2.28	2.68	2.96	3.49	3.97	4.47	5.24	6.04
	Staudruck [Pa]	1'090	1'547	1'873	2'535	3'509	4'298	5'965	7'719	9'769	13'440	17'836
800	Massenstrom [kg/h]	3'471	7'044	10'404	19'351	37'874	57'716	114'579	197'061	324'312	639'122	1'170'658
	Geschwindigkeit [m/s]	1.55	1.84	2.03	2.36	2.77	3.07	3.61	4.11	4.62	5.42	6.25
	Staudruck [Pa]	1'168	1'657	2'007	2'715	3'757	4'600	6'383	8'257	10'448	14'370	19'067
850	Massenstrom [kg/h]	3'587	7'276	10'746	19'984	39'106	59'588	118'277	203'398	334'708	659'527	1'207'908
	Geschwindigkeit [m/s]	1.6	1.9	2.09	2.43	2.86	3.17	3.73	4.24	4.77	5.59	6.44
	Staudruck [Pa]	1'247	1'768	2'141	2'896	4'005	4'903	6'802	8'797	11'129	15'303	20'299

Fig. 13.5 Tableau valeur R selon [21] pour les valeurs R de 200-850 Pa/m

13.4 Dimensions et rejets de chaleur spéc. pour tubes pré-isolés en métal, tubes médians en métal et tubes médians en plastique

Tableau 13.1 Tube pré-isolés en métal: Dimensions et rejets de chaleur spécifiques des diamètres nominaux DN20 – DN1000. Les données des fabricants suivants ont été prises en compte pour la création des tableaux: Brugg pipesystems, Isoplus et Logstor

Diamètre nominal	Tube intérieur moyen				Diamètre extérieur gaine protectrice en plastique (épaisseur d'isolation)			Rejets de chaleur spécifique par mètre de tracé		
	Diamètre extérieur	Epaisseur de paroi	Diamètre intérieur	Volume tube intérieur	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	26.9	2.65	21.60	0.37	90	110	125	0.284	0.248	0.229
25	33.7	2.60	28.50	0.64	90	110	125	0.342	0.291	0.266
32	42.4	2.60	37.20	1.09	110	125	140	0.354	0.317	0.290
40	48.3	2.60	43.10	1.46	110	125	140	0.403	0.356	0.322
50	60.3	2.90	54.50	2.33	125	140	160	0.450	0.398	0.350
65	76.1	2.90	70.30	3.88	140	160	180	0.527	0.446	0.393
80	88.9	3.20	82.50	5.35	160	180	200	0.547	0.469	0.416
100	114.3	3.60	107.10	9.01	200	225	250	0.576	0.490	0.432
125	139.7	3.60	132.50	13.79	225	250	280	0.663	0.562	0.482
150	168.3	4.00	160.30	20.18	250	280	315	0.777	0.633	0.531
200	219.1	4.50	210.10	34.67	315	355	400	0.844	0.670	0.555
250	273.0	5.00	263.00	54.33	400	450	500	0.820	0.656	0.556
300	323.9	5.60	312.70	76.80	450	500	580	0.933	0.744	0.578
350	355.6	5.60	344.40	93.16	500	560	630	0.912	0.719	0.589
400	406.4	6.30	393.80	121.80	560	630	730	0.964	0.744	0.579
450	457.2	6.30	444.60	155.25	630	670	800	0.970	0.839	0.605
500	508.0	6.30	495.40	192.75	710	800	900	0.941	0.728	0.595
600	610.0	7.10	595.80	278.80	800	900	1.000	1.125	0.836	0.679
700	711.0	8.00	695.00	379.37	900	1.000	1.100	1.266	0.938	0.761
800	813.0	8.80	795.40	496.89	1.000	1.100	1.200	1.409	1.042	0.842
900	914.0	10.00	894.00	627.72	1.100	1.200	–	1.542	1.141	–
1.000	1.016.0	11.00	994.00	776.00	1.200	1.300	–	1.678	1.241	–

Tableau 13.2 Tube pré-isolé en métal Duo: Dimensions et rejets de chaleur spécifiques des diamètres nominaux DN20 – DN200. Les données des fabricants suivants ont été prises en compte pour la création des tableaux: Brugg pipesystems, Isoplus et Logstor

Diamètre nominal	Tube intérieur moyen				Diamètre extérieur gaine protectrice en plastique (épaisseur d'isolation)			Rejets de chaleur spécifique par mètre de tracé		
	Diamètre extérieur	Épaisseur de paroi	Diamètre intérieur	Volume tube intérieur	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	26.9	2.60	21.70	0.37	125	140	–	0.204	0.184	–
25	33.7	2.60	28.50	0.64	140	160	–	0.223	0.195	–
32	42.4	2.60	37.20	1.09	160	180	–	0.242	0.213	–
40	48.3	2.60	43.10	1.46	160	180	–	0.286	0.243	–
50	60.3	2.90	54.50	2.33	200	225	–	0.280	0.241	–
65	76.1	2.90	70.30	3.88	225	250	–	0.329	0.278	–
80	88.9	3.20	82.50	5.35	250	280	–	0.371	0.297	–
100	114.3	3.60	107.10	9.01	315	355	–	0.375	0.300	–
125	139.7	3.60	132.50	13.79	400	450	–	0.363	0.293	–
150	168.3	4.00	160.30	20.18	450	500	–	0.419	0.330	–
200	219.1	4.50	210.10	34.67	560	630	–	0.475	0.349	–

Tableau 13.3 Tubes médians en métal (Flexible métal): Dimensions et rejets de chaleur spécifiques des diamètres nominaux DN20 – DN150. Les données de Brugg pipesystems ont été prises en compte pour la création des tableaux:

Diamètre nominal	Tube intérieur moyen				Diamètre extérieur gaine protectrice en plastique (épaisseur d'isolation)			Rejets de chaleur spécifique par mètre de tracé		
	Diamètre extérieur	Épaisseur de paroi	Diamètre intérieur	Volume tube intérieur	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	25.5	0.3	22.00	0.38	91	–	–	0.245	–	–
25	34.0	0.3	30.00	0.71	91	111	–	0.307	0.265	–
32	43.8	0.4	38.90	1.19	111	126	–	0.325	0.294	–
40	54.5	0.5	48.50	1.85	111	126	–	0.401	0.354	–
50	66.5	0.5	60.00	2.83	126	142	–	0.443	0.390	–
65	85.6	0.60	75.80	4.51	178	–	–	0.396	–	–
80	109.2	0.80	98.00	7.54	178	233	–	0.542	0.394	–
100	142.9	0.90	127.00	12.67	233	–	–	0.540	–	–
125	162.7	1.00	147.00	16.97	233	–	–	0.683	–	–
150	218.0	1.20	197.50	30.64	313	–	–	0.693	–	–

Tableau 13.4 Tubes médians en métal Duo (Flexible métal Duo): Dimensions et rejets de chaleur spécifiques des diamètres nominaux DN20 – DN50. Les données de Brugg pipesystems ont été prises en compte pour la création des tableaux:

Diamètre nominal	Tube intérieur moyen				Diamètre extérieur gaine protectrice en plastique (épaisseur d'isolation)			Rejets de chaleur spécifique par mètre de tracé		
	Diamètre extérieur	Épaisseur de paroi	Diamètre intérieur	Volume tube intérieur	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	25.5	0.3	22.00	0.38	111	–	–	0.156	–	–
25	34.0	0.3	30.00	0.71	126	–	–	0.181	–	–
32	43.8	0.4	38.90	1.19	142	–	–	0.224	–	–
40	54.5	0.5	48.50	1.85	162	–	–	0.251	–	–
50	66.5	0.5	60.00	2.83	182	225	–	0.293	0.215	–

Tableau 13.5 Tube médian en plastique: Dimensions et rejets de chaleur spécifiques des diamètres nominaux DN20 – DN150. Les données des fabricants suivants ont été prises en compte pour la création des tableaux: Brugg pipesystems et Isoplus.

Diamètre nominal	Tube intérieur moyen				Diamètre extérieur gaine protectrice en plastique (épaisseur d'isolation)			Rejets de chaleur spécifique par mètre de tracé		
	Diamètre extérieur	Épaisseur de paroi	Diamètre intérieur	Volume tube intérieur	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	25.0	2.30	20.40	0.33	75	90	–	0.264	0.235	–
25	32.0	2.90	26.20	0.54	75	90	–	0.321	0.279	–
32	40.0	3.70	32.60	0.83	90	110	–	0.332	0.284	–
40	50.0	4.60	40.80	1.31	110	125	–	0.341	0.307	–
50	63.0	5.80	51.40	2.07	125	140	–	0.378	0.340	–
65	75.0	6.80	61.40	2.96	140	160	–	0.405	0.356	–
80	90.0	8.20	73.60	4.25	160	180	–	0.429	0.380	–
100	110.0	10.00	90.00	6.36	160	180	–	0.557	0.476	–
125	125.0	11.40	102.20	8.20	180	–	–	0.567	–	–
150	160.0	14.60	130.80	13.44	250	–	–	0.511	–	–

Tableau 13.6 Tube médian en plastique Duo: Dimensions et rejets de chaleur spécifiques des diamètres nominaux DN20 – DN50. Les données des fabricants suivants ont été prises en compte pour la création des tableaux: Brugg pipesystems et Isoplus.

Diamètre nominal	Tube intérieur moyen				Diamètre extérieur gaine protectrice en plastique (épaisseur d'isolation)			Rejets de chaleur spécifique par mètre de tracé		
	Diamètre extérieur	Épaisseur de paroi	Diamètre intérieur	Volume tube intérieur	DS1	DS2	DS3	DS1	DS2	DS3
DN	mm	mm	mm	l/m	mm	mm	mm	W/(m K)	W/(m K)	W/(m K)
20	25.0	2.30	20.40	0.33	90	110	–	0.211	0.174	–
25	32.0	2.90	26.20	0.54	110	125	–	0.215	0.198	–
32	40.0	3.70	32.60	0.83	125	140	–	0.235	0.222	–
40	50.0	4.60	40.80	1.31	160	180	–	0.264	0.210	–
50	63.0	5.80	51.40	2.07	180	–	–	0.246	–	–

