

Rapport final, 20 septembre 2019

# « Réseaux thermiques »

## Critères de décision pour le choix du système Phase II

**Auteurs**

Sven Trecco, eicher+pauli Zürich AG, chef de projet

Ricardo Da Silva, eicher+pauli Zürich AG

Stefan Gemperle, eicher+pauli Zürich AG

**La présente étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie.  
La responsabilité du contenu incombe exclusivement aux auteurs.**

**Adresse**

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

## Contenu

1	Symboles et abréviations .....	4
2	Résumé .....	5
3	Situation initiale .....	8
3.1	Objectif du lot de travail .....	8
3.2	Procédure .....	9
3.3	Question .....	9
3.4	Limites .....	9
4	Approvisionnement en froid futur .....	10
5	Bases .....	12
6	Prise en compte des interfaces .....	13
7	Description du projet .....	13
7.1	Source de chaleur .....	13
7.2	Utilisation des bâtiments .....	13
7.3	Périmètre .....	13
7.4	Besoins en énergie et en puissance .....	15
7.5	Production de chaleur eau chaude sanitaire .....	17
7.6	Densité thermique linéaire .....	18
7.7	Demande de températures .....	18
7.8	Simultanéité .....	18
7.9	Couverture de pointe fossile .....	19
7.10	Dimensionnement des éléments de l'installation .....	19
7.11	Pertes de distribution .....	20
7.12	Récupération de chaleur .....	20
7.13	Redondance .....	20
7.14	COP (WP-Esti) pour le chauffage des locaux .....	20
7.15	Concepts d'installations (variantes) .....	20
8	Rentabilité et écologie .....	34
8.1	Bases du calcul économique et écologique .....	34
8.2	Investissements $\pm 25\%$ .....	34
8.3	Durée d'utilisation .....	36
8.4	Frais de maintenance et de réparation .....	36
8.5	Coûts annuels .....	36
8.6	Coûts de revient .....	38
8.7	Écologie .....	39
9	Conclusion .....	40
10	Perspectives .....	42
11	Annexe .....	43

## 1 Symboles et abréviations

ECS	Eau chaude sanitaire
CL	Chauffage des locaux
FC	Froid de confort
FP	Froid de processus
TPL	Heures à pleine charge
Trm	Tracé en mètres (aller et retour)
K	Kelvin
ES	Eaux souterraines
COP	Coefficient de performance annuel
SIG	Système d'information géographique
PAC	Pompe à chaleur
NH3	Ammoniac
HFO	Hydrofluorooléfines
ECP	Échangeur de chaleur à plaques

## 2 Résumé

L'objectif de ce lot de travail est de trouver une réponse à la question suivante: quel système de distribution et d'approvisionnement (centralisé, centralisé et décentralisé, uniquement décentralisé, température du réseau, nombre de conduites) est économiquement et écologiquement plus avantageux pour les réseaux thermiques en fonction du profil du besoin?

Un quartier avec des conditions proches de la réalité en ce qui concerne le réseau thermique a été choisi comme étude de cas. Une nappe phréatique a été choisie comme source de chaleur. Le quartier comprend 8 édifices administratifs construits selon un standard qui répondent aux exigences du MoPEC 2014. Les besoins en énergie et en puissance pour le chauffage et le refroidissement ont été évalués selon la norme SIA 2024. La différence recensée entre le besoin en chaleur et le besoin en puissance par rapport à la norme a été ajustée grâce à des valeurs comparatives obtenues par des projets réalisés.

En raison de son faible besoin en chaleur, l'eau chaude sanitaire (ECS) est directement générée par une résistance électrique de manière décentralisée. Les appoints par sources fossiles n'ont pas été considérés dans l'étude en raison des basses températures aller requises. Pour le chauffage centralisé, des pompes à chaleur à l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) ont été sélectionnées. En revanche pour le chauffage décentralisé, des pompes à chaleur HFO (hydrofluoroléfiniques) ont été utilisées.

En fonction de ces modalités, trois variantes robustes ont pu être conçues:

Variantes		4 conduites	2 conduites	Anergie
Chauffage	centralisé	X	X	
	décentralisé			X
Eau chaude	centralisée			
	décentralisée	X	X	X
Froid de confort	centralisé	X	X	X
	décentralisé			
Froid de processus	centralisé	X	X	X
	décentralisé		X	
Flux de fluide	dirigé	X	X	
	non dirigé			X
Flux d'énergie	unidirectionnel	X	X	
	bidirectionnel			X
Sous-stations	direct			X
	indirect	X	X	
Nombre de conduites	2 conduites		X	X
	4 conduites	X		

Sur cette base, les investissements ont été estimés avec une incertitude de  $\pm 25 \%$  et l'énergie finale des variantes a été calculée. La rentabilité a été évaluée à partir des coûts annuels et l'écologie en fonction du besoin énergétique primaire et des équivalents d'émissions de CO<sub>2</sub>.

L'analyse montre que pour les coûts annuels, la variante à 2 conduites (change over) est la moins chère mais la moins flexible. La variante à 4 conduites avec une distribution classique dirigée atteint des résultats presque identiques (+2 % des coûts). La variante anergie représente la solution la moins attractive (+11 % des coûts).

Les résultats écologiques sont proportionnels à la consommation énergétique. C'est pourquoi la variante à 4 conduites est la plus avantageuse en ce qui concerne le CO<sub>2</sub> et l'énergie primaire.

Le coût de la chaleur et du rafraîchissement se situe pour toutes les variantes entre 16,3 et 19,2 cts/kWh et cela malgré une couverture complète de la puissance par les pompes à chaleur. Ces chiffres se situent dans une fourchette de rentabilité acceptable, principalement grâce à la vente de froid.

## Zusammenfassung

In diesem Arbeitspaket soll eine Antwort zu folgender Fragestellung gefunden werden: Welches Verteilsystem und Aufbereitungssystem (zentral, zentral und dezentral, nur dezentral, Netztemperatur, Anzahl Leiter) ist für thermische Netze in Abhängigkeit von der Bedarfsstruktur wirtschaftlich und ökologisch vorteilhaft?

Untersucht wird ein Perimeter mit annähernd realem Netzaufbau. Als Wärmequelle dient Grundwasser. Der Perimeter umfasst 8 Liegenschaften mit der Nutzung, Verwaltung und dem Baustandard nach MukEN 2014. Der Energie- und Leistungsbedarf für Wärme und Kälte wurde über die SIA 2024 bestimmt, wobei bei der Berechnung die Diskrepanz zwischen Wärme- und Wärmeleistungsbedarf mit Vergleichsprojekten kompensiert wird.

Das Trinkwarmwasser wird aufgrund des geringen Bedarfs, dezentral direkt elektrisch erzeugt. Fossile Wärmeerzeuger sind aufgrund der tiefen Vorlauftemperaturen nicht in der Studie berücksichtigt. Für Zentrale Wärmeerzeuger sind NH<sub>3</sub> Wärmepumpen gewählt, für dezentrale Wärmepumpen kommen HFO-Wärmepumpen zum Einsatz.

Mit diesen Vorgaben konnten drei sinnvolle Varianten konzipiert und dimensioniert werden:

Varianten		4-Leiter	2-Leiter	Anerkennung
Raumwärme	zentral	X	X	
	dezentral			X
Warmwasser	zentral			
	dezentral	X	X	X
Klimakälte	zentral	X	X	X
	dezentral			
Prozesskälte	zentral	X	X	X
	dezentral		X	
Fluidströmung	gerichtet	X	X	
	ungerichtet			X
Energiefluss	unidirektional	X	X	
	bidirektional			X
Unterstationen	direkt			X
	indirekt	X	X	
Anzahl Leiter	2 – Leiter		X	X
	4 – Leiter	X		

Darauf basierend sind die Investitionen  $\pm 25\%$  geschätzt und der Endenergiebedarf der Varianten berechnet. Die Wirtschaftlichkeit ist mittels Jahreskosten beurteilt und die Ökologie aufgrund von Primärenergie und CO<sub>2</sub> Äquivalenz verglichen.

Die Analyse zeigt, dass im Vergleich der Jahreskosten die 2-Leiter (Change-Over) Variante die günstigste aber unflexibelste Variante ist. Fast gleichauf (+2%) liegt die 4-Leiter Variante mit klassisch gerichteter Verteilung. Die Anerkennung Variante liegt auf dem letzten Platz (+11%).

Die Ökologie ist proportional zum Energieverbrauch. Daher gewinnt in dem Punkt in der CO<sub>2</sub>- sowie Primärenergiebetrachtung die 4-Leiter Variante.

Die Gestehungspreise (Wärme- und Kälte) aller Varianten liegen trotz voller Deckung der Leistung mit Wärmepumpen zwischen 16.3 - 19.2 Rp./kWh. Diese Zahlen liegen in einem Bereich der Wirtschaftlichkeit, was hauptsächlich auf den Verkauf der Kälte zurückzuführen ist.

### 3 Situation initiale

La stratégie énergétique pour 2050 prévoit de réduire l'utilisation des agents énergétiques fossiles et de solliciter plus largement les énergies renouvelables. Les émissions de CO<sub>2</sub> doivent être réduites de manière drastique. Les réseaux thermiques offrent un potentiel élevé pour l'utilisation et la distribution accrues des énergies renouvelables et donc pour atteindre ainsi les objectifs définis par la Confédération. Outre les aspects techniques et non techniques, le Programme «réseaux thermiques» soulève des questions sur le choix du système, en particulier le choix des températures du réseau, le degré de centralisation de la préparation et le nombre de conduites.

En février 2018, la phase I du lot de travail «Critères de décision pour le choix du système» préparé par eicher+pauli AG, a été achevée. Cette première phase contenait des recommandations sur le choix du système d'approvisionnement de chaleur pour un quartier de bâtiments existants et un quartier de nouvelles constructions simplement pour un réseau. Pour les réseaux thermiques, il est désormais important de choisir la température du réseau lorsque le périmètre d'approvisionnement a, outre le besoin en chauffage, un besoin en refroidissement. La question est de savoir si en cas de besoin accru en refroidissement, il est préférable d'abaisser les températures du réseau ou si un autre concept d'approvisionnement serait plus avantageux.

#### 3.1 Objectif du lot de travail

L'objectif de cette deuxième phase de lot de travail est d'élaborer des critères de décision pour la sélection de systèmes de réseaux thermiques, lorsqu'un périmètre d'approvisionnement doit être alimenté en chaud et en froid.

Il devrait en résulter des déclarations sur les critères suivants:

- Disposition de la préparation de chaleur (augmentation centralisée ou décentralisée de la température pour le chauffage / où a lieu l'élévation de la température lieu?
- Déclarations sur le choix de la température du réseau en fonction du type de fourniture de chaleur et de froid et du niveau de température des consommateurs
- Sélection du nombre de conduites pour le système

Les aspects économiques et écologiques sont utilisés comme critères de décision. Dans ce lot de travail, la réflexion sur le simple besoin en chaleur est étendue au besoin en froid. La procédure est basée sur la méthodologie développée dans la phase I. Étant donné que le thème du besoin en froid est relativement nouveau et n'est pas abordé de manière uniforme, la situation générale de la demande de refroidissement des bâtiments résidentiels et fonctionnels en Suisse sera présentée dans l'introduction:

- Quel est le potentiel actuel et futur pour le refroidissement du parc immobilier?
- Quelle est l'impact du réchauffement climatique sur le besoin?
- Comment les planificateurs traitent-ils le sujet du refroidissement?



### 3.2 Procédure

En se basant sur des installations hypothétiques de projets de réseaux thermiques typiques comportant une seule source à basse température (par exemple une nappe phréatique) et des conditions de besoins typiques, les paramètres suivants ont été modifiés:

- Niveau de température des consommateurs de chaleur (nouvelle construction typique selon la norme Minergie et bâtiment existant rénové typique en construction mixte)
- Système d'approvisionnement du chauffage et du refroidissement (centralisé, centralisé et décentralisé, décentralisé)
- Différents systèmes de distribution (2 conduites, 4 conduites)
- Niveau de température de la distribution de chaleur primaire en fonction des exigences de la demande des consommateurs de chaleur et du système de préparation de la chaleur (température minimale appropriée aller et retour)

Pour la zone d'approvisionnement de base, une densité de construction combinée à une densité de raccordement d'au moins 2 MWh/Trm\*a doit être prise en compte pour l'approvisionnement en chaleur et en froid. La zone d'approvisionnement doit correspondre le plus possible à des situations réelles et aussi courantes que possible de la pratique. Elle peut être tirée de projets existants. Il en résulte ainsi des topologies de réseaux réelles.