13.5 Rejets de chaleur spécifiques par mètre de tracé par conduite

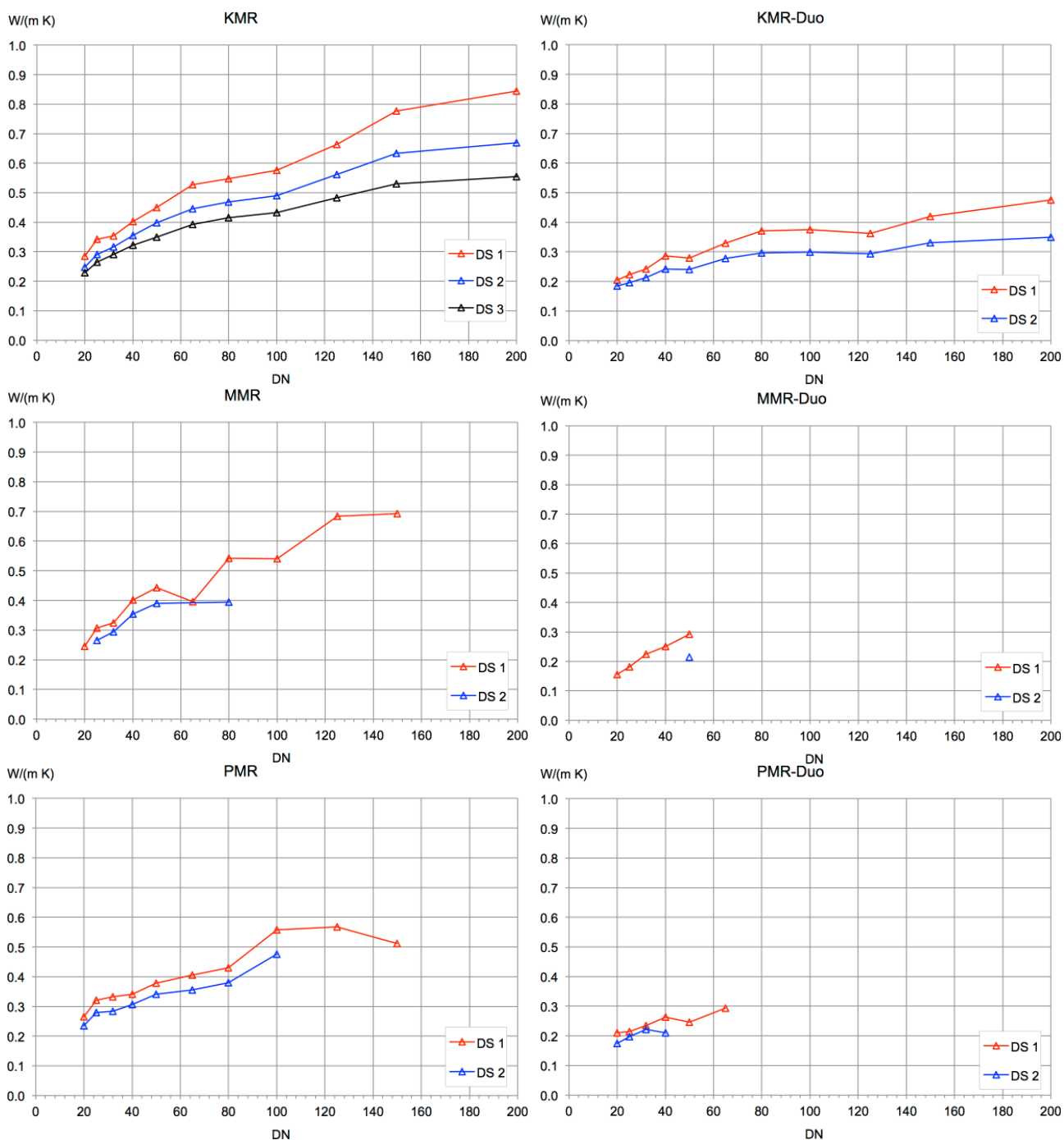


Fig. 13.6 Rejets de chaleur spécifiques par mètre de tracé de conduite jusqu'à DN200 pour des tubes pré-isolés en métal (KMR), tubes médians en métal (MMR) et tubes médians en plastique (PMR). Sur la page de droite se trouvent les modèles à tube double courants. Les tubes uniques ont été calculés conformément au chapitre 7.1.3. Les données relatives aux versions à tube double ont été extraites des informations concernant les produits des entreprises suivantes: Brugg Pipesystems, Isoplus et Logstor.

Les calculs pour les tubes uniques se basent sur les hypothèses suivantes:

- Conductivité thermique terre $\lambda_{B0} = 1.2 \text{ W/(m K)}$
- Conductivité thermique matériau d'isolation $\lambda_D = 0.03 \text{ W/(m K)}$
- Hauteur de recouvrement moyenne $h_{\bar{u}} = 0.6 \text{ m}$
- Espace libre entre les conduites $a = 0.2 \text{ m}$.

13.6 Prix indicatifs conduites de chauffage à distance

La Fig. 13.7 montre les prix indicatifs des coûts pour les conduites des tubes pré-isolés en métal, pose et génie civil inclus, conformément à l'ensemble dans les Tableau 13.7 et Tableau 13.7. Le génie civil se divise par ailleurs en coûts des tranchées sans surface solide (terrain ouvert) et pose sur surface solide (p. ex. rue, trottoir) devant être restauré après la fin du travail.

Les points de données dans la Fig. 13.7 représentent des réseaux de chauffage à distance réalisés en Suisse et proviennent d'une analyse de situation des réseaux de chauffage à distance de l'année 2012 (publiée dans [16] en 2014). Les points de données représentent les coûts d'investissement pour le réseau de transport de distribution de chauffage à distance par mètre de tracé selon le diamètre intérieur moyen des conduites de chauffage à distance utilisées. Le diamètre intérieur de conduite moyen a été calculé à l'aide d'une fonction mise en place sur la base de 134 réseaux de chauffage à distance en Suède [3]. Les points de données dans la Fig. 13.7 proviennent de réseaux de chauffage à distance qui sont presque exclusivement réalisés avec des conduites à tube pré-isolé en métal et qui sont devenus opérationnels entre 1984 et 2011.

Etant donné que les prix des matériaux et des travaux se modifient sans cesse et que le processus de planification entre étude préliminaire et mise en place des réseaux de chauffage à distance peut durer plusieurs années, d'éventuelles adaptations de coûts sont à prévoir durant la réalisation. Des différences saisonnières sont possibles notamment pour les travaux de génie civil. Par rapport aux conditions favorables, une hausse des coûts peut survenir en raison de situations spécifiques, notamment à cause d'une grande complexité du tracé des conduites (p. ex. pavés, traversée de rivières, autoroutes, voies ferrées).

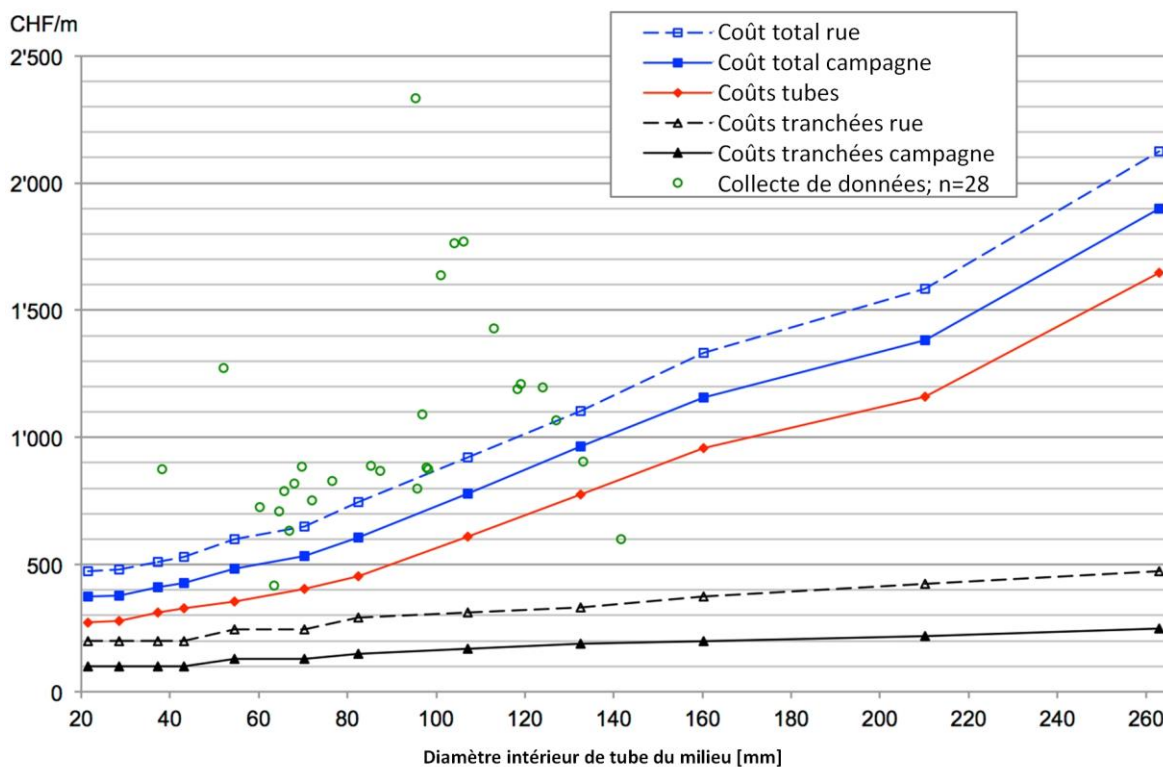


Fig. 13.7 Prix indicatifs pour tubes pré-isolés en métal (2009) de DN20 à DN250 divisés en coûts tubes et tranchées pour la pose sans surface solide et avec surface solide. Des données supplémentaires relatives à des réseaux de chauffage à distance existants issues d'une collecte de données effectuée en 2012 [16] sont mentionnées.

Tableau 13.7 Récapitulatif des prestations incluses dans les prix indicatifs du tableau 13.8 des conduites de chauffage à distance.

Matériau et pose	Travaux de fouille	Remarques
<ul style="list-style-type: none"> - Amenée et retour par mètre - 1/10 prix du coude - 5% prix de l'élément en T - 1/6 prix du manchon - 10% pour joints muraux, zones de dilatation, documentation des conduites et matériaux de soudure - 1/100 prix pour les systèmes de surveillance, collage et soudure des conduites - Essai de pression 	<ul style="list-style-type: none"> - Excavation selon documentation - 30% évacuation des matériaux d'excavation - Création du lit de sable - Enlèvement des conduites - Remblayage des tranchées - Restauration de la surface terrestre - Revêtement de chaussée 	DN20 – DN150 épaisseur d'isolation 3 DN200 – DN250 épaisseur d'isolation 2 Ne sont pas inclus dans le prix: <ul style="list-style-type: none"> - Radiographie des soudures - Déplacement des conduites de service industrielles - Etayer les fouilles - Régulation du trafic

Tableau 13.8 Prix indicatifs pour conduites de chauffage à distance (2009). Les valeurs indiquées en italique pour les Métal pré-isolé à partir de DN 300 sont des valeurs extrapolées. Il faut s'adresser le cas échéant au fabricant concernant les prix, car des dimensions de conduites à partir de DN 300, notamment en Suisse, sont rarement utilisées.

Diamètre nominal	Métal pré-isolé		Métal pré-isolé Duo		Flexible métal		Flexible métal Duo		Flexible plastique		Flexible plastique Duo	
	Cam-pagne	Rue	Cam-pagne	Rue	Cam-pagne	Rue	Cam-pagne	Rue	Cam-pagne	Rue	Cam-pagne	Rue
DN	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m	CHF/m
20	373	473	295	374	350	450	252	352	246	346	193	278
25	379	479	299	378	363	463	275	375	258	358	222	322
32	411	511	325	404	453	553	309	409	306	406	245	350
40	429	529	339	418	465	585	348	448	323	423	315	415
50	484	599	382	473	524	634	385	485	458	548	352	452
65	535	650	423	514	726	821	–	–	508	618	–	–
80	605	745	478	589	809	904	–	–	613	708	–	–
100	780	920	616	727	917	1.052	–	–	667	762	–	–
125	965	1.105	762	873	1.027	1.162	–	–	721	816	–	–
150	1.157	1.332	914	1.052	1.106	1.241	–	–	775	870	–	–
200	1.381	1.586	1.091	1.253	–	–	–	–	–	–	–	–
250	1.899	2.124	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
300	<i>2.417</i>	<i>2.662</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
350	<i>2.935</i>	<i>3.200</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
400	<i>3.453</i>	<i>3.738</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
450	<i>3.971</i>	<i>4.276</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
500	<i>4.489</i>	<i>4.814</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
600	<i>5.007</i>	<i>5.352</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
700	<i>5.525</i>	<i>5.890</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
800	<i>6.043</i>	<i>6.428</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
900	<i>6.561</i>	<i>6.966</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1.000	<i>7.079</i>	<i>7.504</i>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

14 Questionnaire pour un raccordement à un CAD

Vous trouverez le questionnaire aux deux pages suivantes.

Questionnaire - raccordement à un CAD

Distribution/émission de chaleur

Nb groupes de chauffage:

Description:

- Système d'émission de chaleur
- Chauffage au sol Temp. amenée/retour max. / °C
 - Radiateur Temp. amenée/retour max. / °C
 - Batterie de chauffe Temp. amenée/retour max. / °C
 - Inst. de ventilation °C
 - Avec RC Temp. amenée/retour max. /
 - Sans RC

Remarques:

Chauffage eau chaude avec CAD: Oui Non

Si oui, le chauffage de l'eau chaude se fait: Année Période de chauffage (en été p. ex. solaire)

Nb d'occupants:

- Type:
- Système d'écoulement
 - Réservoir avec échangeur de chaleur interne (p. ex. tubulaire)
 - Réservoir avec régulation de charge (échangeur de chaleur externe)
 -

Contenu du réservoir (volume): Litres

Pompe de circulation disponible: Oui Non

Remarques:

Rénovation

Intentions de rénovation au plan énergétique qui ne sont pas prises en compte dans les besoins en énergie ci-dessus.

Réalisation (année): Influence sur les besoins énergétiques:

- | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------|
| <input type="checkbox"/> Fenêtres | | % |
| <input type="checkbox"/> Isolation murs extérieurs | | % |
| <input type="checkbox"/> Isolation toit | | % |
| <input type="checkbox"/> Installation solaire pour le chauffage de l'eau chaude | | % |
| <input type="checkbox"/> Installation solaire pour chauffage eau chaude et chauffage suppl. | | % |
| <input type="checkbox"/> | | % |
| <input type="checkbox"/> | | % |

Remarques:

Date raccordement immédiat à moyen terme (5 ans) à long terme (10 ans) pas d'intérêt

Date de raccordement possible: (indiquer l'année)


















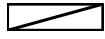
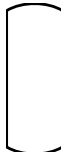
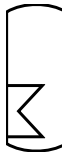
Annexes

- Plan de situation centrale thermique (site possible station de transfert)
- Plan de situation / schéma des raccordement domestique possibles
-
-
-

15 Symboles pour les installations

Dans les tableaux suivants, vous trouverez les symboles utilisés dans le présent Guide de planification: Les symboles

Tableau 15.1 Symboles utilisés selon SIA 410 [85]

Symbole	Description	Symbole	Description
	Vanne à trois voies motorisée		Filtre
	Vanne de passage motorisée		Indication de pression
	Vanne d'équilibrage avec points de mesure		Thermomètre
	Vanne de régulation indépendant de la pression différentielle (vanne combi)		Compteur d'énergie thermique
	Vanne anti-retour		Sonde (température et pression)
	Robinet d'arrêt		Pompe
	Pompe à jet avec appareil de réglage		Circuit de chauffage
	Vanne de sécurité à ressort		Régulateur
	Vidange		Echangeur de chaleur (échangeur de chaleur à plaques)
	Réservoir d'eau chaude		Réservoir d'eau chaude avec échangeur de chaleur interne

16 Symboles et indices

Symboles	Signification		Unité
	Français	Allemand	
A	Surface, superficie (S)	Fläche, Oberfläche	m ²
AD	Densité de raccordement (DR)	Anschlussdichte	MWh/(a m)
a	Facteur d'annuité	Annuitätsfaktor	%/a
a	Ecartement tubes annelés	Abstand Wellrohr	m
a	Espace libre entre les conduites	lichter Rohrabstand	m
c _p	Capacité thermique spécifique	spezifische Wärmekapazität	kJ/(kg K); J/(kg K)
d	Diamètre	Durchmesser	m
DN	Diamètre nominal (Nominal Diameter)	Nenndurchmesser	–
DS	Epaisseur d'isolation (EI)	Dämmstärke	–
E	Energie (E)	Energie	MWh, kWh
E	Module d'élasticité	Elastizitätsmodul	N/mm ²
EBF	Surface de référence énergétique (SRE)	Energiebezugsfläche	m ²
f	Facteur	Faktor	–
f _{el}	Facteur de pondération pour l'électricité (f _{el})	Gewichtungsfaktor für Elektrizität	–
g	Accélération due à la pesanteur	Fallbeschleunigung	m/s ²
g	Facteur de simultanéité (ks)	Gleichzeitigkeitsfaktor	–
H	Hauteur de refoulement	Förderhöhe	m; mWS
h	Hauteur, profondeur	Höhe, Tiefe	m
I	Coûts d'investissement	Investitionskosten	CHF
i	Taux d'intérêt du capital	Kapitalzinssatz	%/a
K	Coûts annuels (C)	Jährliche Kosten	CHF/a
k	Rugosité de la conduite	Rohrrauheit	mm
k	Coûts spécifiques (c)	spezifische Kosten	Ct/kWh
k _v	Valeur caractéristique du débit des vannes	Durchflusskennwert bei Ventilen	m ³ /s · √bar
k _{vs}	Valeur caractéristique du débit des vannes complètement ouvertes	Durchflusskennwert bei voll geöffnetem Ventil	m ³ /s · √bar
L	Longueur de tracé (amenée et retour parallèle)	Trassenlänge (Vor- und Rücklauf parallel)	m
L	Longueur de la conduite principale	Hauptrohrlänge	m
L _A	Longueur de déchargement	Ausladelänge	m
L	Longueur	Länge	m
m	Masse	Masse	kg
\dot{m}	Débit massique	Massenstrom	kg/s
M	Moment	Moment	Nm; Nmm
\dot{M}	Alimentation ultérieure du débit massique Expansion	Nachspeisemassenstrom Expansion	kg/s
n	Nombre; période de calcul	Anzahl; Kalkulationsdauer	–

Symboles	Signification		Unité
	Français	Allemand	
n	Période de calcul	Kalkulationsdauer	a
P	Puissance (en règle générale électrique)	Leistung (i.d.R. elektrisch)	kW
P	Prix	Preis	Ct/kWh
P _v	Autorité de la vanne	Ventilautorität	–
PS	Pression de service maximale	maximaler Druck	bar
p	Pression	Druck	bar, Pa, kPa
Δp	Différence de pression, chute de pression	Druckunterschied, Druckabfall	bar, Pa, kPa
Δp _{v100}	Chute de pression dans la vanne pour un débit de 100%	Druckabfall über dem Ventil bei 100 % Durchfluss	bar, Pa, kPa
Δp _{v0}	Chute de pression dans la vanne pour un débit 0%, lorsque qu'elle commence tout juste à s'ouvrir	Druckabfall über dem Ventil bei 0 % Durchfluss, wenn dieses gerade zu öffnen beginnt	bar, Pa, kPa
p _{var100}	Chute de pression sur la section à débit variable	Druckabfall über der Strecke mit variablem Durchfluss	bar, Pa, kPa
Q	Quantité de chaleur annuelle	Jährliche Wärmemenge	MWh/a, kWh/a
Q _h	Besoin spécifique en chaleur thermique	spezifischer Heizwärmebedarf	MJ/(m ² a), kWh/(m ² a)
Q _{ww}	Besoin de chaleur spécifique pour l'eau chaude	spezifischer Wärmebedarf für Warmwasser	MJ/(m ² a), kWh/(m ² a)
\dot{Q}	Puissance thermique	thermische Leistung	MW, kW
\dot{q}	Puissance thermique spécifique	spezifische thermische Leistung	W/m
$\dot{q}_{v,L}$	Perte de chaleur spécifique par mètre de tracé par conduite	Spezifischer Wärmeverlust pro Trassenmeter Rohrleitung	W/(m K)
r	Rayon	Radius	m
Re	Nombre de Reynolds	Reynolds-Zahl	–
R _e	Limite d'élasticité	Streckgrenze	N/mm ²
R _m	Résistance à la traction	Zugfestigkeit	N/mm ²
S	Facteur de sécurité	Sicherheitsfaktor	–
S _e	Coefficient de sécurité sur la limite d'élasticité	Sicherheitsfaktor auf Streckgrenze	–
S _m	Coefficient de sécurité sur la résistance à la traction	Sicherheitsfaktor auf Zugfestigkeit	–
s	Ecartement horizontal des tubes	horizontaler Rohrabstand	m
s	Epaisseur de paroi (conduite, cylindre)	Wandstärke (Rohr, Zylinder)	m
s _e	Epaisseur de paroi commandée	Bestell-Rohrwandstärke	m
s _v	Epaisseur de paroi déterminée par calcul	rechnerische Rohrwandstärke	m
T	Température, ligne partielle	Temperatur, Teilstrang	°C
T	Ligne partielle	Teilstrang	–
t	Temps	Zeit	h
ΔT	Ecart de température	Temperaturspreizung	K

Symboles	Signification		Unité
	Français	Allemand	
ΔT^*_{IST}	Ecart de température moyen (calculé) dans le réseau en K, lorsque le consommateur examiné est exploité avec un écart de température de référence	Mittlere (berechnete) Temperaturspreizung im netz in K, wenn der untersuchte Verbraucher mit Referenz-Temperaturspreizung betrieben wird	K
U	Coefficient de transmission thermique	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)
U	Etendue	Umfang	m
V	Volume	Volumen	m ³ , m ³ /a
ΔV	Variation du volume (expansion du volume)	Volumenänderung (Expansionsvolumen)	m ³ , m ³ /a
\dot{V}	Débit volumique	Volumenstrom	m ³ /s
W	Moment de résistance	Widerstandsmoment	N/mm ³
w	Vitesse d'écoulement	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
α	Coefficient de transfert de chaleur	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
α	Coefficient de dilatation thermique	Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K
γ	Coefficient de variation volumique	Volumenänderungskoeffizient	1/K
η	Rendement	Wirkungsgrad	%
η_a	Taux d'utilisation annuel	Jahresnutzungsgrad	%
λ	Coefficient de friction de la conduite de l'écoulement dans la conduite	Rohrwiderstandsbeiwert der Rohrströmung	–
λ	Conductivité thermique, inertie thermique	Wärmeleitfähigkeit, Wärmeleitwiderstand	W/(m K)
ρ	Densité	Dichte	kg/m ³
π	Pi, constante d'Archimède	Pi, Kreiszahl	–
τ	Heures d'exploitation à pleine charge	Vollbetriebsstunden	h/a
σ	Tension	Spannung	N/mm ²
ν	Viscosité cinématique	kinematische Viskosität	m ² /s
ν_N	Valeur du cordon de soudure	Schweisssnaht Wertigkeit	–
ζ	Coefficient de résistance installations	Widerstandsbeiwert Einbauten	–

Indices	Signification	
	Français	Allemand
A	Refroidissement	Abkühlung
Aus	Conception/dimensionnement (conc)	Auslegung
a	Année	Jahr
a	Externe	Aussen
B	Flexion (F)	Biegung
B	Equipements (Equi)	Betriebsmittel
Be	Exploitation (Expl)	Betrieb
Br	Combustible (Comb)	Brennstoff
Bo	Terrain (Sol)	Boden (Erdreich)

Indices	Signification	
	Français	Allemand
D	Matériau d'isolation (MI)	Dämmmaterial
DH	Maintien de la pression (MP)	Druckhaltung
DES	Station de surpression (SS)	Druckerhöhungsstation
Duo	Tube double, tube duo	Doppelrohr, Duo-Rohr
el	Electrique (él)	elektrisch
ex	Exergie	Exergie
hydr	Hydraulique	hydraulisch
i	Interne	Innen
i	Numérotation des lignes partielles ou raccordements domestiques	Nummerierung Teilstränge oder Hausanschlüsse
IST	Etat existant (EE)	Ist-Zustand
K	Capital (C)	Kapital
K	Chaudière (C)	Kessel
L	Conduites (posées en pleine terre)	Leitungen (erdverlegt)
L	Linéaire	linear
M	Gaine extérieure (G)	Mantelrohr
m	Moyen	Mittel
max	Maximal, maximum	Maximal, Maximum
min	Minimal, minimum	Minimal, Minimum
MV	Consommation supplémentaire (C_{suppl})	Mehrverbrauch
N	Nominal	Nenn
N	Réseau (Rés)	Netz
Nutz	Chaleur utile (C_{ut})	Nutzwärme
opt	Optimal	optimal
P	Pompe	Pumpe
PN	Pression nominale (Pressure Nominal)	Nennndruck (Pressure Nominal)
q	Chaleur	Wärme
R	Tube, tube médian (T)	Rohr, Mediumrohr
REF	Référence (réf)	Referenz
RL	Retour	Rücklauf
RS	Relatif à la statique de la conduite	Rohrstatisch
S	Electricité (coûts) (EI)	Strom (Kosten)
SP	Point le plus défavorisé	Schlechtpunkt
Sp	Réservoir (Rés)	Speicher
St	Statique	Statisch
T	Température	Temperatur
T	Ligne partielle	Teilstrang
tot	Total	Total