Les analyses technico-économiques des cas de calcul conduisent à des interprétations hypothétiques pour les installations (réseau, appareils, etc.) sur la base de composants qui se trouvent sur le marché. Cela permet de comparer les cas individuels et de faire des déclarations sur la rentabilité globale.

Le degré de détail fait apparaître des différences fondamentales entre les cas examinés. Les coûts sont basés sur des estimations de coûts de projets similaires avec une précision de +/- 25 % pour les investissements des installations et des conduites.

### 3.3 Question

L'objectif de ce lot de travail est de trouver une réponse à la question suivante: quel système de distribution et d'approvisionnement (centralisé, centralisé et décentralisé, uniquement décentralisé, température du réseau, nombre de conduites) est économiquement et écologiquement plus avantageux pour les réseaux thermiques en fonction du profil du besoin?

### 3.4 Limites

Ne sont pas pris en compte en particulier:

- des sources de chaleur de natures différentes
- des niveaux de température supplémentaires de l'approvisionnement en chaleur du côté primaire
- une utilisation mixte

## 4 Approvisionnement en froid futur

Selon l'Office fédéral de l'énergie, la consommation d'énergie finale en Suisse en 2017 était de 21,8 PJ pour la climatisation, la ventilation et les équipements techniques des bâtiments (énergie auxiliaire, climatisation, ventilation, humidification et autres équipements techniques des bâtiments).

Globalement, la consommation d'énergie finale pour la climatisation, la ventilation et les services du bâtiment représente 3 % de la consommation totale d'énergie finale en Suisse et est environ 10 fois inférieure à la consommation d'énergie finale pour le chauffage des locaux.

9

Évolution entre 2000 et 2017, en PJ

Utilisation	2000	2017	Δ'00 - '17
Chauffage des locaux	262.3	239.2	-8.8%
Eau chaude sanitaire	46.5	45.8	-1.4%
Chaleur de processus	95.5	95.3	-0.1%
Éclairage	25.0	25.3	1.3%
Climatisation, ventilation et services du bâtiment	17.9	21.8	21.6%
Information & communication, divertissement	8.8	9.9	12.6%
Moteurs, processus	68.1	69.7	2.4%
Mobilité dans le pays	224.6	235.8	5.0%
autres	14.4	20.6	43.0%
<b>Consommation d'énergie finale (sans pipelines)</b>	<b>762.9</b>	<b>763.4</b>	<b>0.1%</b>
tourisme de carburants	11.0	3.7	-66.5%
trafic aérien interne	64.0	71.9	12.3%
<b>Consommation d'énergie finale totale</b>	<b>837.9</b>	<b>839.0</b>	<b>0.1%</b>

Tableau 1, Consommation finale d'énergie selon l'utilisation (tableau 11 dans le document source)

Alors que la consommation finale d'énergie pour le chauffage des locaux, l'eau chaude et la chaleur de processus stagne ou diminue, la consommation d'énergie finale pour la climatisation, la ventilation et les services du bâtiment augmente de manière significative.

L'étude «ClimaBau - Planification face au changement climatique; besoin énergétique et confort des bâtiments résidentiels actuels jusqu'en 2100» de l'Office fédéral de l'énergie (rapport final, 29.12.2017) indique que le besoin en énergie finale de la Suisse pour la climatisation continuera d'augmenter à l'avenir. L'étude conclut que le besoin en chauffage pour les bâtiments résidentiels sera réduite de 20 à 30 %, tandis que le besoin de climatisation augmentera de manière significative. On part du principe que d'ici 2100, le besoin en refroidissement sur le Plateau suisse représentera environ 50 % du besoin en chauffage. Cette évolution sera encore plus prononcée dans les villes, en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

La norme SIA 180 actuelle part du principe qu'aucun refroidissement actif n'est nécessaire si un bâtiment présentant des gains de chaleur interne modérés et spécifiques est correctement conçu et construit. En examinant les normes SIA 382.1 et SIA 2024, la nécessité d'un refroidissement peut être démontrée de manière simplifiée en utilisant les gains de chaleur interne supposés. Dans la procédure simplifiée sur les gains de chaleur interne, il n'y a pas besoin de refroidissement pour les maisons individuelles et les immeubles. Dans certains cas, cependant, chaque bâtiment peut être considéré séparément au moyen d'une simulation thermique. Si la température ambiante est supérieure à la température ambiante maximale autorisée pendant 100 heures par an, un refroidissement est requis. Compte tenu du

réchauffement climatique, il faut supposer que ce cas se produira plus fréquemment à l'avenir. Cependant, même si cela n'est pas nécessaire, un refroidissement conforme à la norme SIA 382-1 est autorisé si les besoins en puissance électrique ne dépassent pas 7 W/m<sup>2</sup> de surface nette au sol (bâtiments existants: 12 W/m<sup>2</sup>).

Toutefois, il convient de noter que la protection thermique estivale, conformément aux normes SIA 180 et SIA 382-1, doit être garantie pour chaque cas de refroidissement. L'étude ClimaBau conclut également que pour obtenir des températures intérieures confortables, l'optimisation des protections solaires, du refroidissement nocturne ainsi que la conception des bâtiments (en particulier les fenêtres) joueront un rôle central à l'avenir. Outre l'isolation thermique en été, qui optimise le besoin en énergie utile, le recours à des systèmes de refroidissement optimisés et efficaces sur le plan énergétique et le choix de l'agent énergétique sont également importants. Les systèmes de refroidissement efficaces sur le plan énergétique ont une influence majeure sur la demande énergétique. Il s'agit ici de privilégier la combinaison des systèmes de refroidissement avec le système de chauffage et des installations photovoltaïques. Le choix de l'agent énergétique (choix de l'électricité) a également une influence majeure sur le besoin en énergie primaire.

## 5 Bases

Les éléments suivants constituent la base des travaux:

Désignation	Grandeur	Remarque
Dimensionnement centrale énergétique	95%	Facteur de simultanéité en fonction du nombre de consommateurs de chaleur
Source de chaleur	11 °C constante	Nappe phréatique, pas de restrictions de captage des nappes phréatiques
Consommation électrique de la pompe de circulation principale	2'200 heures à pleine charge	
Calcul du taux d'intérêt	2.25%	
Durée de vie technique	15-50 ans	Composants selon la directive VDI 3492
Inflation	0.5%	
Coûts de construction	385 CHF/m <sup>3</sup>	Centrale en surface

Tableau 2, récapitulation des éléments de base

D'autres supports sont:

- cahier des charges du Programme «réseaux thermiques» du 17.05.2018
- séance coup d'envoi du 18.07.2018, y compris tous les documents
- séance intermédiaire 1, datée du 28.09.2018, y compris tous les documents
- séance intermédiaire 2, datée du 31.01.2019, y compris tous les documents
- données de base du réseau de chaleur Augarten AEW
- énergie primaire et facteurs d'émission de CO<sub>2</sub> selon les données des écobilans dans la construction KBOB / eco-bau / IPB 2009/1:2016
- «Réseaux thermiques», critères de décision pour le choix du système, rapport final 22 février 2018

## 6 Prise en compte des interfaces

Dans le cadre de la présente étude, nous examinons les points essentiels des réseaux de chaleur. Les interfaces suivantes constituent les limites de l'étude:

- les coûts de construction décentralisés des sous-stations sont pris en compte
- les éléments du système dans la sous-station jusqu'à et y compris l'élévation de température sont pris en compte
- le système de dispersion de chaleur des immeubles n'est pas pris en compte
- les énergies auxiliaires, l'électricité pour la régulation, etc. ne sont pas prises en compte.

## 7 Description du projet

### 7.1 Source de chaleur

On part du principe que la source de chaleur est une nappe phréatique dont la température constante est de 11 °C. L'écart de température entre l'aller et le retour ne doit pas dépasser 3 K<sup>1</sup>.

### 7.2 Utilisation des bâtiments

L'utilisation et le profil d'utilisation qui y est associé se limitent à l'utilisation «administration».

Il s'agit d'un quartier de nouvelles constructions (constructions de type MoPEC 2014).

Puisque l'utilisation «maison individuelle» ne nécessite selon la norme SIA 2024 pas de refroidissement, aucune utilisation mixte ne sera réalisée. On part du principe que dans le périmètre, seuls les bâtiments à usage «administratif» sont considérés.

L'humidification et la déshumidification sont exclues.

### 7.3 Périmètre

Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité, un périmètre a été choisi à partir du réseau de chaleur AEW Augarten existant de Rheinfelden<sup>2</sup>. La structure du réseau n'est pas exactement la même, mais elle est très similaire.

---

<sup>1</sup> Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux) annexe 2

<sup>2</sup> Réseau de chaleur Augarten Weiherfeld, utilisation des rejets thermiques ARA Rheinfelden, AEW Energie AG, utilisation des données par AEW approuvée le 18.09.2017.

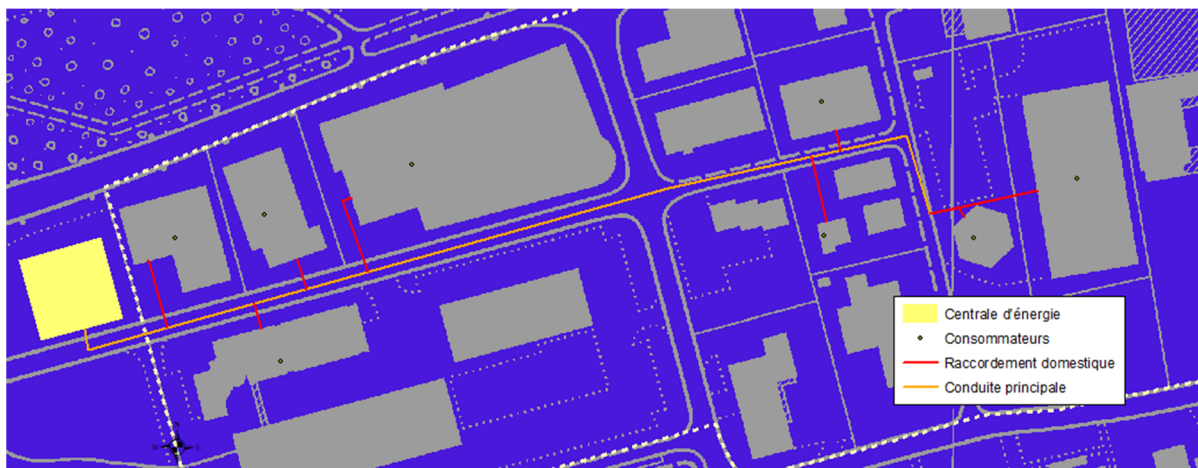


Figure 1: Périmètre

La centrale énergétique est située en surface et directement dans le périmètre pour éviter les longues distances.

Les paramètres standardisés sont énumérés ci-dessous:

Utilisation	Administration
Station météo	Basel-Binningen
Standard bâtiment	MoPEC 2014
Nombre de sous-stations	8
Conduite principale	335 Trm
Raccordements domestiques	150 Trm
Mètres de tracé (somme)	485 Trm

Tableau3, bases du périmètre

## 7.4 Besoins en énergie et en puissance

Les huit bâtiments du périmètre indiqué dans le dernier chapitre ont servi de base au calcul du besoin en chaud et froid. Les surfaces au sol sont multipliées par le nombre d'étages autorisé à Rheinfelden. Le résultat correspond à la surface nette au sol de la totalité du périmètre.

Bases			
Bâtiment	Surface	Étages	Surface nette
	[m²]		[m²]
1	852	5	4'260
2	910	5	4'550
3	1'110	5	5'550
4	106	5	530
5	640	5	3'200
6	338	5	1'690
7	2'052	5	10'260
8	4'032	5	20'160
<b>Total</b>			<b>50'200</b>

Tableau 4, Surfaces des bâtiments

Afin de pouvoir mettre en relation le besoin en chaud et en froid, la méthode de calcul basée sur la norme SIA 2024 a été choisie et mise en œuvre avec l'outil de construction SIA.

En se basant sur des utilisations typiques des locaux et leurs parts dans les bâtiments administratifs, les valeurs standard de la SIA ont été utilisées pour calculer l'énergie et la puissance.

Lors du contrôle de plausibilité, un faible nombre d'heures à pleine charge a été constaté pour le chauffage. Selon la SIA, il existe une divergence entre le calcul de la puissance thermique et celui du besoin en chaud. Il a donc été décidé de doubler le besoin en chaleur. Il en résulte un besoin en chaleur pour le CL + l'ECS de 31,9 kWh/m2/an. Cela correspond à des valeurs comparables de besoins en chaleur mesurées dans des bâtiments existants.