Indices	Signification	
	Français	Allemand
u	Inférieur (inf)	untere
U	Environnement (E)	Umgebung
U	Entretien et maintenance (E)	Unterhalt- und Servicearbeiten
Ü	Recouvrement (R)	Überdeckung
V	Perte (P)	Verlust
V	Contrainte équivalente (C_{eq})	Vergleichsspannung
Ver	Pose (Pose)	Verlegung
VL	Amenée (amenée)	Vorlauf
Vor	Précontrainte (Pré)	Vorspannung, Vorspann
VR	Amenée et retour (AR)	Vor- und Rücklauf
W	Eau (E)	Wasser
WA	Consommateur de chaleur (CC)	Wärmeabnehmer
WE	Générateur de chaleur (centrale thermique) (GC)	Wärmeerzeuger (Wärmezentrale)
WS	Colonne d'eau (CE)	Wassersäule
WV	Distribution de chaleur (DE)	Wärmeverteilung
WZ	Compteur d'énergie thermique (CE)	Wärmezähler
x	Valeur recherchée	gesuchte Grösse
zu	Fourni (four)	zugeführt
zul	Admissible (adm)	zulässig
0	Début, entrée	Anfang, Eingang
1	Fin, sortie	Ende, Ausgang

17 Glossaire

Terme	Signification
Accumulateur de chaleur	L'accumulateur de chaleur d'un réseau de chauffage à distance est souvent un réservoir non pressurisé rempli d'eau. Il permet de compenser les besoins en chaleur du réseau de chauffage à distance en couvrant les pics de consommation. Il emmagasine ensuite à nouveau la chaleur durant les heures creuses. Cela permet un dimensionnement plus petit et un fonctionnement optimisé de l'installation de production de chaleur. La taille du réservoir dépend de la taille de l'installation de production de - chaleur et de sa tâche d'accumulation. La capacité peut aller de quelques mètres cubes à plusieurs milliers de mètres cubes.
Besoins annuels en chaleur	Les besoins annuels en chaleur d'un consommateur correspondent aux besoins annuels d'énergie au point du transfert de chaleur. Dans le cadre d'un réseau de chauffage à distance, il s'agit des besoins annuels en chaleur au point de jonction entre la production de chaleur et la distribution de chaleur.
Biomasse	La biomasse regroupe toutes les substances végétales et animales. Dans le domaine des technologies énergétiques, toutes les substances biogènes peuvent en principe être utilisées comme source d'énergie. Dans le cadre du chauffage à distance, on utilise essentiellement le bois et les déchets compostables.
Caractéristique de charge	Représentation de la demande en puissance thermique en fonction de la moyenne journalière de la température extérieure.
Centrale de chauffage à distance	On entend par centrale de chauffage à distance une centrale thermique alimentant un réseau de chauffage à distance.
Centrale de cogénération	Centrale énergétique produisant à la fois de la chaleur et de l'électricité. Voir également Production combinée d'énergie électrique et thermique (couplage chaleur-force)
Centrale thermique Centrale de chauffage à distance	Centrale énergétique destinée à la production de chaleur.
Chaleur environnante	La chaleur environnante est une énergie renouvelable, naturelle et disponible partout. Cette énergie a cependant une température assez faible. Les sources de la chaleur ambiante sont l'air, la surface du sol, les nappes souterraines, les eaux lacustres et fluviales. Avec les pompes à chaleur, on peut élever le niveau de température et récupérer cette énergie. Cela suppose un apport d'énergie de haute qualité, en général sous forme d'électricité provenant d'une autre source.
Charge de base	En utilisant deux sources de chaleur, la puissance thermique demandée est répartie en une charge de base et une charge de pointe. La source de chaleur pour charge de base présente donc un nombre d'heures d'utilisation à plein rendement élevé, et la chaudière pour charge de pointe un nombre plus réduit.
Chauffage à distance	Le chauffage à distance, c'est l'approvisionnement en chaleur des abonnés, via des conduites et au moyen d'eau ou de vapeur, cette chaleur étant générée par une centrale. Les réseaux de chauffage à distance couvrent une large plage de puissance de raccordement: de moins de 100 kW à plus de 1 GW. La Statistique globale de l'énergie de la Confédération suppose également que le réseau de transport principal et de distribution sollicite des terres publiques et que la chaleur soit revendue à des tiers [11]. Les grands réseaux de chauffage d'une entité juridique (comme un grand lotissement) sont techniquement identiques à un réseau de chauffage à distance, mais ne sont pas considérés comme du chauffage à distance.
«Chauffage de proximité»	Pour les petits réseaux, on parle parfois également de chauffage de proximité. En Allemagne, ce terme fait référence au transfert de chaleur entre bâtiments d'une puissance comprise entre 50 kW et plusieurs mégawatts pour le chauffage et l'eau chaude [6]. Le label Minergie® utilise également le chauffage de proximité lorsque les installations de production de chaleur approvisionnent des bâtiments ou des ensembles de bâtiments sans pour autant qu'une revente à un tiers ne soit nécessaire [7]. Etant donné que la démarcation entre chauffage à distance et chauffage de proximité est relativement floue, le présent guide de planification n'emploie que le terme de chauffage à distance.
Chauffage à distance Chauffage urbain	Dans le cas où le générateur de chaleur d'un réseau de chaleur est un chauffage, celui-ci est aussi désigné comme chauffage à distance.
Chauffage central	Un chauffage central permet d'approvisionner un bâtiment en chaleur par un générateur de chaleur central.
Chauffage de proximité	Voir Chauffage à distance.
Chaufferie	La chaufferie fait le lien entre la station de transfert et l'installation domestique. Elle sert à ajuster les caractéristiques de la chaleur fournie à l'installation domestique en matière de pression, de température et de volume. On distingue deux types d'installations domestiques: celles à raccordement direct et celles à raccordement indirect.
Circuit primaire	Le circuit primaire désigne la partie du système dans laquelle circule le fluide caloporteur destiné au chauffage à distance.
Circuit secondaire	Le circuit secondaire désigne la partie du système dans laquelle circule le fluide caloporteur de l'installation domestique.
Classes d'isolation	L'épaisseur d'isolation représente la classe d'isolation thermique autour du tube médian. Il existe trois classes d'isolation pour les tubes médians en plastique composite, la classe 1 étant la moins performante et la classe 3 la plus performante. Il existe deux classes d'isolation pour les tubes médians en métal et en plastique, appelées version standard et version renforcée.
Coefficient de friction de la conduite, coefficient de résistance de la conduite	Indicateur (sans dimension) de calcul de la chute de pression d'un flux dans une conduite.
Coefficient de performance	Le coefficient de performance désigne le rapport entre chaleur produite par une pompe à chaleur sur une période d'observation prolongée et énergie électrique fournie sur cette période d'observation prolongée. Voir également Facteur de performance et Coefficient de performance annuel.
Coefficient de performance annuel (COP annuel)	Le coefficient de performance annuel désigne le rapport entre production de chaleur annuelle et électricité fournie en un an par une pompe à chaleur. Voir également Facteur de performance et Coefficient de performance.
Conduite de dérivation	Voir Conduite de distribution

Terme	Signification
Conduite de distribution	Les conduites de dérivation ou de distribution sont des sorties des conduites principales desservant les différents groupes de consommateurs.
Conduite de raccordement aux habitations	Conduite raccordant la station de transfert au réseau de distribution de chaleur.
Conduite principale	Conduite reliant la centrale thermique aux conduites de dérivation du réseau de distribution de chaleur (secondaires), ne comportant généralement aucun raccordement aux habitations. Autres termes équivalents: conduite principale ou conduite de transport, lorsque la centrale thermique est relativement éloignée de la zone d'approvisionnement.
Conduite sous-sol	La conduite sous-sol relie la conduite de raccordement aux habitations à la station de transfert.
Conduites de service industrielles	Cette notion désigne les canalisations publiques, les conduites d'eau, d'eaux usées et électriques d'une commune, d'une ville ou d'une entreprise.
Consommateur clé	Un consommateur clé est un client (ou client potentiel en phase de planification) dont la consommation de chaleur dans une zone évaluée est importante.
Consommateurs	Voir Consommateurs de chaleur
Consommateurs de chaleur Client	S'approvisionne en chaleur auprès d'un fournisseur de chaleur et paie la chaleur conformément aux conditions convenues contractuellement.
Contrat de fourniture de chaleur	Le contrat de fourniture de chaleur règle les relations entre le fournisseur de chaleur et le consommateur de chaleur. Généralement, le contrat de fourniture de chaleur contient en plus les éléments suivants: conditions générales (CG), prescriptions techniques relatives au raccordement et fiche des tarifs.
Couplage chaleur-force	Une installation de couplage chaleur-force (CCF) fonctionne au moyen d'une machine thermique telle qu'un moteur à combustion ou une turbine à vapeur pour produire de la force, qui sert le plus souvent à produire de l'électricité, et avec une utilisation simultanée des rejets thermiques du processus thermiques, de la chaleur utile. Les centrales thermiques à montage bloc désignent des installations de couplage chaleur-force (CCF) à moteurs ou petites turbines à gaz, alors que les centrales thermiques désignent les centrales exploitant les rejets thermiques.
Courbe annuelle de la température extérieure	La courbe annuelle de la température extérieure désigne la représentation graphique de la fréquence cumulée de la température extérieure en nombre de jours ou d'heures par an pour une station de mesures donnée. Elle correspond ainsi à une courbe de fréquence cumulée de la température extérieure.
Courbe annuelle des appels de puissance thermique	La courbe annuelle de la demande en puissance thermique s'obtient à l'aide de la caractéristique de charge et de la courbe annuelle de la température extérieure. Il s'agit d'une courbe de fréquence cumulée qui représente la demande en puissance thermique en fonction du nombre de jours ou d'heures par an.
Couverture de la charge de base	Unité de production de chaleur nécessaire pour couvrir la charge de base.
Couverture de la charge de pointe	Unité de production de chaleur nécessaire pour couvrir la charge de pointe. Celle-ci devrait présenter une large plage de réglage et pouvoir être rapidement mise sous et hors tension. En redondance complémentaire, la ou les chaudières de charge de pointe sont souvent de grandes dimensions, afin de pouvoir prendre le relais en cas de panne d'une ou plusieurs chaudières de charge de base.
Densité de consommation thermique	La densité de consommation thermique est la consommation annuelle de tous les bâtiments d'une zone d'approvisionnement en rapport avec la superficie.
Densité de la puissance thermique	La puissance thermique maximale prélevée sur une superficie.
Densité de puissance	Puissance maximale relative à une zone. Dans le cadre du chauffage à distance, connaître la densité de puissance thermique présente un intérêt.
Densité de raccordement	La densité de raccordement correspond à la chaleur fournie aux consommateurs par an et par mètre de tracé. Elle sert de valeur caractéristique à l'évaluation de la densité d'énergie de la distribution de chaleur et influe sur l'efficacité énergétique et la rentabilité du réseau. La densité de raccordement peut être calculée pour l'ensemble du réseau comme pour des lignes partielles.
Densité des besoins thermiques	La densité des besoins thermiques représente les besoins thermiques annuels de tous les bâtiments d'une zone d'approvisionnement en rapport avec la superficie.
Diamètre nominal DN	Donnée relative au diamètre de référence qui définit les dimensions et la compatibilité des composants. Le diamètre nominal fait partie de la désignation du composant, conformément à la norme EN ISO 6708, et n'est pas identique à la valeur numérique en millimètres.
Différence de température	Différence entre la température d'amenée et de retour. Dans le cadre d'un réseau de chauffage à distance, c'est la différence de température du côté primaire qui présente un intérêt.
Eau chaude	Le terme d'eau chaude est utilisé de manière différente dans la technique du bâtiment et la technique du chauffage à distance. Dans la technique du chauffage à distance, l'eau chaude désigne l'eau de circulation du réseau de chauffage à distance, lorsque la température est inférieure à 110°C, alors que l'on désigne l'eau de circulation supérieure à 110°C comme eau surchauffée. L'eau chaude du réseau de chauffage à distance ne doit pas présenter les qualités de l'eau potable et ne doit donc pas être confondue avec l'eau chaude du domaine de la technique du bâtiment. Dans la technique du bâtiment, le terme «eau chaude» est utilisé pour de l'eau potable chauffée qui selon les besoins est chauffée ou stockée dans des réservoirs d'eau chaude à environ 60°C. Pour distinguer l'eau potable chauffée de l'eau de circulation du réseau de chauffage à distance, on désignera dans ce présent manuel comme eau chaude sanitaire celle qui est traitée.
Eau chaude sanitaire	Voir Eau chaude

Terme	Signification
Eau froide	Eau froide potable dont la température n'a pas pour vocation à être augmentée.
Eau industrielles	Eaux destinées à un usage industriel ou domestique qui n'ont pas besoin d'être potables.
Eau potable	Selon la législation suisse sur les denrées alimentaires, l'eau potable est définie comme eau, soit en l'état, soit après traitement, destinée à la boisson, à la cuisson, à la préparation de denrées alimentaire ou au nettoyage d'objets usuels. L'eau potable est aussi utilisée pour les soins corporels et l'hygiène (eau des douches et bains).
Eau surchauffée	Le terme eau surchauffée, dans le domaine du chauffage à distance, désigne l'eau de circulation du réseau de chauffage à distance lorsque celle-ci présente une température supérieure à 110°C.
Echangeur de chaleur	Un échangeur thermique est un appareil qui permet de transférer l'énergie thermique d'un fluide chaud vers un autre plus froid.
Energie en ruban (Charge continue)	L'énergie en ruban correspond à la puissance requise sur une année, à savoir 8760 heures par an. L'énergie en ruban d'un réseau de chauffage à distance désigne les consommations indépendantes saisonnières plus les pertes de puissance en exploitation «énergie en ruban».
Expansion et maintien de la pression	Sous-système du système hydraulique (production et distribution de chaleur) qui absorbe les variations de volume d'eau chaude dont la température est comprise entre la minimale et la maximale, et qui garantit ainsi une pression largement constante (maintien de la pression).
Exploitation permanente	Mise à disposition et approvisionnement de chaleur aux consommateurs tout au long de l'année.
Exploitation saisonnière	Mise à disposition saisonnière et approvisionnement en chaleur des consommateurs principalement pendant l'hiver et la mi-saison.
Facteur de performance	Le facteur de performance d'une pompe à chaleur correspond au rapport entre puissance thermique produite et puissance électrique fournie. Il désigne une valeur à un instant T ou une valeur définie sur une courte période d'observation.
Fiche des tarifs	La fiche des tarifs fait partie intégrante du contrat de fourniture de chaleur et fixe les conditions de la fourniture de chaleur.
Fluide caloporteur	Fluide utilisé pour transporter la chaleur dans le réseau de distribution de chaleur (eau, vapeur ou huile thermique).
Fournisseur de chaleur	Approvisionne le consommateur de chaleur selon le contrat de fourniture de chaleur.
Graphique de pression, graphique de répartition de pression	Représentation de la distribution de pression au sein du réseau en fonction de la distance depuis la centrale thermique.
Heures annuelles d'exploitation	Nombre d'heures effectives par an au cours desquelles l'installation fonctionne. Les heures annuelles d'exploitation ne correspondent pas aux heures d'exploitation à pleine puissance: une heure d'exploitation à une puissance de 50% reste considérée comme une heure d'exploitation.
Installation domestique	L'installation domestique consiste en un système de répartition du bâtiment permettant de répartir l'eau chaude sanitaire ainsi que la chaleur ambiante et la chaleur générée par les processus.
Installation finale	L'installation finale du réseau de chauffage à distance prévue dans le cadre de la conception et des calculs.
Installations de production de chaleur	Un générateur de chaleur transforme de l'énergie finale en chaleur utile et transmet cette dernière à un fluide caloporteur.
Les prescriptions techniques de raccordement	Les prescriptions techniques relatives au raccordement (ou conditions techniques relatives au raccordement) règlent idéalement toutes les conditions techniques pertinentes telles que pression, température, matériel, équipement de mesure, facturation, etc. Celles-ci s'appliquent à la planification, au raccordement et à l'exploitation du réseau de chauffage à distance. Les prescriptions techniques relatives au raccordement font partie intégrante du contrat de fourniture de chaleur.
Local technique de raccordement aux habitations	Le local technique de raccordement aux habitations comprend la sous-station et l'organe d'arrêt principal.
Longueur du tracé	Longueur du tracé des conduites du raccordement principal, raccordement secondaire et raccordement domestique. Avec une conduite par circuit, amenée et retour, la longueur de la conduite correspond au double de la longueur du tracé.
Mise en place de conduites sans tranchée	La mise en place sans tranchée consiste à faire pénétrer, insérer, presser ou enfoncer les conduites pour les enterrer dans une cavité creusée dans la terre.
Modèle à tube double	Conduite d'amenée et de retour avec isolation thermique en mousse polyuréthane PUR dans tube plastique protecteur. Il existe des modèles rigides et flexibles, disponibles avec tube médian en acier ou plastique.
Nombre d'heures de marche à pleine charge	Le nombre d'heures de marche à pleine charge est la consommation énergétique annuelle divisée par la puissance thermique nominale. C'est un indicateur important pour le dimensionnement de l'installation d'un consommateur individuel ou du système global. Une heure de marche à pleine charge correspond par exemple à une heure de marche avec charge nominale ou deux heures de marche avec 50% de charge et vaut ce qui suit: nombre d'heures de marche à pleine charge ≤ nombre d'heures de marche annuelles.
Performances du réseau,	Les <i>performances maximales du réseau</i> désignent la puissance thermique évaluée devant être couverte par le réseau de chauffage à distance à son entrée. Elles correspondent à la demande en puissance thermique de l'ensemble des consommateurs multipliée par le facteur de simultanéité plus les pertes liées à la distribution de chaleur.
Performances maximales du réseau, Performances instantanées du réseau	Les <i>performances instantanées du réseau</i> désignent, dans le cas d'un fonctionnement régulier, la demande en puissance thermique instantanée de l'ensemble des consommateurs; elles peuvent toutefois être limitées (en cas de défaillance par exemple) par les performances de production de chaleur instantanées.

Terme	Signification
Point le plus défavorisé du réseau	Endroit sur le réseau présentant la plus faible pression différentielle entre amenée et retour. Cet endroit peut se déplacer sur le réseau en fonction de la demande en chaleur momentanée. Le point le plus défavorisé du réseau sert de référence à la conception d'une unité de pompage principale.
Pose en pleine terre	Pose en pleine terre de conduites de chauffage à distance dans un caniveau, un fossé ou sans tranchée.
Pression différentielle, pression différentielle du réseau	La pression différentielle du réseau désigne l'écart de pression constaté sur l'ensemble du réseau de chauffage à distance entre les pressions d'amenée et de retour.
Pression du réseau	On entend par pression du réseau la pression qui s'exerce dans les conduites de chauffage à distance.
Pression maximale	Pression ne pouvant être dépassée à aucun moment et en aucun point du réseau.
Pression minimale	À aucun moment et en aucun point du réseau la pression ne peut être inférieure à celle-ci.
Pression nominale PN	La pression nominale sert de valeur de référence au système de conduites. Selon les normes DIN, EN, ISO, la pression nominale est désignée par les lettres PN suivies d'un nombre indiquant la pression nominale en bars à température ambiante (20°C); cette donnée est exposée dans la norme EN 1333.
Profil géodésique du réseau, courbe d'altitude	Le profil géodésique du réseau désigne le tracé de l'altitude du réseau en mètres au-dessus de la mer.
Puissance de raccordement	La puissance de raccordement d'un réseau de chauffage à distance correspond à la somme des puissances de raccordement de tous les consommateurs de chaleur en tenant compte de la simultanéité, c'est-à-dire au produit de la somme des puissances de raccordement convenues de tous les consommateurs de chaleur et du facteur de simultanéité. Voir également Simultanéité et Facteur de simultanéité.
Puissance de raccordement convenue	Consommation de chaleur maximale prévue par le contrat pour un consommateur raccordé à un réseau de chauffage à distance.
Puissance maximale	Puissance nécessaire maximale à une température extérieure servant de référence lors de la conception.
Puissance thermique nominale	Puissance continue maximale pour laquelle une installation a été conçue conformément aux instructions du fabricant, sans limite de temps.
Redondance	Mise à disposition d'une unité fonctionnelle supplémentaire qui ne s'avère pas nécessaire en fonctionnement normal, afin d'augmenter la sécurité de fonctionnement.
Rejets de chaleur	Rejets de chaleur inévitables des installations de transformation d'énergie, ou entraînés par des processus chimiques. Les rejets de chaleur au cours d'un processus peuvent être transmis à d'autres processus. Le potentiel exploitable correspond à la quantité de chaleur générée sur l'année ainsi qu'au niveau de température des rejets de chaleur. Les sources de rejets de chaleur sont directement utilisables pour le chauffage à distance si leur température est supérieure à 70°C et si leur nombre d'heures d'utilisation à plein rendement est élevé.
Relevé de situation	Le relevé de situation comprend une analyse de la situation actuelle avec enregistrement des besoins en chaleur et de puissance thermique pour chauffage des locaux, eau chaude et chauffage de processus et comprend une analyse de la situation architecturale pour la mise en place du tracé et une analyse de la zone potentielle d'alimentation en chaleur.
Rendement	Le rendement d'une installation technique désigne le rapport entre l'énergie utile et l'énergie fournie. Dans des conditions stationnaires, sans effet de stockage, le taux d'efficacité peut aussi être déterminé comme le rapport entre la puissance utile et la puissance fournie. Dans le présent manuel, la notion de taux d'efficacité est utilisée pour une valeur à un instant T déterminée ou une valeur déterminée sur une courte période d'évaluation. Pour l'évaluation de la marche de l'installation sur une période d'observation plus longue, le taux d'utilisation de l'installation représente le rapport entre la puissance utile cumulée au cours de la période d'observation et la puissance fournie cumulée au cours de la période d'observation (voir aussi Taux d'utilisation)
Rendement de chaudière	Energie utile produite par une chaudière divisée par l'énergie fournie par le pouvoir calorifique du combustible. La détermination s'effectue dans des conditions stationnaires, sans effet de stockage, (p. ex. cas des foyers automatiques), soit par l'intermédiaire d'un procédé de combustion (p. ex. cas des foyers manuels).
Réseau de chauffage à distance	Un réseau de chauffage à distance est une installation de conduites comportant tous les équipements complémentaires nécessaires à l'approvisionnement en chaleur des consommateurs. Le transfert de chaleur peut se faire à l'aide d'eau ou de vapeur. Le fluide caloporteur circule de la source de chaleur vers le consommateur, pour retourner ensuite vers la source de chaleur, en circuit fermé. Ce circuit fermé constitue le réseau de chauffage à distance.
Réseau en boucle	Dans le cas d'un réseau en boucle, une ou plusieurs conduites sont raccordées à une conduite en anneau, qui permet d'améliorer la sécurité de l'approvisionnement.
Réseau en étoile	Les conduites partant d'un point d'injection se ramifient et sont alimentées par un seul côté.
Réseau maillé	Un réseau maillé est un réseau dont les lignes ou les circuits sont reliés entre eux par plusieurs points.
Rugosité de la conduite	Caractéristique d'une surface (ici la paroi interne de la conduite) indiquant la hauteur des aspérités en millimètres.
Rugosité des parois	Voir Rugosité des conduites
Séparation du réseau	La séparation du réseau désigne sa séparation en deux réseaux hydrauliques à l'aide par exemple d'un échangeur de chaleur ou d'un séparateur hydraulique. Les séparations du réseau entraînent des pertes énergétiques supplémentaires, tant sur le plan de la chaleur que de celui de la vitesse de circulation.