Lo-caux		Surface			Refroidisse-ment des locaux		Chauffage des locaux		Eau chaude	
N°	Utilisation des locaux (SIA 2024)	SRE	SN m2	Part %	Puis-sance kW	Énergie MWh	Puis-sance kW	Énergie MWh	Be-soin l/d	Énergie MWh
3.1	Bureau individuel, collectif		16'000	32%	432.0	213.6	460.4	403.9	3'429	41.5
3.2	Bureau paysagé		16'000	32%	416.0	329.4	374.8	160.4	4'800	58.1
3.3	Salle de réunion		1'600	3%	67.2	17.2	92.5	39.3	0	0.0
3.4	Hall des guichets, zone clientèle		800	2%	17.6	10.3	17.0	11.1	0	0.0
12.1	Surface de dégagement		800	2%	0.0	0.0	8.9	2.7	0	0.0
12.3	Cage d'escalier		1'600	3%	0.0	0.0	37.9	8.6	0	0.0
12.7	WC		400	1%	0.0	0.0	21.1	16.2	0	0.0
12.4	Local annexe		4'800	10%	0.0	0.0	59.0	49.2	0	0.0
12.12	Salle de serveurs		200	0%	20.2	136.0	1.9	0.0	0	0.0
12.9	Garage collectif		8'000	16%	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0
				0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0
				0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0
				0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0
Total			50'200	100%	953.0	706.4	1'073.4	691.5	8'229	99.7
Valeurs provenant d'autres sources								1'383.0		
Valeur de calcul			50'200		953.0	706.4	1'073.4	1'383.0	8'229	99.7

Part de la surface de construction	%	10
Surface de plancher (SP)	m2	55220
Surface de référence énergétique (SRE)	m2	46420

W/m2	kWh/m2	W/m2	kWh/m2		kWh/m2
20.5	15.2	23.1	29.8		2.1

Tableau 5, extrait de l'outil SIA 2024



Le diagramme ci-dessous représente la courbe de puissance de chauffage et de refroidissement en fonction de la température et des heures annuelles approximatives. La surface en-dessous des courbes représente les besoins énergétiques.

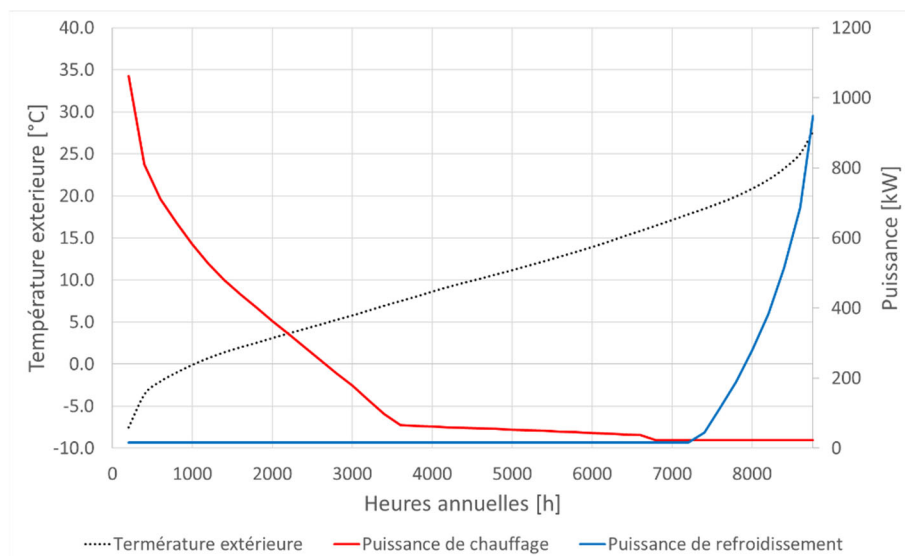


Figure 2, courbe de fréquence cumulée des besoins en chauffage et en refroidissement

De cette manière, les besoins en énergie et en puissance du périmètre ont été définis:

Besoins en chaleur:	1'583 MWh/an
Besoins en puissance calorifique	1'073 kW
Besoins en refroidissement	706 MWh/an
Besoins en puissance frigorifique	953 kW

## 7.5 Production de chaleur eau chaude sanitaire

Comme on peut s'y attendre dans un bâtiment administratif, les exigences en matière d'ECS et de FP y sont également faibles. Il faut par conséquent éviter des investissements élevés. En raison du faible besoin en ECS, il faut s'attendre à des pertes de chaleur très importantes, d'environ 100 %, lors de la distribution de l'eau chaude. Selon la norme SIA 2024 Building Tool (production), le efficacité d'un chauffe-eau PAC est de 2.2. et le besoin en énergie auxiliaire est de 2 %. Si cela est pris en compte, les besoins en électricité sont presque les mêmes que si l'énergie était fournie directement par l'électricité, mais en fonction du besoin. Or, la variante électrique directe ne nécessite aucun investissement dans une pompe à chaleur ou un réseau de distribution d'ECS.

Étant donné que, dans ce cas, un système de distribution d'ECS n'apporte aucun avantage énergétique et que les coûts d'investissement sont beaucoup plus élevés par rapport aux chauffe-eau instantanés décentralisés, aucune variante ne comprend une distribution d'eau chaude sanitaire.

## 7.6 Densité thermique linéaire

Vu que toute l'énergie est vendue, la densité thermique linéaire est calculée à partir de l'énergie totale (chaleur et froid) et des mètres de tracé du réseau.

Mètres de tracé 485 Trm (conduite principale et raccordements domestiques)

Besoin en chauffage + refroidissement 1'583 MWh/an + 706 MWh/an = 2290 MWh/an

Densité thermique linéaire 4,72 MWh/Trm/an

## 7.7 Besoin températures

Les températures des clients raccordés au chauffage du côté secondaire sont définies comme suit :

	Température extérieure	Température aller	Température retour
Chauffage des locaux (ventilation incl.)	-7°C	35°C	28°C
Eau chaude sanitaire		60°C	
Froid de confort	32°C	18°C	22°C
Froid industriel		18°C	22°C

Tableau 6, Températures des clients raccordés

Les températures des systèmes dépendent du type de chauffage dans les bâtiments.

Comme il s'agit d'un quartier de nouvelles constructions, le planificateur peut prendre ces températures comme référence lors de la conception du système.

Si des températures plus basses sont requises, des systèmes permettant d'augmenter ou de diminuer la température dans le bâtiment peuvent être installés du côté secondaire.

Toutes ces températures ont déjà été mises en œuvre avec succès dans des projets réalisés par e+p.

## 7.8 Simultanéité

Dans les solutions centralisées, un facteur de simultanéité a une influence sur le dimensionnement de la centrale énergétique. Celui-ci dépend principalement du nombre de clients raccordés et est pris en compte dans le dimensionnement. Le schéma suivant sert de base pour définir le facteur:

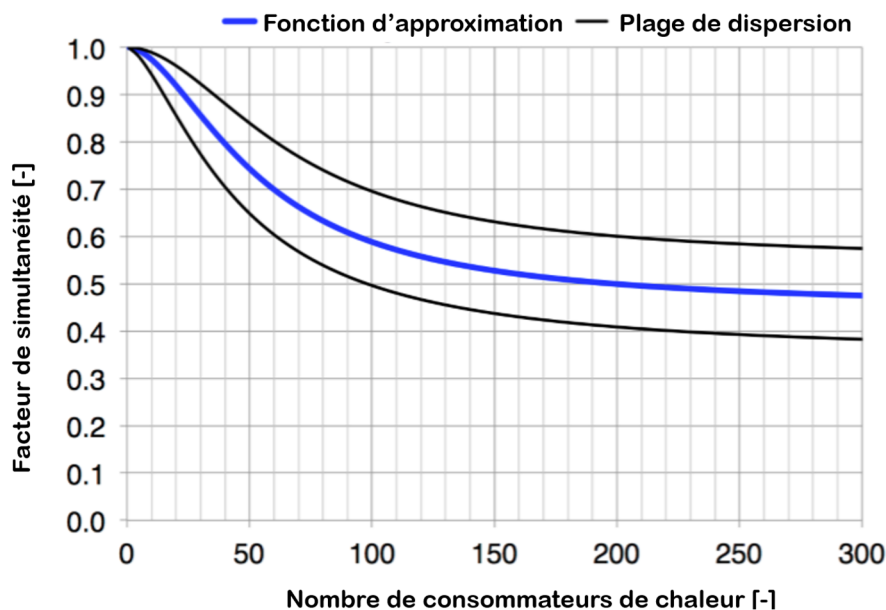


Figure 3, Fonction d'approximation et plage de dispersion pour l'évolution du facteur de simultanéité en fonction du nombre de consommateurs, source: Guide de planification chauffage à distance 6 avril 2017, p. 109

Avec huit clients raccordés, cela représente une simultanéité de 95%. La centrale énergétique et les conduites principales peuvent donc être dimensionnées à 95% de la puissance réelle. Cette étude en tient compte.

## 7.9 Couverture de pointe fossile

En raison de la faible température aller pour le chauffage des locaux, aucune couverture de pointe fossile n'est prévue.

## 7.10 Dimensionnement des éléments de l'installation

Tous les éléments de l'installation (pompes, tuyaux, etc.) sont dimensionnés selon les méthodes courantes de la branche. Les valeurs les plus importantes pour le dimensionnement des éléments de l'installation sont indiquées dans le tableau suivant:

Perte de pression conduites de raccordement chaudes	Max. 250 Pa/m
Perte de pression conduites de raccordement froides	Max. 100 Pa/m
Température différentielle de la séparation de systèmes par nappes phréatiques	1K
Température différentielle du chauffage à distance Sous-stations circuit primaire au circuit secondaire	2K
Stockage PAC	Conçu pour le fonctionnement cadencé d'une PAC, de sous-stations et de solutions centralisées

Figure 4, Bases du dimensionnement

## 7.11 Pertes de distribution

La chaleur est distribuée à un niveau maximum de 40°C. Les pertes sont calculées mais représentent seuls une part d'environ 0,3 % de la puissance et ont de ce fait une influence marginale sur les installations de chauffage. La perte de température de 1 K est tout de même prise en compte pour le dimensionnement.

## 7.12 Récupération de chaleur

Étant donné qu'il existe tant bien un besoin en chaud qu'en froid, les concepts devraient faire le meilleur usage possible de la simultanéité. En particulier, il convient de solliciter le moins possible les nappes phréatiques. Ceci fut pris en compte lors de l'élaboration des variantes.

## 7.13 Redondance

### 7.13.1 Chaleur

Une pompe à chaleur doit couvrir la totalité des besoins en puissance, vu qu'aucune couverture de pointe n'est effectuée par des énergies fossiles. Les investissements sont dans ce cas plus élevés que dans le cas d'une couverture de la moitié de la puissances par des énergies fossiles telles que chaudières à gaz ou à mazout. Un système avec une redondance de  $n+1$ , par exemple, ne serait pas du tout rentable. C'est pourquoi la présente étude envisage pour les variantes centralisées des centrales thermiques mobiles, qui peuvent fournir la puissance requise dans un délai d'un jour ouvrable.

### 7.13.2 Refroidissement

Aucune redondance n'est prévue pour les systèmes de refroidissement.

## 7.14 COP (PAC-esti) pour le chauffage des locaux

Les coefficients de performance annuels pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire sont calculés à l'aide du programme de calcul PAC-esti<sup>3</sup>. Le calcul inclut le débit de la pompe pour le captage des eaux souterraines. Le débit des principales pompes d'alimentation est pris en compte avec 2'200 heures à pleine charge par an. Les feuilles de calcul se trouvent en annexe.

## 7.15 Concepts d'installations (variantes)

Tous les concepts sont décrits avec des schémas conceptuels dans le rapport des variantes. e+p dispose de schémas de principe synoptiques internes. Ceux-ci peuvent être utilisés pour discuter des besoins hydrauliques des variantes et, en comparaison avec les projets réalisés, pour s'assurer que les variantes proposées soient réalisables. Ces schémas ne sont pas publiés, car ils représentent une phase trop avancée et il y a donc un risque qu'ils soient adoptés 1:1 dans des projets de construction sans l'intervention d'e+p.

---

<sup>3</sup> Lien vers la version actuelle: <https://www.endk.ch/fr/professionnels/outils>

### 7.15.1 Matrice des variantes

La question fondamentale du présent travail est la suivante: «Quel système de distribution et d’approvisionnement (centralisé, centralisé et décentralisé, uniquement décentralisé, température du réseau, nombre de conduites) est, en fonction du profil du besoin, économiquement et écologiquement plus avantageux pour les réseaux thermiques?»

Pour répondre à cette question, trois concepts ont été définis:

- Variante à 4 conduites, distribution de l'énergie par un réseau de chauffage et de refroidissement séparé, préparation du chauffage des locaux de manière centralisé.
- Variante à 2 conduites, distribution de l'énergie par un réseau avec commutation du mode chauffage et refroidissement.
- Variante anergie, distribution de l'énergie à basse température, élévation de la température dans les sous-stations.