Terme	Signification
Simultanéité et facteur de simultanéité	La simultanéité décrit le fait que, au sein d'un groupement de nombreux consommateurs de chaleur, ces derniers n'obtiennent jamais tous en même temps la puissance thermique maximale. Le facteur de simultanéité est égal à 1 pour un consommateur de chaleur unique et est inférieur à 1 dans le cas de plusieurs consommateurs de chaleur; il correspond au rapport entre puissance consommée maximale supposée de tous les consommateurs et puissance de raccordement convenue totale de l'ensemble des consommateurs.
Sous-station	La sous-station se compose de la station de transfert et de la chaufferie.
Station de transfert	La station de transfert fait le lien entre la conduite de raccordement aux habitations et la chaufferie. Elle permet une fourniture de la chaleur conforme au contrat ainsi que la mesure de la consommation de chaleur.
Statique des conduites	Procédé de calcul utilisé dans le cadre de l'évaluation de la résistance des conduites ainsi que dans le cadre de la conception de conduites et de composants de canalisations.
Structure d'abonnés	La structure d'abonnés désigne une zone d'approvisionnement déterminée par des critères tels que la densité et la structure de construction, la densité de raccordement, les besoins, la simultanéité, etc.
Système d'information géographique (SIG)	Application de traitement de données destinée à l'enregistrement, la modification, l'organisation, l'analyse et la présentation de données spatiales. Dans le cadre de la planification des réseaux de chauffage à distance, un tracé s'établit en tenant compte de la situation géographique et des éventuels autres systèmes d'approvisionnement existants (eau, gaz, électricité, etc.). Le SIG peut également être utilisé afin d'estimer la demande énergétique et la demande de puissance à l'échelle locale.
Taux d'utilisation	Le taux d'utilisation est le rapport entre énergie utile produite sur une période d'observation prolongée et énergie fournie sur cette période d'observation. Cela correspond au rapport entre puissance utile cumulée de la période d'observation (p. ex. la chaleur produite cumulée du compteur de chaleur) divisée par puissance fournie cumulée de cette période d'observation (p. ex. pouvoir calorifique du combustible utilisé). Si la période observée s'étend sur un an, on parle de taux d'utilisation annuel. Si le rapport entre énergie utile et énergie fournie est déterminé pour une valeur instantanée ou sur une courte période d'observation, on parle de rendement (voir également rendement).
Taux d'utilisation annuel	Taux d'utilisation sur une année. Voir également Taux d'utilisation
Taux de raccordement	Le taux de raccordement désigne le rapport entre besoins en chaleur annuels des consommateurs raccordés sur une certaine zone et besoins en chaleur annuels de l'ensemble des consommateurs de cette zone. Pour les zones dans lesquelles les niveaux de consommation sont similaires, il correspond également à la proportion (en nombre) de consommateurs de chaleur raccordés.
Technique caniveau	Caniveaux en béton préfabriquées ou produites sur site, permettant de loger les conduites de chauffage à distance.
Technique de tranchées	Utiliser la technique caniveau consiste à mettre en contact direct avec la terre les conduites de chauffage à distance, dans des tranchées ouvertes. Il s'agit de la méthode de pose la plus fréquemment utilisée.
Température d'exploitation maximale autorisée	Température de service maximale autorisée sur une courte période de temps.
Température de fonctionnement continu maximale	Température de service maximale autorisée sans limite de temps.
Température départ primaire	Température du fluide caloporteur du système de chauffage à distance circulant dans le sens source de chaleur > consommateur.
Température départ secondaire	Température de l'eau chaude provenant de la station de transfert et acheminée vers les consommateurs de chaleur individuels. L'installation de chauffage posée chez le client est appelée secondaire, parce qu'elle implique généralement une séparation hydraulique du réseau de chauffage à distance.
Température échangeur de chaleur différentiel	Ecart entre les températures de retour primaire et secondaire au niveau de l'échangeur de chaleur de la station de transfert. Il s'agit d'une mesure qualitative du transfert de chaleur; elle doit être la plus basse possible.
Température retour primaire	Température du fluide caloporteur du système de chauffage à distance circulant dans le sens consommateur > source de chaleur.
Température retour secondaire	Température de l'eau de chauffage provenant des consommateurs de chaleur individuels et acheminée vers la station de transfert.
Températures du réseau	Les températures du réseau sont une donnée commune aux températures d'amenée et de retour du réseau, en degrés Celsius (80/50 p. ex.).
Tracé	Le tracé est la zone réservée à la pose des conduites du chauffage à distance.
Tube flexible en métal	Tube médian souple en acier avec isolation thermique en mousse polyuréthane PUR et gaine externe protectrice en plastique. Le tube médian en acier est généralement annelé.
Tubes pré-isolé avec enveloppe en acier	Tube médian rigide en acier avec gaine protectrice en acier. L'isolation thermique est principalement assurée par le vide réalisé entre le tube médian et la gaine.
Tubes pré-isolé en métal	Tube médian rigide en acier avec isolation thermique en mousse polyuréthane PUR et gaine externe protectrice en plastique.
Tubes pré-isolé en plastique	Tube médian souple en plastique avec isolation thermique en mousse polyuréthane PUR et gaine externe protectrice en plastique.
Types de bâtiments	Catégorisation des bâtiments selon leur conception, leur utilisation, leur âge... Exemples de catégorisation: maison individuelle/immeuble, bâtiment ancien/neuf, zone résidentielle/industrielle, distance entre chaque bâtiment.
Zones	Une zone potentielle d'approvisionnement en chaleur peut désigner une agglomération, un quartier, un secteur, un groupe de plusieurs grands consommateurs ou un grand consommateur unique. La répartition de chaque zone potentielle en différentes zones repose sur la densité de consommation de chaleur attendue des types de bâtiments, ou sur la situation géographique, telle que les routes, les lignes de chemin de fer, les cours d'eau, etc. Les zones individuelles peuvent simplement être considérées comme de grands consommateurs. La répartition d'une agglomération se fait à l'aide d'un plan et d'un cadastre, s'il en existe un.

18 Index

A

Accumulateur de chaleur.....	16, 176
Anergie.....	45
Appel d'offres	122
Appels de puissance thermique	18, 113, 156
Assurance	130
Autorité de la vanne	157, 158, 168

B

Besoin de chaleur	16
Besoin de chaleur,	113
Besoins annuels en chaleur	16, 20, 114, 182
Besoins en chaleur pour le chauffage	16, 114
Besoins énergétiques.....	19, 113
Besoins énergétiques pompes.....	144, 185
Bilan prévisionnel et compte de pertes et profits prévisionnel	117, 186
Biomasse	24
Branchement à étranglement.....	167, 174
Branchement en injection.....	167, 175
Branchement en mélange.....	167, 178

C

Calcul de la résistance	147
Calcul du réseau de conduite,.....	142
Catégories de liquides.....	99
Centrale de chauffage à distance.....	26, Voir Centrale thermique
Centrale de cogénération	37
Centrale thermique.....	52, 75, 85, 116, 119, 182
Chaleur environnante.....	11, 25
Charge de base.....	16, 20, 23, 26
Charge de pointe.....	16, 21, 115, 176
Charge minimum.....	21
Charges par nature	182, 183
Chaudière de charge de pointe	12, 87
Chaufferie.....	103, 156, 159
Circuit primaire	105, 159, 164, 180, 194
Circuit secondaire	105, 159, 164, 167, 174, 180, 195
Circuits de base	167
Classe de qualité du soudage.....	97
Coefficient de friction de la conduite	138, 205
Coefficient de performance	12, 22, 31
Coefficient de performance annuel	22, 31
Compensateur.....	153
Compensation de la dilatation	150
Compteur d'énergie thermique.....	157
Concept d'exploitation	130
Conception de la pompe	143
Conduite de dérivation	85, 141
Conduite de distribution.....	85
Conduite de raccordement domestique.....	85, 102
Conduite de service industrielles.....	93, 95
Conduite principale	85, 87, 141
Conduite sous-sol	102
Consommateur clé	113, 114, 119

Consommateur de chaleur	10, 17, 52, 115, 166, 190
Consommation d'énergie auxiliaire.....	14, 182
Contrat de fourniture de chaleur	105
Contrôle d'étanchéité.....	96
Contrôle de réussite	130
Contrôle du fonctionnement,	125
Coudes de dilatation;.....	93
Couplage chaleur-force (CCF)	12, 21, 26, 37
Courbe annuelle	18, 21
Courbe caractéristique de base exponentielle.....	168
linéaire	168
Courbe caractéristique de charge.....	16, 17, 18
Courbe caractéristique de charge (tubes médians en métal).....	113
Courbe caractéristique de régulation de la pompe ...	173
Courbe caractéristique des installations	143
Courbe courbe caractéristique des pompes	55, 143
Courbe de réseau.....	57
Coussins de dilatation	152
Coûts annuels	117, 184
Coûts de distribution de chaleur	13, 182
Coûts de remise en état	183, 184
Coûts de revient de la chaleur.....	75, 116, 184
Coûts d'investissement.....	52, 182
Coûts externes	186
Couverture de la charge de base	12
Curseur croix	154

D

Défaillance.....	129, 130
Démarrage,	125
Densité de consommation thermique	113
Densité de raccordement	19, 86, 116
Détermination de la capacité de charge	147
Détermination des contraintes	147
Diamètre nominal (DN).....	13, 75, 141
Distribution de chaleur Eau chaude.....	71
Eau surchauffée.....	70
Vapeur	69
Documentation	125
Durée d'utilisation	75, 183, 184

E

Eau chaude Technique du bâtiment	99, 163, 177
Technique du chauffage à distance	99, 100
Eau chaude sanitaire.....	11, 99, 163
Eau froide	99, 102, 165, 178
Eau potable	99, 163, 200
Eau surchauffée	99, 101
Eaux industrielles	99
Ecart de température.....	12, 14, 52, 132, 141, 190
Echangeur de chaleur	162, 163, 168, 174
Echangeur de chaleur;	103
Ensemble de l'installation	17, 113, 173
Epaisseur de paroi.....	147

Epaisseur d'isolation	14, 75, 132
Étape des travaux	113
Exécution	125
Exergie	11, 45, 69
Expansion	52
Exploitation.....	130
Exploitation permanente.....	16
Exploitation saisonnière	117, 136

F

Facteur de simultanéité	115
Fiche de tarifs.....	106
Fluide caloporteur	64, 67, 69, 156
Fonctionnement à faible charge	181
Fonctionnement à faible charge,	129
Fournisseur d'énergie.....	102, 105, 156, 180, 195

G

Générateur de chaleur	16, 85, 110, 132
Géodésique.....	61, 175
Graphique de pression	61
Groupe de circuit de chauffage à distance.....	60
Groupes de coûts.....	182

H

Hauteur de refoulement.....	54, 143, 169
Heures d'exploitation à pleine charge	16, 193
Heures de marche.....	17
Hydraulique	166

I

Installation domestique.....	103, 119, 159, 166, 175, 180
Installation finale	113, 141, 182
Intérêt au raccordement	114
Isolation thermique.....	156

L

Légionelles	11, 164, 179
Limite de chauffage	16, 53
Local technique de raccordement domestique.....	102

M

Maintenance.....	130, 183
Concept de maintenance.....	130
Contrat de maintenance	130
Maintien de la pression	61, 64, 104
Maître d'ouvrage	110, 125, 182
Manuel d'exploitation.....	127
Mesures d'optimisation.....	129
Méthode des annuités	184
Méthodes de pose.....	88
Mise en place de conduites	
Caniveau en béton	70, 77, 89, 152
De surface	88, 126, 133, 152
Posé à l'air libre	152
Pose en pleine terre.....	69, 75, 92
Posé en pleine terre.....	125, 134, 151
Précontrainte à froid	154
Sans tranchée	89, 92
Mise en service	125, 157

O

Offre d'énergie.....	117
Optimisation	128, 129
Optimisation de l'exploitation	128

P

Palier de guidage.....	154
Palier lisse	154
Passage mural.....	96
Performance du réseau	12
Perturbation du fonctionnement	125
Plan d'exécution	125
Plan d'affaires.....	113, 186
Planification préliminaire.....	119
Point fixe.....	96, 152, 154
Point fixe naturel.....	152
Point le plus défavorisé	58, 140
Polytuyau.....	152
Pompe de circuit de chauffage à distance ..	57, 143, 169
Pompes de circulation	54
Portée.....	154
Précontrainte	146
Prescriptions techniques de raccordement.....	106, 162
Pression de service	
maximale	62
Minimale	62
Pression différentielle du réseau	
Mesure.....	56, 59
Minimale	58
Régulation.....	56, 162, 169, 170
Sous-station	62
Pression du réseau.....	62, 159
Pression nominale (PN).....	61, 76, 84
Procès-verbal de réception.....	79, 126
Profondeur de tranchée.....	94, 95, 98
Puissance de raccordement	12, 105, 174
Puissance minimum	20
Purge et vidange	88

Q

Qualité de l'eau.....	99
-----------------------	----

R

Raccordement de bâtiment	96
Réception	110, 125
Recouvrement	94, 122
Redondance	21, 58, 105
Rejets de chaleur.....	11
Relevé de situation.....	113, 116
Remblayage des tranchées.....	98
Remise en état	98, 130, 182
Renchérissement.....	186
Rendement	22, 45, 144
Rendement de chaudière	12, 22, 23
Rentabilité	12, 182
Réseau en boucle.....	86
Réseau en étoile.....	86
Réseau maillé.....	86, 87
Réseaux Anergie.....	11, 71
Résistance à la compression.....	147

Robinetterie	79
Rugosité des conduites	138, 142, 205

S

Schéma hydraulique	106
Séparation du réseau	52, 64, 92
Servitude	94
Simultanéité	115
Solution standard	174
Soumission	123
Sous-station	62, 103, 156, 159
Station de transfert	12, 103, 122, 156, 190
Statique des conduites	93, 122, 146
Structure d'abonnés	59, 115
Structure des coûts	182
Support de conduite	153
Surface de référence énergétique	19, 114
Surveillance des fuites	75, 77, 122
Surveillance des travaux	125
Système Brandes	77
Système d'information géographique (SIG)	118
Système de conduites	75
Système d'indicateurs	77
Système Nordic	77

T

Taux d'utilisation	22
Taux d'utilisation annuel	22, 117, 186
Technique de localisation	
Technique de mesure de référence de résistance ..	78
Technique de mesure du temps de propagation de l'impulsion	78
Technique de pose	
Auto-précontrainte opérationnelle	152
Pose à froid	152
Précontrainte thermique	152
Température d'amenée ...	11, 52, 69, 117, 137, 159, 162
Température d'exploitation	
Maximum	75, 76, 84
Température d'exploitation continue	11, 73, 75
Température de conception	150
Température de pose	150

Température de référence relative à la statique des conduites	150
Température de retour	52
Température différentielle	122, 162
Température du réseau	11, 52, 62, 72, 190
Température retour	137, 162, 166, 174, 190
Teneur en énergie	12, 44
Thermographie	77
Tracé	
Aménagement du tracé	73, 85, 86, 113, 119
Bande de repérage du tracé	125
Longueur du tracé	116, 185
Plan du tracé	126
Planification du tracé	93
Section du tracé	185
Transfert	125
Travaux de puits	92, 96, 126
Tube double	74, 152
Tube médian en métal	73
Tube pré-isolé avec enveloppe en acier	153
Tube pré-isolé avec enveloppe en acier (SMR)	74
Tube pré-isolé en métal	72, 151
Tubes médians en métal	75
Tubes médians en plastique	73, 75
Tubes pré-isolés en métal	75
Types de bâtiments	113

U

Utilisation	19
-------------------	----

V

Vanne	81, 168
Vanne à passage	169
Vanne à trois voies	169
Vanne de réglage	167, 180
Vérification statique	149
Vitesse d'écoulement	13, 138, 141

Z

Zone d'approvisionnement en chaleur	113
Zones	87, 92, 113

19 Sources

19.1 Littérature

- [1] Wikipedia: Chaudes-Aigues, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaudes-Aigues> 16. Mai 2016
- [2] Collins, J. F.: The History of District Heating, District Energy onSite, April 1959, 154–161
- [3] Frederiksen, S.; Werner, S.: District Heating and Cooling, Studentlitteratur AB, Lund 2013, ISBN 978-91-44-08530-2
- [4] Wikipedia Commons: Fernwärme Leipzig, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:021_DDR_Fernwärme_Leipzig_1986.jpg 24. Mai 2016
- [5] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V.: Bau von Fernwärmenetzen, Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H – VWEW, Frankfurt am Main 1993, ISBN 3-8022-0.14-3
- [6] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V.: Technisches Handbuch Fernwärme, AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Frankfurt am Main 2013, ISBN 3-89999-039-0 3
- [7] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V.: AGFW-Hauptbericht 2010, Frankfurt am Main 2011
- [8] Bundesverband Fernwärmeleitungen e.V. BFW: Das praktische Montagehandbuch für wärmegeämmte Fernwärmeleitungen – Planen – Prüfen – Sichten, Bundesverband Fernwärmeleitungen e.V. BFW, Billigheim DE, 2. Auflage 2015, ISBN 978-3-00-048305-9
- [9] Euroheat & Power: Country by Country Statistics Overview 2013, Zugriff im Januar 2014, <http://www.euroheat.org/Statistics-69.aspx>
- [10] Wikipedia: Nahwärme, <https://de.wikipedia.org/wiki/Nahwärme>, 7. Dezember 2015
- [11] Association MINERGIE®: Aide à l'utilisation MINERGIE® et MINERGIE-P®, Minergie Suisse, Agence Suisse romande, état: janvier 2013
- [12] Zinko, H.; et al: Improvement of operational temperature differences in district heating systems, International Energy Agency – Implementing Agreement on District Heating and Cooling, IEA DHC/CHP, Annex VII 8DHC-05.03, Paris 2005
- [13] Nussbaumer, T.; et al: Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen – Vorstudie, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, Bern 2012
- [14] Nussbaumer, T.; Thalmann, S.: Influence of system design on heat distribution costs in district heating, Energy 101(2016) 496–505
- [15] Nussbaumer, T.; Thalmann, S.: Einfluss von Auslegung und Betrieb auf die Wirtschaftlichkeit von Fernwärmenetzen, 13. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich 12.9.2014, Verenum Zürich 2014, ISBN 3-908705-25-8
- [16] Thalmann, S.; Nussbaumer, T.: Ist-Analyse von Fernwärmenetzen, 13. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich 12.9.2014, Verenum Zürich 2014, ISBN 3-908705-25-8
- [17] Thalmann, S.; Jenni, A.; Nussbaumer, T.: Optimierung von Fernwärmenetzen, 14. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich 16.9.2016, Verenum Zürich 2016, ISBN 3-908705-31-2, 153–172
- [18] Office fédéral de l'énergie Statistique globale suisse de l'énergie 2015, Berne 2016
- [19] Sres, A. ; Nussbaumer, B.: Livre blanc - Stratégie ASCAD, rapport final phase 2: Analyse SIG et étude des potentiel, Association suisse du chauffage à distance ASCAD, Niederrohrdorf 2014
- [20] Felsmann, C.; Dittmann, A.; Richter, W. et al.: *LowEx Fernwärme, Multilevel District Heating*, Zusammenfassung, Technische Universität Dresden, TUDpress, Dresden 2011, ISBN 978-3-942710-15-2
- [21] QM Chauffages au bois: Manuel de planification. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2ème édition 2008. ISBN 978-3-937441-94-8.
- [22] QM Chauffages au bois: Solutions standard – Partie I. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2ème édition élargie 2010. ISBN 978-3-937441-92-1
- [23] QM Chauffages au bois: Guide QMmini - Version Suisse, Groupe de travail Chauffages au bois 1ère édition, janvier 2012
- [24] Nussbaumer, T.: Verbrennung. In: Kaltschmitt. M., Hartmann, H. (Hrsg.), Energie aus Biomasse, Springer, Berlin 2001, ISBN 3-540-64853-42001, 287–426
- [25] Ordonnance du 16 décembre 1985 sur la protection de l'air (OPair) , état le 1er août 2016, article 814.318.142.1, www.admin.ch
- [26] Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (Ordonnance sur les déchets, OLED) du 4 décembre 2015, valable dès le 1er janvier 2016 (état le 19 juillet 2016), article 814.600, www.admin.ch
- [27] Nussbaumer, T.: Entwicklungstrends der Holzenergie und ihre Rolle in der Energiestrategie 2050. Schweiz Z Forstwesen 164 (2013) 12, 389–397
- [28] QM Chauffages au bois: FAQ 36: Nouvelle classification des combustibles et des dimensions de particules sur la base de la norme EN ISO 17225-1:2014 et de la norme EN ISO 17225-4:2013 www.qmholzheizwerke.ch, février 2016
- [29] AWEL: Heizen und kühlen mit Abwasser, AWEL-Standard vom 12.6.212 (Rev. Juli 2014).
- [30] Kobel, B.: Récupération de la chaleur résiduelle des eaux usées pour les réseaux de chaleur à distance de proximité 11. Forum du chauffage à distance 2018, CAD, 26.1.2012, Bienne
- [31] SuisseEnergie: Chauffer et rafraîchir grâce aux eaux usées. Article 805.208.F, Berne 2016, www.energieschweiz.ch