La matrice ci-dessous permet de présenter de manière claire les différences techniques fondamentales entre les concepts.

<b>Variante</b>		<b>4 conduites</b>	<b>2 conduites</b>	<b>Anergie</b>
Chauffage	centralisé	X	X	
	décentralisé			X
Eau chaude	centralisée			
	décentralisée	X	X	X
Froid de confort	centralisé	X	X	X
	décentralisé			
Froid de processus	centralisé	X	X	X
	décentralisé		X	
Flux de fluide	dirigé	X	X	
	non dirigé			X
Flux d'énergie	unidirectionnel	X	X	
	bidirectionnel			X
Sous-stations	direct			X
	indirect	X	X	
Nombre de conduites	2 conduites		X	X
	4 conduites	X		

Tableau 7, Matrice des variantes

Les variantes diffèrent par rapport à la distribution de chaleur et de froid. La variante à 4 conduites peut chauffer et refroidir simultanément les bâtiments raccordés, tandis que la variante à 2 conduites passe lors du point de commutation pendant la phase de transition du mode chauffage au mode refroidissement. La variante anergie fournit le froid à distance aux sous-stations, là où l'élévation de la température se fait de manière décentralisée.

Dans les chapitres suivants, les variantes sont présentées sur le plan technique.

### 7.15.2 Variante à 4 conduites

L'élévation de température pour le chauffage a lieu dans la centrale énergétique. La chaleur est produite de manière monovalente par une pompe à chaleur à eaux souterraines. L'apport aux sous-stations est assuré indirectement par ECP. En raison des faibles besoins en énergie de ruban, l'ECS est réglée de manière décentralisée par apport d'électricité direct.

Variantes		4 conduites
Chauffage	centralisé	X
	décentralisé	
Eau chaude	centralisée	
	décentralisée	X
Froid de confort	centralisé	X
	décentralisé	
Froid de processus	centralisé	X
	décentralisé	
Flux de fluide	dirigé	X
	non dirigé	
Flux d'énergie	unidirectionnel	X
	bidirectionnel	
Sous-stations	direct	
	indirect	X
Nombre de conduites	2 conduites	
	4 conduites	X

Tableau 8, Matrice des variantes 4 conduites

À la température extérieure de dimensionnement, la température aller est réglée à 39°C. Avec les pertes des conduites et la température différentielle dans l'ECP de la sous-station, une température aller de 35°C est ainsi atteinte au niveau secondaire.

### Besoins en énergie et en puissance du périmètre

Besoins en chaleur	1' 583 MWh/an
Besoins en puissance	1' 073 kW
Besoins en froid	706 MWh/an
Besoins en puissance frigorifique	953 kW

## Mode chauffage et refroidissement

En mode chauffage (hiver), la pompe à chaleur par nappes phréatiques fournit la chaleur pour le chauffage des locaux. L'ECS est préparée de manière décentralisée. Le FP est fourni par les eaux souterraines.

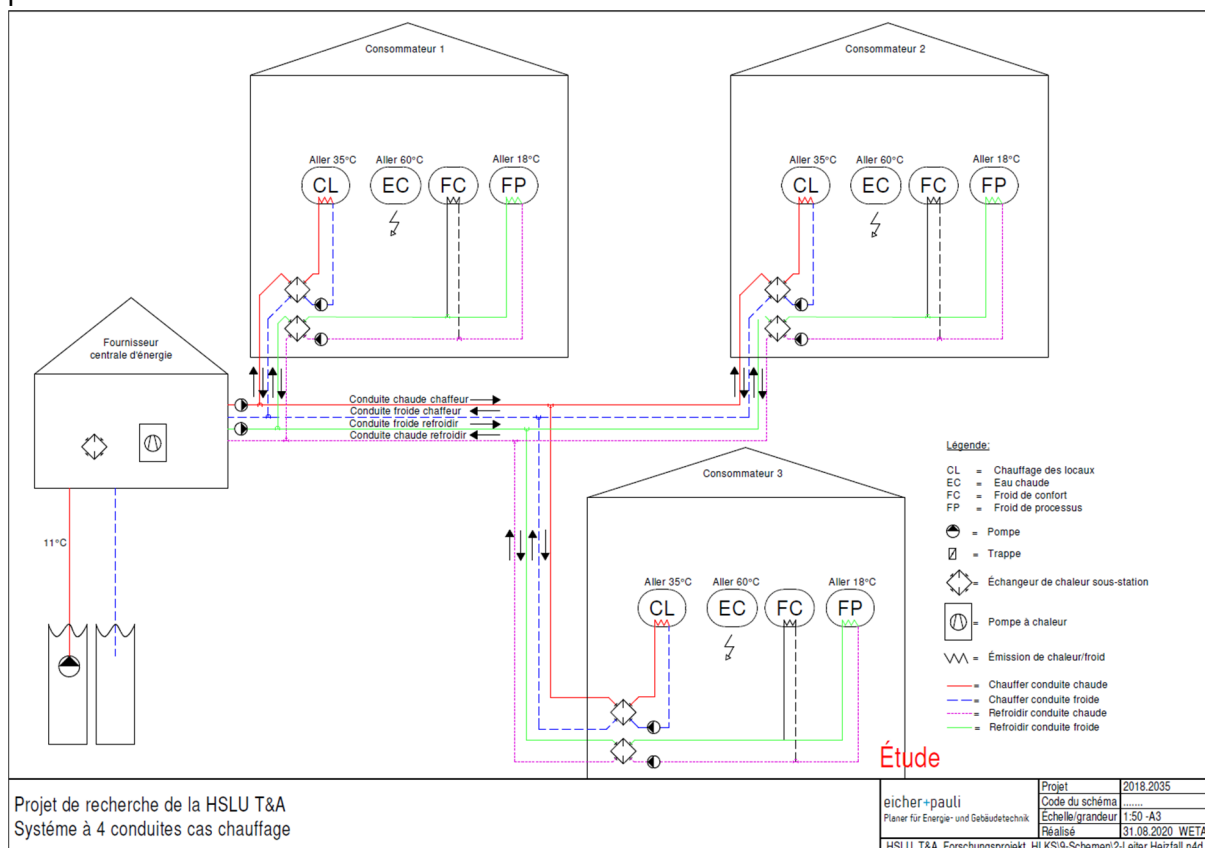


Figure 5, Schéma Mode de chauffage à 4 conduites

En mode refroidissement (été), la pompe à chaleur par nappes phréatiques est hors service car il n'y a pas de besoin en chauffage pour les locaux. Les eaux souterraines couvrent les besoins en FC et FP.

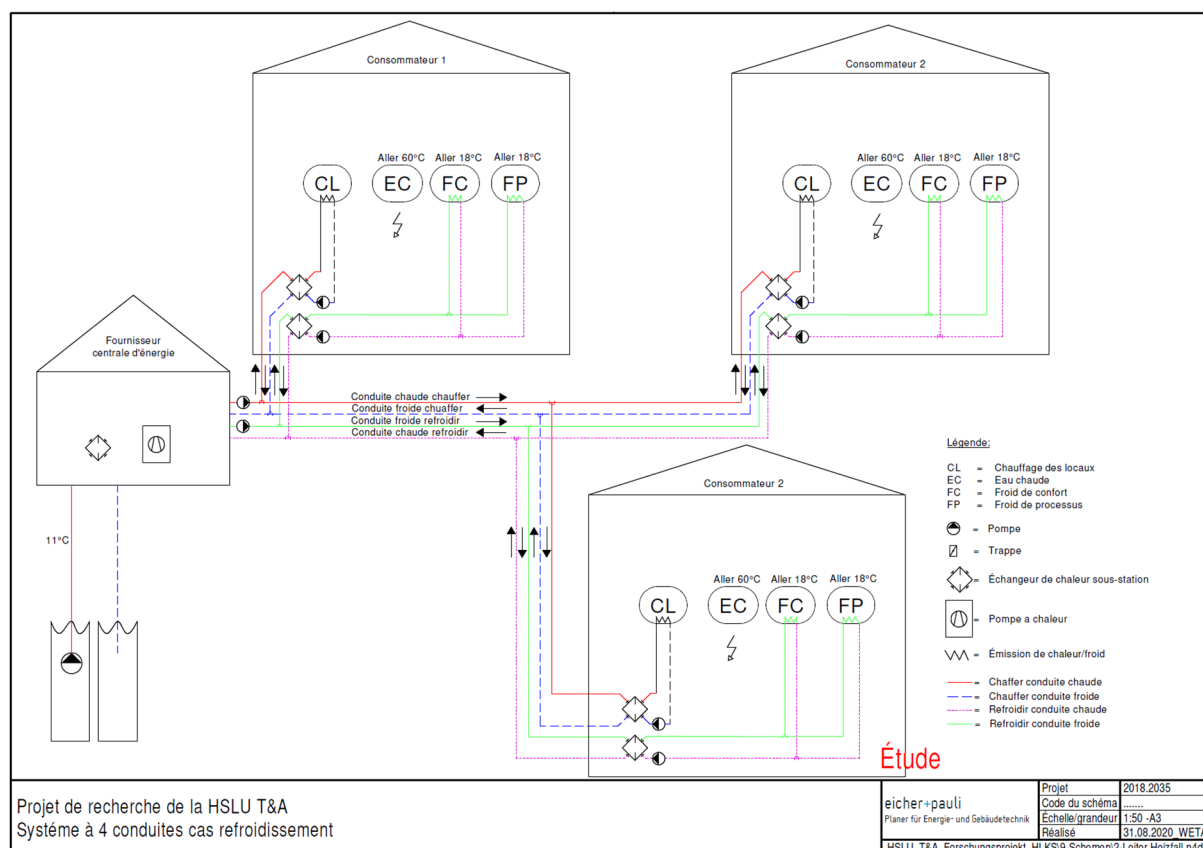


Figure 6, Schéma Mode refroidissement à 4 conduites

## Dimensionnement de la production de chaleur

Couverture des besoins énergétiques	[kW]	[MWh]	Part de l'énergie
Pompe à chaleur NH3	1'100	1'384	87%
Pompe à chaleur HFO	-	0	0%
Chauffe-eau ECS (électrique direct)	25	199	13%

Couverture des besoins énergétiques	[kW]	[MWh]	Part de l'énergie
Freecooling ES	952	706	100%
Machine frigorifique FP	-	0	0%



**Coefficient de performance annuel (COP)**

Le coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur a été calculé pour le chauffage à l'aide du programme PAC-esti Annexe [1]. Outre l'électricité pour la pompe à chaleur, l'électricité pour la pompe des eaux souterraines a également été prise en compte. Il s'agit d'une pompe à chaleur à l'ammoniac. La pompe de circulation a été ajoutée séparément au besoin en énergie de la centrale avec 2'200 VLS.

COP NH3	5.0
COP Froid	15.0 <sup>4</sup>

**Besoins en énergie et en puissance centrale énergétique**

Le besoin annuel en énergie finale a été déterminé à partir des données sur l'énergie et le rendement énergétique calculés ci-dessus:

Électricité PAC-CL	291 MWh/an
Pompe aller principale	12 MWh/an
Froid	47 MWh/an
Somme électricité	350 MWh/an

La puissance électrique a une influence sur les coûts d'exploitation d'un réseau de chauffage, c'est pourquoi elle est indiquée ici et prise en compte dans le calcul de rentabilité. Les principaux consommateurs d'électricité/de chaleur sont indiqués, la puissance électrique pour les pompes auxiliaires n'est pas prise en compte.

Pompe ES	8 kW
PAC	262 kW
Pompe aller principale	8 kW
Somme	278 kW

---

<sup>4</sup>Conformément à l'outil de la SIA 2024, feuilles production, refroidissement direct de la nappe phréatique

### 7.15.3 Variante à 2 conduites

L'élévation de température pour le chauffage a lieu dans la centrale énergétique. La chaleur est produite de manière monovalente par une pompe à chaleur à eaux souterraines. La distribution aux sous-stations est assurée de manière indirecte par le biais d'échangeurs de chaleur à plaques. L'ECS est gérée de manière décentralisée en raison de la puissance relativement faible.

Variantes		2 conduites
Chauffage	centralisé	X
	décentralisé	
Eau chaude	centralisée	
	décentralisée	X
Froid de confort	centralisé	X
	décentralisé	
Froid industriel	centralisé	X
	décentralisé	X
Flux de fluide	dirigé	X
	non dirigé	
Flux d'énergie	unidirectionnel	X
	bidirectionnel	
Sous-stations	direct	
	indirect	X
Nombre de conduites	2 conduites	X
	4 conduites	

Tableau 9, Matrice des variantes à 2 conduites

À la température extérieure de dimensionnement, la température aller est réglée à 39°C. Avec les pertes dans les conduites et la température différentielle dans l'ECP de la sous-station, une température aller de 35°C est ainsi atteinte au niveau secondaire.