- [32] SuisseEnergie: Sonnenwärme – Kosten und Kennzahlen. EnergielInnovation Nr. 33, Bern 2016, www.energieschweiz.ch
- [33] Huber, A.: Manuel pour le logiciel EWS version 5.0 - Calcul des sondes géothermiques Huber Energietechnik, Zürich 2016
- [34] Sterner, M.; Stadler, I.: Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg 2014, ISBN 978-3-642-37379-4
- [35] Hauer, A.; Hiebler, S.; Reuss, M.: Wärmespeicher, Fraunhofer IRB Verlag, 5. Auflage, Stuttgart 2013, ISBN 978-3-8167-8366-4
- [36] Mangold, D.; et al: Technisch-wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung, Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0329607N, Steinbeis Forschungsinstitut, Stuttgart 2012
- [37] Schmidt, T.: Grosse saisonale Wärmespeicher, 11. Fernwärme Forum – Wärme- und Kälteversorgung in der Energiestrategie Schweiz, Verband Fernwärme Schweiz, Biel 2012
- [38] BWK: Leuchtturmprojekt in Dänemark –Saisonaler Erdsonden-Wärmespeicher, BWK Band 64, Seite 17-18, 2012
- [39] Hoffstede, U.; et al: FLEXHKW – Flexibilisierung des Betriebes von Heizkraftwerken, Fraunhofer-Institut Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Kassel 2016
- [40] Winter, W.; et al: Untersuchungen der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen, Euroheat & Power, 09/2001 und 10/2001
- [41] Winter, W.; et al: Hydraulische Rohrrauigkeit von Stahlmediumrohren für Fernwärmenetze, Euroheat & Power, Volume 29, 05/2000, Seite 24-33
- [42] Thorsen, J. E.: Minergie n'exclut pas le chauffage à distance - Le chauffage à distance dans la société sobre en énergie, n°13 Forum du chauffage à distance, Palais des Congrès, Bienne 29 janvier 2014, Association suisse du chauffage à distance, Niederrohrdorf 2014
- [43] Dötsch C.; Taschenberger J.; Schönberg I.: Leitfaden Nahwärme, Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT-Schriftenreihe Band 6, Fraunhofer IRB Verlag Germany 1998, ISBN 381675186
- [44] Glück, B.: Heizwasser Netze für Wohn- und Industriegebiete, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1. Auflage 1985, ISBN 3-8022-0095-0
- [45] Glück, B.: Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung – Druckverluste, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1. Auflage 1988, ISBN 3-345-00222-1
- [46] Böswirth, L.: Technische Strömungslehre, 7. Auflage, Vieweg, Wiesbaden 2007, ISBN 978-3-8348-0272-9
- [47] Idelchik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, Beggel House, Danbury, 4. Auflage 2007, ISBN 978-1-56700-251-5
- [48] VDI-Wärmeatlas, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006, 10. Auflage
- [49] Wagner, W.: Rohrleitungstechnik, Vogel Buchverlag, Würzburg, 11. Auflage 2012, ISBN 978-3-8343-3283-7
- [50] Wagner, W.: Festigkeitsberechnungen im Apparate- und Rohrleitungsbau, Vogel Buchverlag, Würzburg, 8. Auflage 2012, ISBN 978-3-8343-3272-1
- [51] Oberhammer, A.: Die längste Fernwärmeleitung Österreichs – Bericht über die Planung, den Bau und die Qualitätssicherung, 5. FGW Fernwärmeforum, Congress Center Villach 17.-18.03.2010, Fachverband der Gas- und Wärmeversorgungsunternehmen 2010
- [52] C.A.R.M.E.N. e.V. (Hrsg.): So klappt's mit dem Wärmeliefervertrag – Was bei der Vertragsgestaltung zu beachten ist, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing, Download von www.carmen-ev.de am 28.10.2015
- [53] C.A.R.M.E.N. e.V. (Hrsg.): Preisanpassungsklauseln und Preisindizes, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing 2013
- [54] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V.: Leitfaden zur Kalkulation und Änderung von Fernwärmepreisen, AGFW e.V., Frankfurt 2013, ISBN 3-89999-028-5
- [55] Energie-bois Suisse: Contrat-type de fourniture de chaleur - Chauffage à bois automatique, Energie-bois Suisse, Zurich 2002
- [56] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V.: Hausanschlüsse an Fernwärmenetze, AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Frankfurt am Main 2004, ISBN 3-89999-002-1
- [57] isoplus Fernwärmetechnik GmbH: Planungshandbuch, Rosenheim, 6. Auflage 2011
- [58] Bundesgerichtshof BGH VIII ZR 229/88: Begriff der Fernwärme, Urteil vom 25.10.1989, NJW Heft 18/1990, Seite 1181
- [59] Winkens, H.P.: Heizkraftwirtschaft und Fernwärmeversorgung, Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H – VWEW, Frankfurt am Main 1998
- [60] Leemann, R.: Analyse du rendement énergétique de processus industriels, programme d'impulsion RAVEL., Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, septembre 1992
- [61] Müller, A.; Walter, F.: RAVEL, une économie d'argent: Guide pratique pour les calculs de rentabilité, programme d'impulsion RAVEL, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne 1994
- [62] Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI in der Fassung vom 10.07.2013, in Kraft getreten am 17.07.2013
- [63] Wirtschaftskammer Österreich: Unverbindliche Kalkulationsempfehlung für Ingenieurleistungen – Leistungsbild Maschinenbau, Fachverband Technische Büros – Ingenieurbüros, Wien 2007
- [64] 941.210: Ordonnance sur les instruments de mesure (OIMes), du 15 février 2006 (état le 1er octobre 2015)

- [65] 941.231: Ordonnance du DFJP sur les instruments de mesure de l'énergie thermique, du 19 mars 2006 (état le 1er janvier 2013)
- [66] 819.121: Ordonnance sur la sécurité des équipements sous pression (Ordonnance sur les équipements sous pression), du 20 novembre 2002 (état le 1er juillet 2015)
- [67] 817.022.102: Ordonnance du DFI sur l'eau potable, l'eau de source et l'eau minérale du 23 novembre 2005 (état le 1er janvier 2014)
- [68] Druckgeräte Richtlinie (DGRL) 97/23/EG – Leitlinien, Download von <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/5202/attachments/1/translations/de/renditions/native>, am 10. Februar 2016
- [69] De Euw, R.; et al: Gebäudetechnik – Systeme integral planen; Fachhochschule Nordwestschweiz – Institut Energie am Bau, Windisch, Oktober 2012, ISBN 978-3-905711-18-9
- [70] Betschart, W.: Hydraulik in der Gebäudetechnik – Wärme und Kälte effizient übertragen, Faktor Verlag, Zürich, 1. Auflage 2013, ISBN 978-3-905711-23-3
- [71] La Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK): Modèle de prescriptions énergétiques des cantons MoPEC, publication 2014, Berne, janvier 2015
- [72] Verordnung (EG) Nr. 641/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von externen Nassläufer-Umwälzpumpen und in Produkte integrierter Nassläufer-Umwälzpumpen
- [73] Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren
- [74] Fiches techniques Topmotors: Fiche technique 23 - pompes www.topmotors.ch, novembre 2012
- [75] OEne: Ordonnance sur l'énergie (OEne) du 7 décembre 1998 (730.01), état le 1er juin 2015, Berne
- [76] RPC: Directive relative à la rétribution du courant injecté à prix coûtant (RPC), Article 7a LEne, Biomasse annexe 1.5 LEne, état le 1er juin 2015, Berne
- [77] Ordonnance sur les travaux de construction OTConst: Ordonnance sur la sécurité et la protection de la santé des travailleurs dans les travaux de construction, (832.311.141), du 29 juin 2005, état le 1er novembre 2011, Berne
- 19.2 Normes et directives**
- [78] CAN: CAN Catalogue des articles normalisés, Centre suisse d'études pour la rationalisation de la construction - CRB, Zurich
- [79] Règlement SIA 103:2014: Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils, Zurich: Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA 2014
- [80] Règlement SIA 108:2014: Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs mécaniciens et électriciens, ainsi que des ingénieurs spécialisés dans les installations du bâtiment, Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, Zurich 2014.
- [81] Règlement SIA 380-1:2009: L'énergie thermique dans le bâtiment, Zurich: Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA 2009
- [82] Règlement SIA 384 201:2003: Installations de chauffage dans des bâtiments, méthode de calcul des besoins énergétiques et des rendements des systèmes, Zurich : Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA 2003
- [83] Règlement SIA 385/1:2011: Installations d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments – Bases générales et exigences, Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, Zurich 2011.
- [84] Règlement SIA 385/2:2015: Installations d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments – Besoins en eau chaude, exigences globales et dimensionnement, Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, Zurich 2015.
- [85] Règlement SIA 410: Désignation des installations du bâtiment - Signes conventionnels, Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, Zurich 1986.
- [86] SUVA: Ordonnance sur les travaux de construction – Commentaires et schémas, SUVA, Lucerne octobre 2012
- [87] SUVA: Liste de contrôle Fouilles et terrassements, SUVA, Lucerne juin 2013
- [88] Directive SSIGE W3/E1: Protection contre les retours d'eau dans les installations sanitaires, Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE), Zurich 2013
- [89] Notice technique W10002f: Legionella et eau potable - à quoi faut-il faire attention? Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE), Zurich
- [90] DVGW-Merkblatt W 332 – Auswahl, Einbau und Betrieb von metallischen Absperrarmaturen in Wasserverteilungsanlagen, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches DVGW, Bonn, November 2008
- [91] Directive SICC BT102-01: Qualité d'eau pour le remplissage des circuits de Chauffage, Société suisse des ingénieurs en technique du bâtiment, Schönbühl, 2ème publication 2012-08
- [92] NF 640535C:2004-12: Fouilles en tranchées; prescriptions d'exécution

- [93] NF EN 13480:2013-02: Tuyauteries industrielles métalliques
- [94] NF EN 13941:2010-10: Conception et installation des systèmes bloqués de tuyaux pré-isolés pour les réseaux enterrés d'eau chaude
- [95] NF EN ISO 9001:2015: Systèmes de management de la qualité - Exigences
- [96] NF EN 253+A2:2016: Tuyaux de chauffage urbain - Systèmes bloqués de tuyaux pré-isolés pour les réseaux d'eau chaude enterrés directement - Tube de services en acier, isolation thermique en polyuréthane et tube de protection en polyéthylène
- [97] NF EN 14597:2012 – SIA 386.050: Dispositifs de régulation et de limitation de température pour les systèmes générateurs de chaleur
- [98] NF EN 12828+A1:2014 – SIA 384.101+A1: Systèmes de chauffage dans les bâtiments - Conception des systèmes de chauffage à eau
- [99] NF EN 1333:2006-05: Brides et leurs assemblages - Composants de réseaux de tuyauteries - Définition et sélection des PN
- [100] AGFW FW 401 Teil 1-18 – Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt 2007
- [101] AGFW FW 410 – Stahl-Mantelrohre (SMR) für Fernwärmeleitungen, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2011
- [102] AGFW FW 411 – Fernwärmeleitungen in Gebäuden und Bauwerken mit Mediumrohren aus Stahl, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2007
- [103] AGFW FW 433 – Mindestanforderungen für die sicherheitstechnische Ausführung neu zu erstellender Fernwärmeschächte, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2013
- [104] AGFW FW 442 – Druckhaltung in Heizwasser-Fernwärmenetzen, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2011
- [105] AGFW FW 515 – Technische Anschlussbedingungen – Heizwasser (TAB-HW), Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2015
- [106] AGFW FW 601 – Unternehmen zur Errichtung, Instandsetzung und Einbindung von Rohrleitungen für Fernwärmesysteme – Anforderungen und Prüfungen, Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft AGFW e.V., Frankfurt am Main 2016
- [107] DIN 18195:2015-06: Abdichtung von Bauwerken Teil 1-10
- [108] DIN EN 12953-1:2012-05: Grosswasserraumkessel – Teil 1: Allgemeines
- [109] DIN 4124:2012-1: Baugruben und Gräben – Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten
- [110] DIN 16271:2004-07: Absperrventile PN 250 und PN 400 mit Prüfanschluss für Druckmessgeräte
- [111] DIN 43772:2000-03: Leittechnik - Metall-Schutzrohre und Halsrohre für Maschinen-Glasthermometer, Zeigerthermometer, Thermoelemente und Widerstandsthermometer - Masse, Werkstoffe, Prüfung
- [112] DIN 18012:2008-05: Haus-Anschlusseinrichtungen – Allgemeine Planungsgrundlagen
- [113] DIN EN 60034-30-1:2014-12: Drehende elektrische Maschinen – Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code) (IES 60034-30-1:2014 Deutsche Fassung)
- [114] DIN EN 12266-1:2012-06: Industriearmaturen – Prüfung von Armaturen aus Metall – Teil 1: Druckprüfungen und Annahmekriterien – Verbindliche Anforderungen
- [115] DIN 4747-1:2003-11: Fernwärmeanlagen – Teil 1: Sicherheitstechnische Ausrüstung von Unterstationen, Hausstationen und Hausanlagen zum Anschluss an Heizwasser-Fernwärmenetze
- [116] VDI 2036:2009-11: Gebäudetechnische Anlagen mit Fernwärme
- [117] VDI 2067 Blatt 1:2012-09: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung
- [118] VDI 3733:1996-07: Geräusche bei Rohrleitungen
- [119] AD 2000 Regelwerk, Beuth-Verlag, Berlin
- [120] Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL), Merkblatt-Nr. 67 – Planung von Biomasseheizwerken und Nahwärmenetzen, Wien, 3. Auflage 2016
- [121] AVBFernwärmeV: Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme, Berlin 2010



**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur



chauffage à distance
l'énergie du confort