### Besoins en énergie et en puissance du périmètre

Besoins en chaleur	1' 583 MWh/an
Besoins en puissance	1' 073 kW
Besoins en froid	706 MWh/an
Besoins en puissance frigorifique	953 kW

## Mode chauffage et refroidissement

En mode chauffage (hiver), la pompe à chaleur centralisée par nappes phréatiques fournit la chaleur pour le chauffage des locaux. L'ECS est préparée de manière décentralisée. Le FP est fourni au moyen de machines frigorifiques décentralisées.

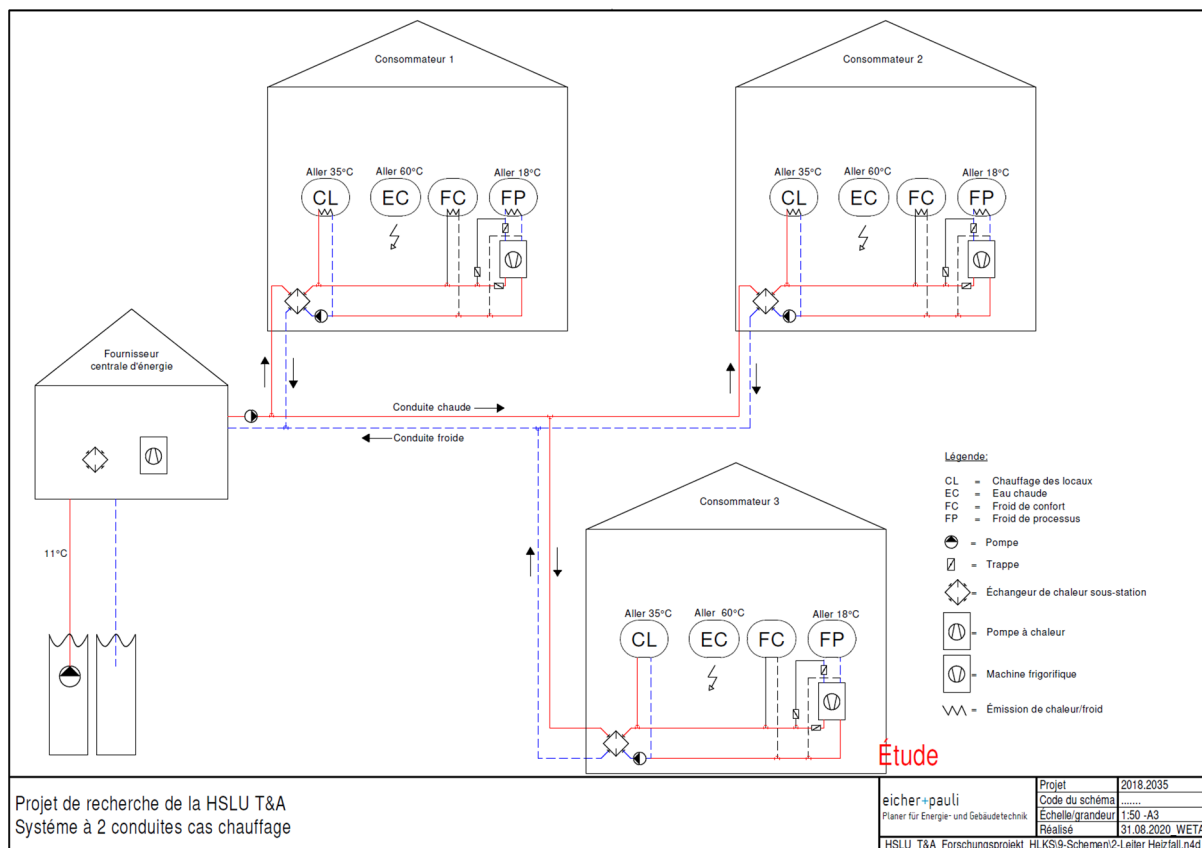


Figure 7, Schéma Mode de chauffage à 2 conduites

En mode refroidissement (été), la pompe à chaleur par nappes phréatiques est hors service, car il n'y a pas de besoin en chauffage pour les locaux. Les eaux souterraines couvrent les besoins du FC et FP.

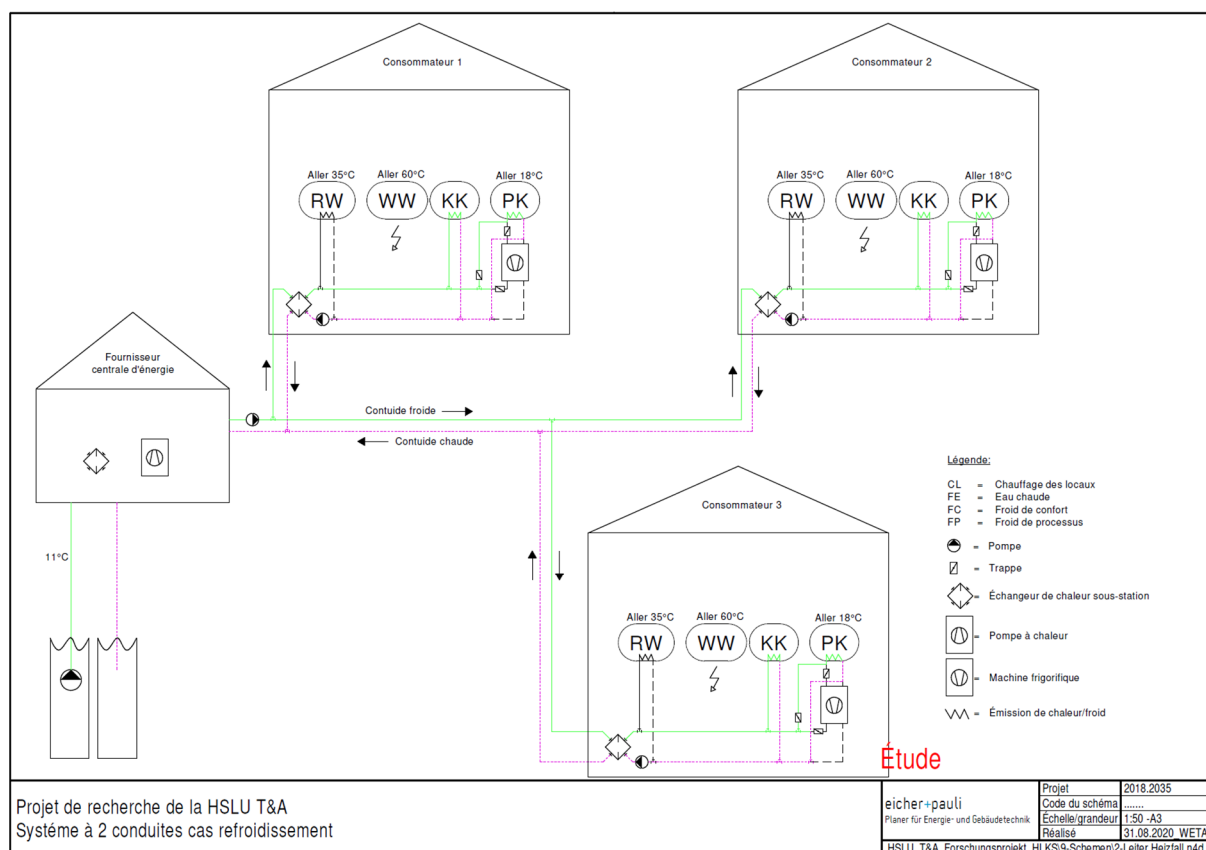


Figure 8, Schéma Mode refroidissement à 2 conduites

## Dimensionnement de la production de chaleur

Couverture des besoins énergétiques	[kW]	[MWh]	Part de l'énergie
Pompe à chaleur NH3	1'100	1'384	87%
Pompe à chaleur HFO *	-	0	0%
Chauffe-eau EP (électrique direct)	25	199	13%

Couverture des besoins énergétiques	[kW]	[MWh]	Part de l'énergie
Freecooling ES	952	606	86%
Machine frigorifique FP	20	100	14%

**Coefficient de performance annuel (COP)**

Le coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur a été calculé pour le chauffage à l'aide du programme PAC-esti Annexe [1]. Outre l'électricité pour la pompe à chaleur, l'électricité pour la pompe de circulation des eaux souterraines est également prise en compte. Il s'agit d'une pompe à chaleur à l'ammoniac. La pompe d'alimentation est ajoutée séparément au besoin en énergie de la centrale avec 2'200 TPL.

COP PAC	5.2
COP Froid	15.0 <sup>5</sup>

**Besoins en énergie et en puissance centrale énergétique**

La demande énergétique finale annuelle a été déterminée à partir des données sur l'énergie et le rendement énergétique calculés ci-dessus:

Électricité PAC-CL	291 MWh/an
Pompe aller principale	12 MWh/an
Froid	47 MWh/an
Somme électricité	350 MWh/an

La puissance électrique a une influence sur les coûts d'exploitation d'un réseau de chauffage, c'est pourquoi elle est indiquée ici et prise en compte dans le calcul de rentabilité. Les principaux consommateurs d'électricité/de chaleur sont indiqués, la puissance électrique pour les pompes auxiliaires n'est pas prise en compte.

ES-pompe	8 kW
PAC	262 kW
Pompe aller principale	8 kW
Somme	278 kW

---

<sup>5</sup>Conformément à l'outil de la SIA 2024, feuille production, refroidissement direct de l'eau souterraine

### 7.15.4 Variante anergie

Dans la variante anergie, l'énergie des eaux souterraines est transportée dans le réseau d'anergie. L'élévation de la température pour le chauffage des locaux est faite au moyen de pompes à chaleur eau-eau HFO décentralisées. En raison des faibles besoins en énergie de ruban, l'ECS est préparée de manière décentralisée.

Variantes		anergie
Chauffage	centralisé	
	décentralisé	X
Eau chaude	centralisée	
	décentralisée	X
Froid de confort	centralisé	X
	décentralisé	
Froid industriel	centralisé	X
	décentralisé	
Flux de fluide	dirigé	
	non dirigé	X
Flux d'énergie	unidirectionnel	
	bidirectionnel	X
Sous-stations	direct	X
	indirect	
Nombre de conduites	2 conduites	X
	4 conduites	

Tableau 10, Matrice des variantes anergie

### Besoins en énergie et en puissance du périmètre

Besoins en chaleur	1' 583 MWh/an
Besoins en puissance	1' 073 kW
Besoins en froid	706 MWh/an
Besoins en puissance frigorifique	953 kW

## Mode chauffage et refroidissement

En mode chauffage (hiver), le réseau d'énergie sert de source aux pompes à chaleur décentralisées pour le chauffage. L'ECS est préparée de manière décentralisée. Le FP est couvert directement par les eaux souterraines.

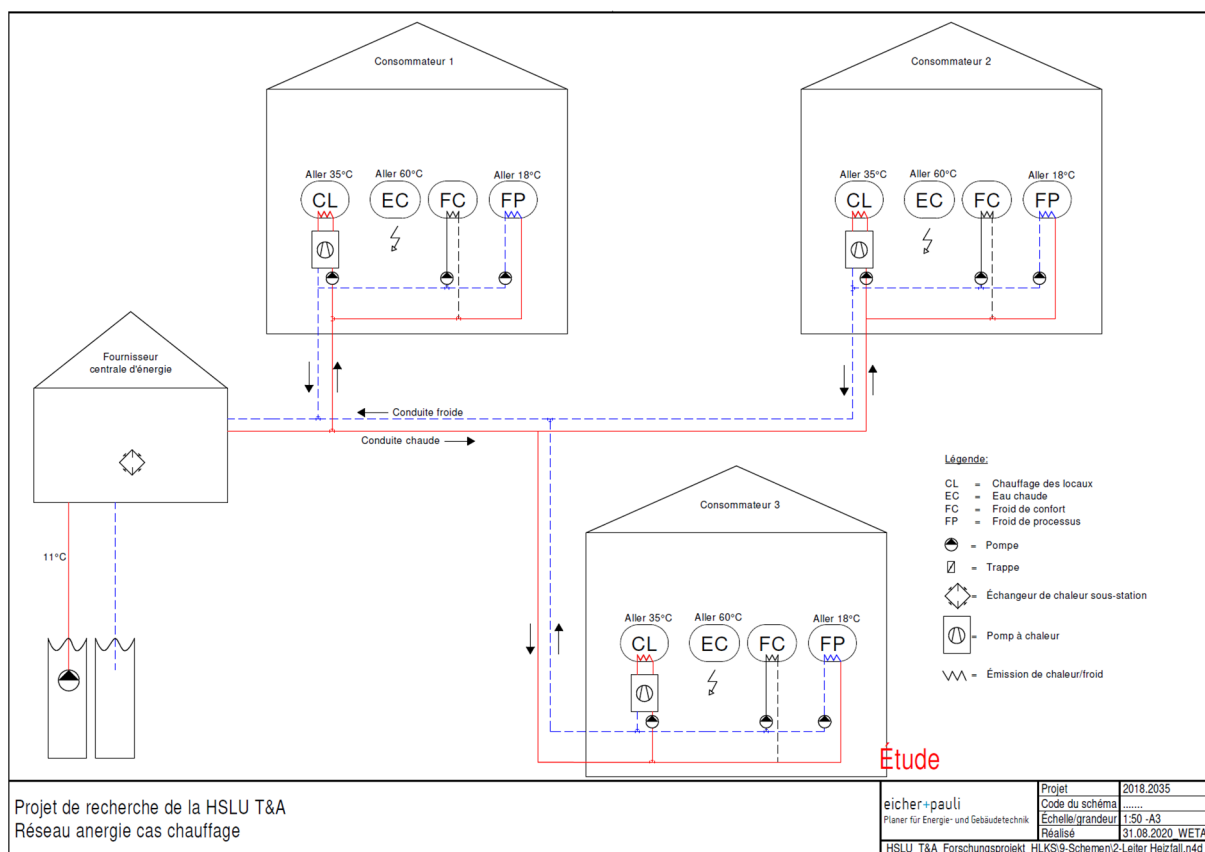


Figure 9, Schéma Réseau d'anergie mode chauffage

En mode refroidissement (été), la pompe à chaleur décentralisée est hors service, car il n'y a pas de besoin en chauffage pour les locaux. Les eaux souterraines couvrent les besoins du FC et du FP. Dans ce cas, la puissance de refroidissement, et donc le flux volumétrique, est supérieure à la puissance de chauffage. Le sens du flux du réseau est ainsi inversé.

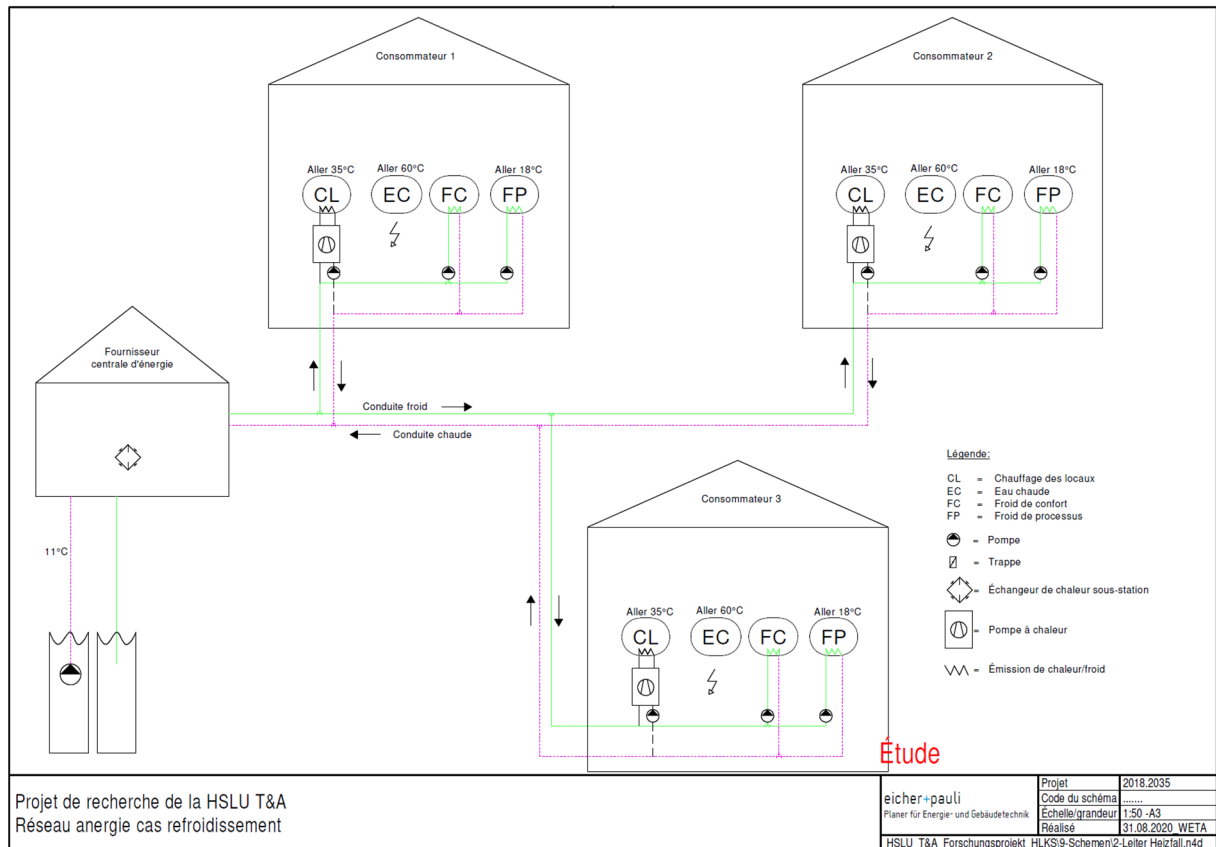


Figure 10, Schéma Réseau d'anergie mode refroidissement

### Choix du fluide frigorigène

Le périmètre est considérée dans sa totalité et pour toutes les variantes. Les interfaces se trouvent du côté secondaire après l'élévation de température. La puissance globale est desservie par un seul fournisseur. C'est la raison pour laquelle seuls des fluides frigorigènes qui correspondent à ceux de l'ORRChim 2018, dans une plage de puissance de 1'073 kW de chaleur, ont été utilisés. Il s'agit essentiellement de réfrigérants naturels et de HFO. Dans la plage de puissance inférieure des sous-stations (10-450 kW), les fluides frigorigènes naturels sont difficiles à utiliser de manière standard. HFO est donc le bon choix. Ce produit a presque les mêmes exigences de sécurité que l'ammoniac.



**Dimensionnement de la production de chaleur**

Couverture des besoins énergétiques	[kW]	[MWh]	Part de l'énergie
Pompe à chaleur NH3	-	0	0%
Pompe à chaleur HFO	1'100	1'3840	87%
Chauffe-eau ECS (électrique direct)	25	199	13%

Couverture des besoins énergétiques	[kW]	[MWh]	Part de l'énergie
Freecooling ES	952	706	100%
Machine frigorifique FP	-	0	0%

**Coefficient de performance annuel (COP)**

Le coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur a été calculé pour le chauffage à l'aide du programme PAC-esti Annexe [2]. Outre l'électricité pour la pompe à chaleur, l'électricité pour la pompe des eaux souterraines a également prise en compte. Les pompes à chaleur décentralisées sont des pompes à chaleur HFO. La pompe de circulation est ajoutée séparément au besoin énergétique de la centrale avec 2'200 heure à pleines charge.

COP PAC	5.2
COP Froid	15.0 <sup>6</sup>

**Besoins en énergie et en puissance de la centrale d'énergie**

Le besoin en énergie finale annuel a été déterminé à partir des données sur l'énergie et le rendement énergétique calculés ci-dessus:

Électricité PAC-CL	291 MWh/an
Pompe aller principale	12 MWh/an
Froid	47 MWh/an
Somme électricité	350 MWh/an

La puissance électrique absorbée a une influence sur les coûts d'exploitation d'un réseau de chauffage, c'est pourquoi elle est indiquée ici et prise en compte dans le calcul de rentabilité. Les principaux consommateurs d'électricité/de chaleur sont indiqués, la puissance électrique pour les exploitations auxiliaires n'est pas prise en compte.

Pompe-ES	8 kW
PAC	262 kW
Pompe aller principale	8 kW
Somme	278 kW

<sup>6</sup>Conformément à l'outil de la SIA 2024, feuille production, refroidissement direct eaux souterraines

## 8 Rentabilité et écologie

La comparaison économique de toutes les mesures constitue le critère le plus important pour le choix du système. L'évaluation de la rentabilité économique est obtenue au moyen de la méthode des annuités dynamique et donc en comparant les coûts annuels. Il s'agit des coûts d'énergie, de maintenance et de capital.

Les coûts énergétiques correspondent exclusivement aux coûts d'électricité des générateurs de chaleur et de la distribution. Ils sont basés sur les valeurs actuelles du marché.

L'estimation des coûts de service et de maintenance d'un facteur pondéré sur les investissements est effectuée selon des directives générales<sup>7</sup>, des données du fabricant et des valeurs empiriques.

Les coûts de capital sont calculés sur la base des investissements et de la durée de vie technique moyenne de la variante en question.

L'énergie primaire et les équivalents en CO<sub>2</sub> déterminent les critères de décision écologiques.

### 8.1 Bases du calcul économique et écologique

Taux d'intérêt du capital	2.25	%	
Prix de l'énergie électrique	0 138	CHF/kWh	
Prix de base électricité par kW	86.4	CHF/kW*a	
Émissions de CO <sub>2</sub> électricité*	0.102	T CO <sub>2</sub> / MWh	(Mix de consommation suisse)
Énergie primaire totale électricité*	2.52	kWh oil-eq	(Mix de consommation suisse)

\* selon KBOB / eco-bau / IPB 2009/1:2016

Tableau 11 Bases du calcul économique et écologique

### 8.2 Investissements ± 25 %

Pour estimer les investissement des éléments de l'installation les plus significatifs, des offres avec prix indicatifs ont été requises aux fournisseurs. Tous les autres investissements sont basés sur l'expérience de projets réalisés. Dans le cas où les valeurs empiriques existantes ne correspondaient pas aux dimensions requises, les investissements ont été corrigés à l'aide de la formule suivante:

$$K2 = a + K1 \cdot \left(\frac{Q2}{Q1}\right)^{0.71}$$

- a: Coûts fixes (CHF)  
 K1: Coûts nominaux (CHF)  
 K2: Coûts effectifs (CHF)

<sup>7</sup> Directive VDI 2067, septembre 2000; Rentabilité des installations thermiques, données de base et calcul des coûts

Q2: Valeur de référence (m<sup>3</sup>/h, kW, CHF/m<sup>2</sup>, etc.)

Q1: Valeur de référence nominale (m<sup>3</sup>/h, kW, CHF/m<sup>2</sup>, etc.)

Les honoraires sont calculés sur une base de 20 % du montant de la construction .

Les investissements pour les variantes correspondantes sont indiqués ci-dessous, divisés en sections. Ceux-ci sont adaptés au périmètre et sont basés sur des offres avec prix indicatifs ainsi que sur des valeurs comparatives obtenues dans le cadre de projets réalisés par e+p.

Vu que la précision de l'estimation des coûts est de l'ordre de  $\pm 25\%$ , il faut souligner ici que toutes les variantes se situent au même niveau d'investissement. Indépendamment de cette réflexion, la variante à 2 conduites est la plus favorable en termes d'investissement, ce qui est principalement dû aux épargnes de deux conduites. La variante anergie est la plus coûteuse à cause du fait que des pompes à chaleur HFO sont nécessaires dans les sous-stations. Ces sous-stations avec le HFO entraînent des investissements dans les équipements de ventilation et de sécurité.

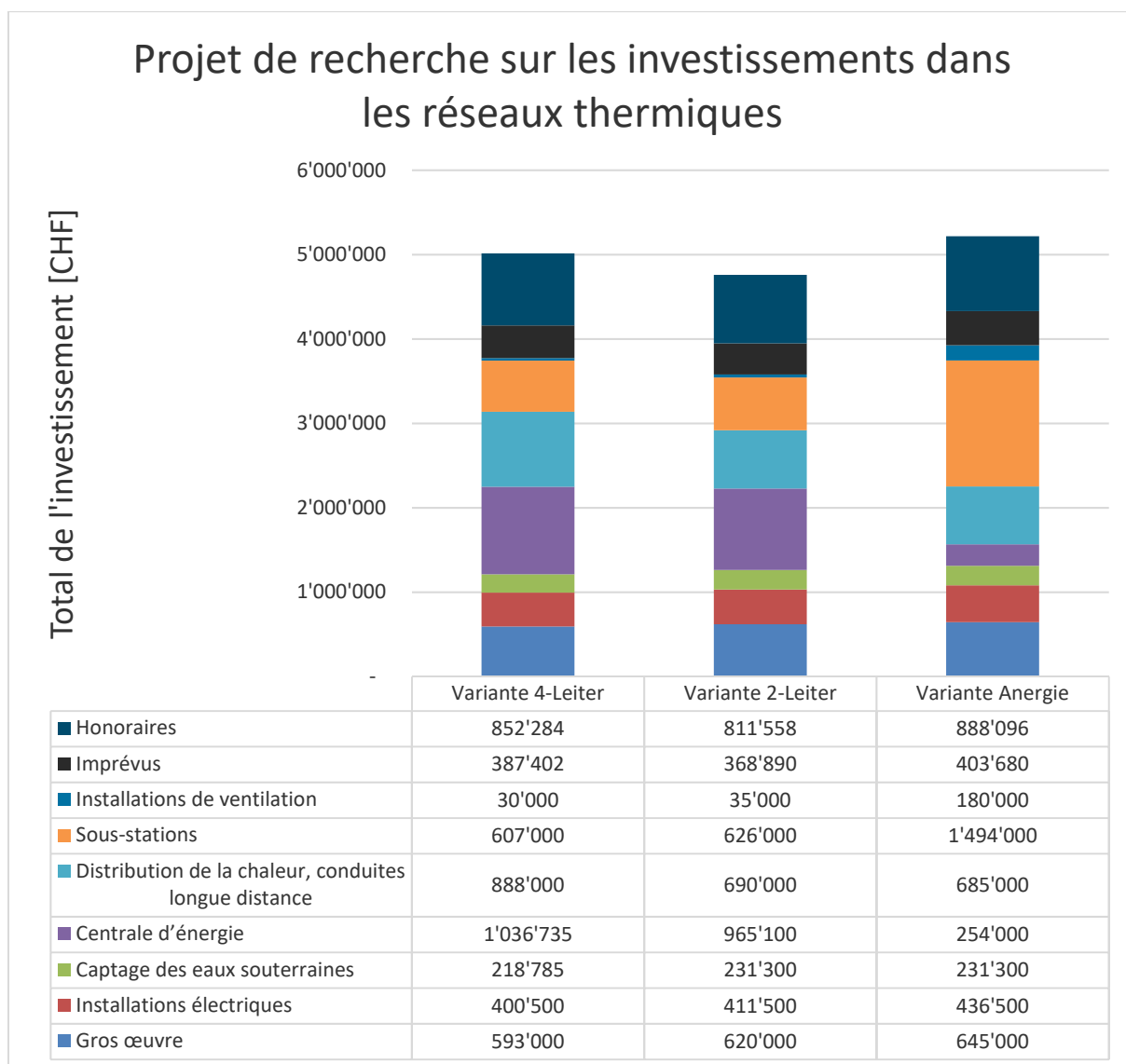


Figure 11, Investissements.

L'enveloppe du bâtiment a été conçue en fonction des centrales énergétiques. La variante anergie nécessite plus d'espace qu'une grande centrale en raison des différentes petites centrales.

### 8.3 Durée de vie

L'estimation de la durée de vie est calculée sur la base d'expériences et de normes<sup>8</sup>. Les variantes ont une durée de vie différente en raison des différents éléments du système. Dans les centrales énergétiques, par exemple, les pompes à chaleur de processus ont une durée de vie d'environ 30 ans, alors que les pompes à chaleur décentralisées ont une durée de vie d'environ 20 ans. Ces différences sont prises en compte dans le calcul.

	4 conduites	2 conduites	anergie
Durée de vie moyenne des éléments de l'installation en années	35	34	32

### 8.4 Frais de maintenance et de réparation

Un facteur pondéré pour les investissements, basée sur les directives<sup>9</sup>, les données du fabricant et des valeurs empiriques, a été estimé.

### 8.5 Coûts annuels

À ce stade, il convient de souligner une fois de plus qu'il s'agit d'une étude comparative entre systèmes et non d'une étude visant à évaluer la rentabilité des réseaux thermiques exploitant les eaux souterraines.

Les coûts annuels sont indiqués dans un diagramme à barres ci-dessous. Dans cette comparaison, la variante à 2 conduites est la plus économique.

---

<sup>8</sup>Directive VDI 2067, septembre 2000; Rentabilité des installations techniques

<sup>9</sup>Directive VDI 2067, septembre 2000; Rentabilité des installations techniques

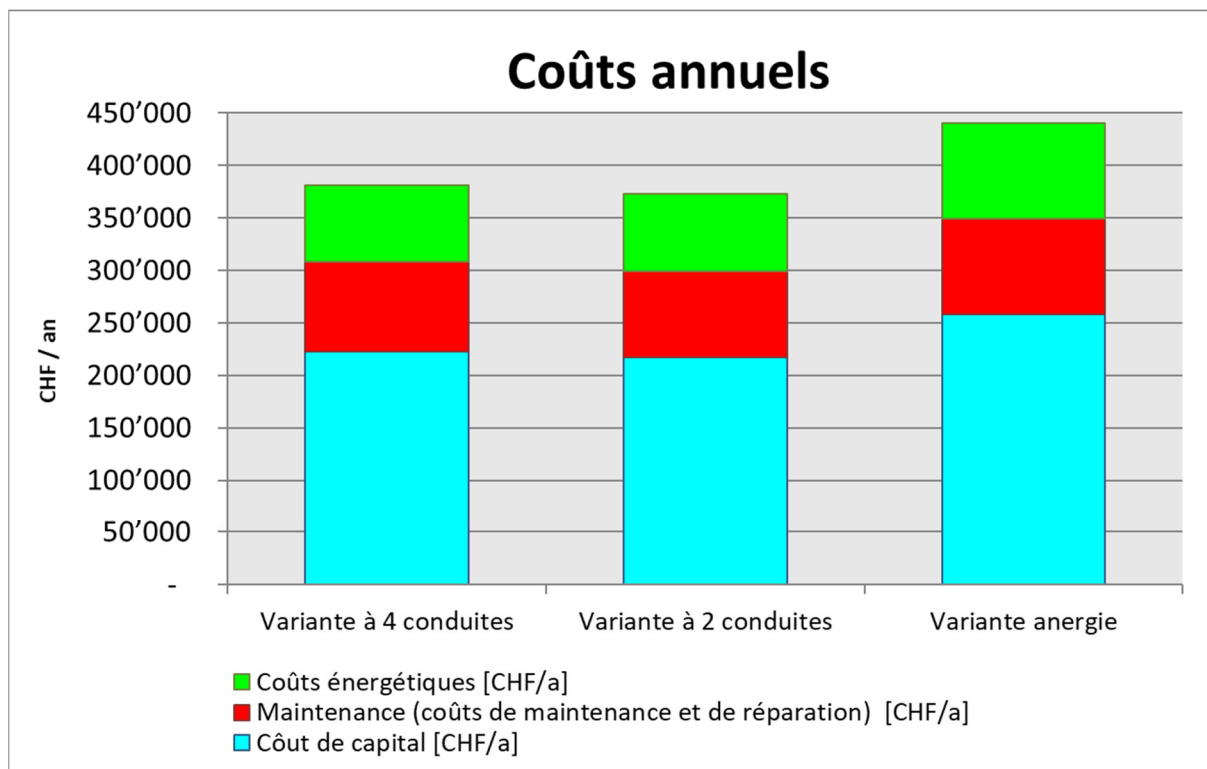


Figure 12, Coûts annuels

La variante anergie présente également les coûts de capital les plus élevés en raison de l'investissement élevé et de la durée de vie moyenne plus courte.

La maintenance de diverses petites centrales énergétiques est à peu près aussi coûteuse que celle d'une grande centrale énergétique unique couvrant tout le périmètre.

Les coûts énergétiques sont les plus élevés dans la variante anergie en raison des meilleures propriétés thermiques du NH<sub>3</sub> par rapport au HFO.

## 8.6 Coûts de revient

Les coûts de revient mettent en évidence la relation entre les coûts annuels et la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement. Les coûts de revient doivent être considérés comme une valeur comparative entre les variantes.

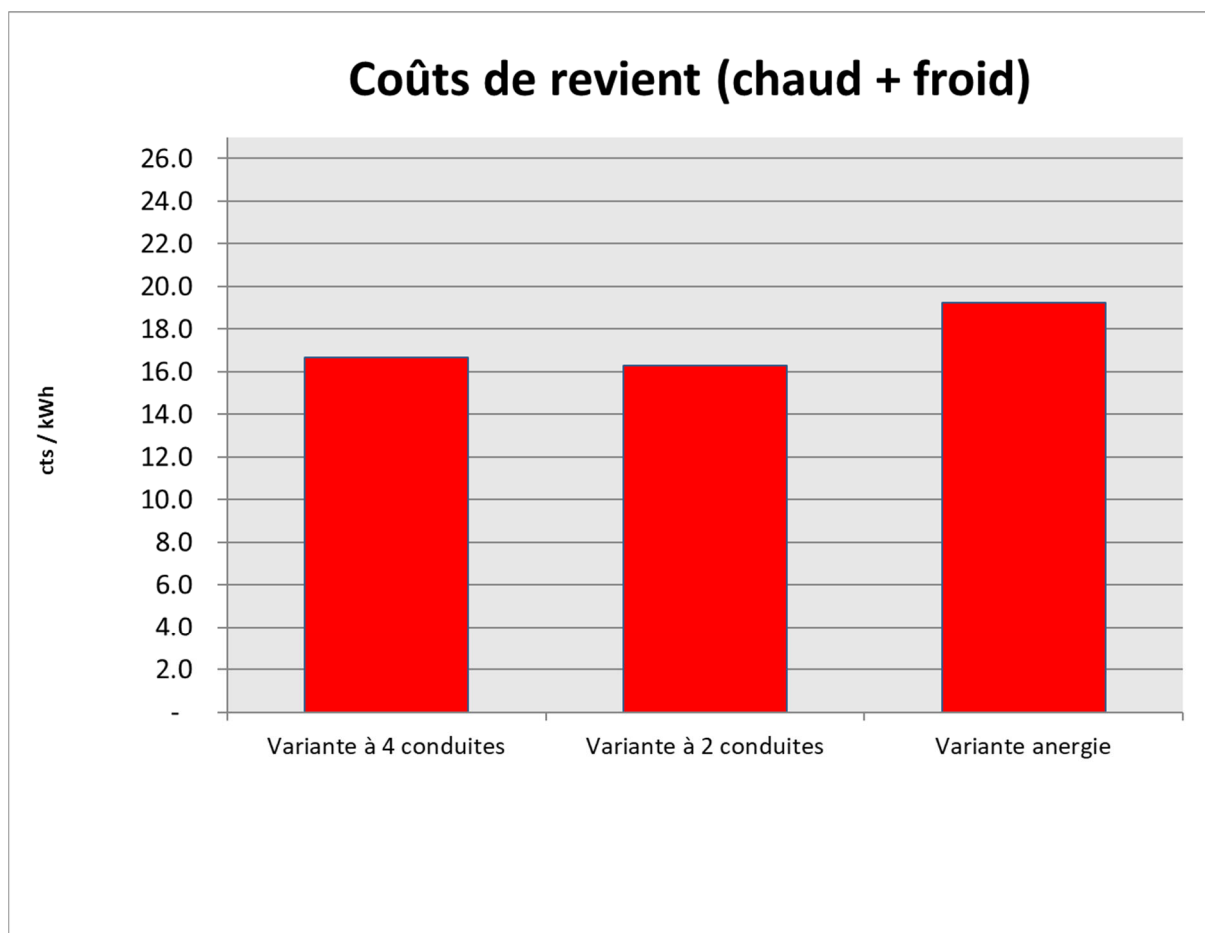


Figure 13, Coûts de revient

Les coûts de revient sont en particulier déterminés par la vente du froid dans le secteur économique.

## 8.7 Écologie

L'impact écologique est évaluée au moyen des émissions de gaz à effet de serre (équivalent CO<sub>2</sub>) et des besoins en énergie primaire. Les facteurs fondamentaux sont tirés des écobi-lans dans la construction<sup>10</sup>.

Les différences écologiques sont marginales, car elles renoncent toutes aux énergies fossiles. En raison du réfrigérant HFO, la variante anergie a des propriétés thermiques moins favorables que l'ammoniac et donc une puissance requise plus élevée, qui s'exprime en un équivalent CO<sub>2</sub> plus élevé.

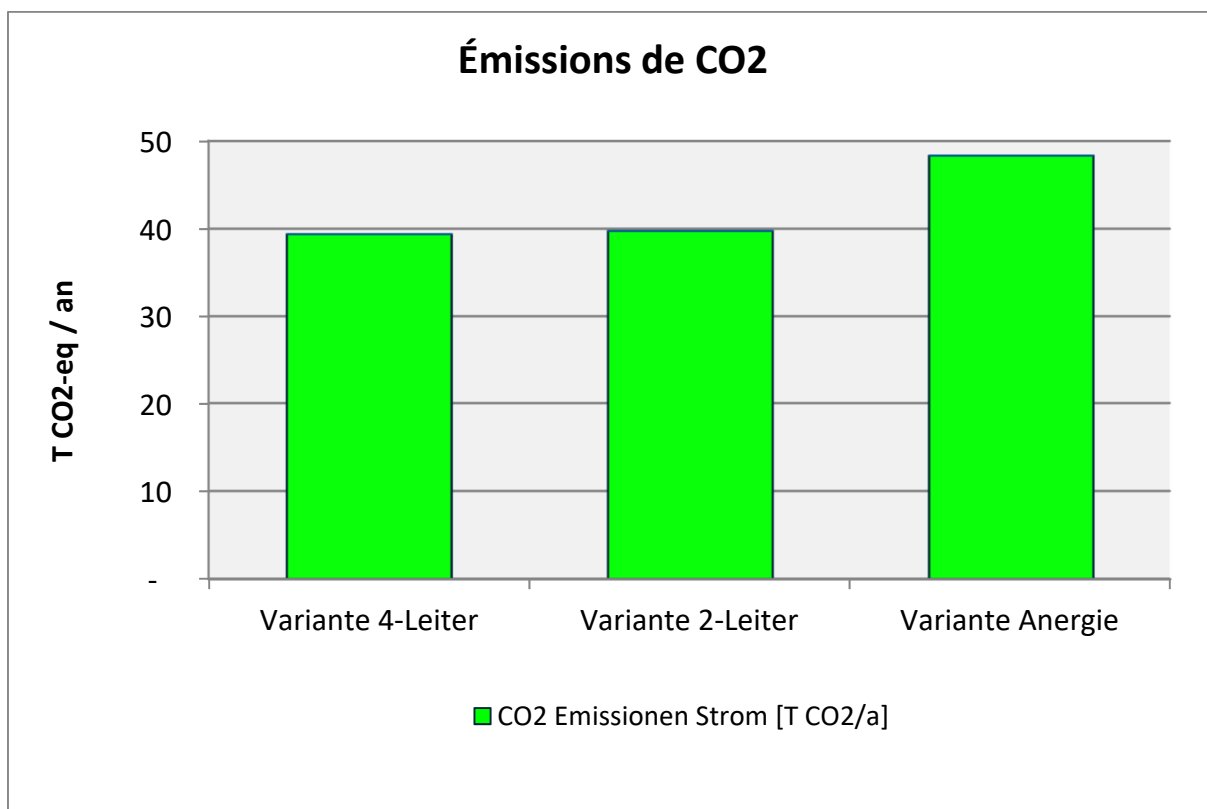


Figure 14, Émissions de CO<sub>2</sub>

Comme les émissions ne dépendent que de la consommation d'électricité, cette affirmation ne change pas lorsque l'on considère l'énergie primaire. L'énergie primaire n'est donc plus prise en considération.

<sup>10</sup>KBOB / eco-bau / IPB 2009/1:2016

## 9 Conclusion

Le climat se réchauffe et les maisons sont mieux isolées, ce qui réduit la densité thermique et donc la rentabilité des réseaux thermiques.

Les coûts de revient se situent pour toutes les variantes entre 16,3 et - 19.2 c./kWh et cela malgré une couverture complète de la puissance par les pompes à chaleur. Ces chiffres se situent dans une fourchette de rentabilité acceptable, principalement grâce à la vente de froid, qui doit être dorénavant considéré comme une opportunité.

La méthode de calcul de l'énergie et de la puissance au moyen de la norme SIA 2024 est pratique, car elle permet le couplage entre la chaleur et le froid dans les premières phases. Cependant, il existe une relation entre les besoins en chaleur et besoins en puissance thermique qui est discutable dans la pratique.

La densité énergétique linéaire de 4,72 MWh/an est très élevée par rapport à la valeur courante de 2 MWh/Trm/an qui définit la rentabilité d'un réseau seul de chaleur, ce qui est dû à la vente de froid. Cette augmentation de la densité thermique linéaire est nécessaire si la puissance totale doit être couverte par les pompes à chaleur tout en restant économique. Dans le périmètre décrit, les énergies en ruban sont très faibles. Dans d'autres réseaux de chaleur, la demande d'eau chaude peut être plus importante, ce qui peut accroître la rentabilité.

La version à 2 conduites (système change over) est utilisée parce qu'il y a un point de commutation clair dans le profil de la demande du périmètre. Si le besoin en eau chaude est plus élevé, ce système ne peut être utilisé que de façon limitée en raison de l'utilisation simultanée de la chaleur et du froid.

Les variantes à 4 conduites et anergie peuvent être réalisées même en cas de simultanéité élevée.

On notera en particulier les investissements élevés dans les sous-stations de la variante anergie, qui sont liés au choix du réfrigérant HFO. En outre, il y a le facteur de simultanéité, qui ne peut pas être exploité par les pompes à chaleur installées de manière décentralisée. L'investissement pour la puissance à fournir est donc plus élevé qu'avec les systèmes centralisés. Avec l'augmentation de la taille d'un réseau de chaleur (plus de clients), cet effet augmente en raison de la simultanéité plus faible.

Le type de couverture énergétique est composé de manière différente dans les variantes:

Couverture des besoins énergétiques	4 conduites		2 conduites		anergie	
Pompe à chaleur NH3	1'384	87%	1'384	87%	0	0%
Pompe à chaleur HFO	0	0%	0	0%	1'384	87%
Chauffe-eau EP (électrique direct)	199	13%	199	13%	199	13%

Tableau 12, Couverture énergétique de la chaleur, valeurs en MWh/an

Dans le système à deux conduites, le FP est pris en charge par des machines frigorifiques décentralisées en hiver.



Couverture des besoins énergétiques	4 conduites		2 conduites		anergie	
Freecooling ES	706	100%	606	86%	706	100%
Machine frigorifique FP	0	0%	100	14%	0	0%

Tableau 13, Couverture énergétique du refroidissement, valeurs en MWh/an

Les deux solutions centralisées couvrent le besoin par le biais de grandes pompes à chaleur efficaces à l'ammoniac et ont une consommation électrique plus faible grâce aux meilleures propriétés thermiques du NH3 par rapport au HFO.

La variante à 2 conduites présente une consommation d'énergie légèrement plus élevée, car le FP est couvert par des machines frigorifiques décentralisées en hiver.

Agent énergétique	4 conduites	2 conduites	anergie	
Électricité	386	389	474	[MWh/a]

Tableau 14, Variantes agents énergétiques

L'écologie corrèle directement avec les besoins en énergie des installations de chaleur, car toutes les unités de chaleur sont alimentés par le même agent énergétique (électricité). Les émissions de CO2 et les besoins en énergie primaire sont donc les plus faibles pour la variante à 4 conduites, suivie par les variantes à 2 conduites et anergie. Cependant, toutes les variantes sont proches les unes des autres. La variante anergie présente une consommation d'électricité plus élevée, car les pompes à chaleur décentralisées ont un COP plus faible. Elle ne tient pas compte de l'énergie grise et de l'impact environnemental.

Les coûts annuels sont composés d'une part des coûts de capital et de maintenance, qui sont basés sur les investissements, et d'autre part des coûts énergétiques, qui sont basés sur la consommation énergétique. C'est sur ces bases que la rentabilité économique a été déterminée.

Rang	Variante	Coûts annuels [CHF/a]	Écarts relatifs
1	2 conduites	372'885.00	0%
2	4 conduites	381'384.00	2%
3	anergie	415'441.00	11%

Tableau 15, Classement des variantes

La variante à 2 conduites est la moins chère, mais la variante à 4 conduites est quasi équivalente et plus flexible pour le prolongement du réseau à d'autres bâtiments à autres usages. La variante occupe la dernière place en termes d'écologie et de rentabilité.

Ces résultats s'appliquent à l'exemple décrit ci-dessus. Il est recommandé de lancer des études nécessaires pour chaque projet spécifique en phase de conception afin d'obtenir la meilleure solution.

## 10 Perspectives

Suite à cette analyse, les questions suivantes ont été soulevées:

- Analyse des risques;

Analyse du risque de défaillance d'une installation de chaleur pour les différentes variantes.

- Autres sources de chaleur;

Vérifiez les résultats avec d'autres sources de chaleur pour le chauffage et le refroidissement.

- Révision de la première phase en raison de la mise à jour de ORRChim 2018
- Analyse de sensibilité
- Nombre plus élevé de clients raccordés et par conséquent modification de la simultanéité
- Développement futur de fluides frigorigènes à faible PRG et PDO dans la fourchette de puissance de 10 à 350 kW
- Autres utilisations, notamment les utilisations avec une forte demande d'ECS

## 11 Annexe

Liste des annexes:

- Annexe [1] Var NH3 PAC-esti de
- Annexe [2] Var hydrofluorooléfines PAC-esti de

# Wärmepumpen-Berechnungsblatt WPEsti

WPEsti / V 8.2.1 / 30.06.2017  
gültig bis 31.12.2017

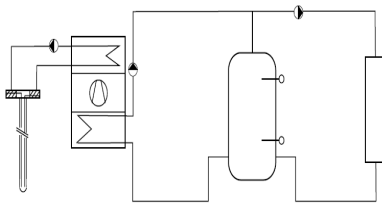
Projekt:

Entscheidungskriterien für die Systemwahl Phase 2, Variante 4-Leiter

## Gebäudedaten

Klimastation			Basel-Binningen
Gebäudekategorie			Verwaltung
Energiebezugsfläche EBF	A <sub>E</sub>	m <sup>2</sup>	51'340
Heizwärmebedarf nach SIA 380/1	Q <sub>h,eff</sub>	kWh/m2a	31
Transmissionswärmeverluste nach SIA 380/1	ausfüllen -> Q <sub>T</sub>	kWh/m2a	
Lüftungswärmeverluste nach SIA 380/1	ausfüllen -> Q <sub>V</sub>	kWh/m2a	
Heizung: Zusätzliche Verteilverluste		%	1%
Sperrzeiten für Wärmepumpe		h/d	0
Heizleistungsbedarf ohne Warmwasser bei -7°C	Vorschlagswert: 905.3	kW	1073
Warmwasserbedarf nach SIA 380/1	Q <sub>ww</sub>	kWh/m2a	0.0
Warmwasser: Zusätzliche Speicher- und Verteilverluste		%	0%

## Wärmepumpen-Anlage

Wärmepumpen-Anlage		WP-Liste		Hersteller:		Eigene Werte	
Name und Typ der Wärmepumpe:				Typ:		W/W	
Wärmequelle:				Wasser-Wasser-Wärmepumpe stufenlos			
Einsatz (Heizung oder Warmwasser):				Heizung			
Heizungsspeicher				mit Heizungs - Speicher			
Betriebsweise der Wärmepumpen-Anlage:				monovalenter Betrieb Heizung			
Quellentemperatur (Verdampfer-Eintritt):		°C					10
Rechenwerte bei TVL=35°C(Qh/COP):		°C					1'073.0kW / 6.5
Heizleistung Wärmepumpe W10/W35		kW					1073
COP W10W35		-					6.45
Heizleistung Wärmepumpe W10/W55		kW					1092
COP W10W55		-					4.36
Elektrische Leistungsaufnahme Förderpumpe:						W	7900
Quellentemperatur (falls nicht 10°C)						°C	
Solltemperatur wärmster Raum (z.B. Badezimmer)				Ti,soll		°C	21.5
Vorlauftemperatur der Heizung: (Ta = -8°C)				T VL		°C	39
Rücklauftemperatur der Heizung: (Ta = -8°C)				T RL		°C	28
Differenz Speichertemperatur - Vorlauftemperatur Heizung				dT Speicher		°C	0
Nicht vorhanden							

## Solaranlage

Keine Solaranlage

## Resultate

	0.0%		
Verluste im Heizbetrieb (Anfahren, Speicher, etc.)	4%	Etah =	96%
Verluste im WW-Betrieb (Anfahren, Speicher, etc.)	0%	Etaw =	100%
Laufzeit der Wärmepumpe		h / a	1'626
Anteil und JAZ der Wärmepumpe für die Heizung	ε = 100.0%	JAZ <sub>h</sub> =	5.20
Anteil und JAZ der Wärmepumpe für Warmwasser		JAZ <sub>ww</sub> =	0.00
Jahresarbeitszahl Heizung + Warmwasser JAZ <sub>h+ww</sub> :	exkl. el. Zusatz	-	0.00

