

Annexe 1: Modèle de simulation pour l'installation de Wollerau

A1.1	Introduction	A1.1
A1.2	Modèles de simulation des principaux composants du système	A1.2
A1.3	Schéma de principe et régulation du système	A1.4
A1.4	Quantités calculées par le modèle de simulation (output)	A1.12
A1.5	Paramètres de simulation pour le système de référence	A1.20
A1.6	Bilan énergétique simulé du système de référence	A1.33

A1.1 Introduction

La qualité des mesures à disposition n'a pas permis de simuler les sous-systèmes de l'installation (pompe à chaleur, machine frigorifique, sondes géothermiques, etc.) et de les calibrer sur les performances thermiques mesurées. L'approche choisie a été de construire un modèle de simulation de l'ensemble du système et de reproduire les performances thermiques globales mesurées, bien que ces dernières soient approximatives et parfois estimées en raison de trous de mesure importants. Le but de cette annexe est de documenter le modèle de simulation élaboré, de manière à faciliter son utilisation pour la simulation d'un système semblable.

Dans un premier temps les principaux modèles de simulations utilisés sont mentionnés et référencés. Ensuite le schéma de principe du système est présenté de même que son principe de régulation. Les quantités simulées sont énumérées et décrites. Finalement les paramètres de simulation utilisés pour reproduire les performances thermiques mesurées de l'installation de Wollerau sont énumérés et définissent le système de référence. Le bilan énergétique du système de référence est montré.

A1.2 Modèles de simulation des principaux composants du système

Le programme de simulation de système thermique TRNSYS 15.3 (Klein S. A. et al., 2003) est à la base du modèle de simulation de l'installation Wollerau. L'avantage de TRNSYS est de pouvoir simuler chaque composant du système par un modèle de simulation adéquat et de les connecter entre eux pour les faire correspondre au schéma de principe du système. Chaque composant est donc simulé en tant que partie intégrante du système.

Les composants mentionnés ci-dessous ont tous été développés en dehors du programme TRNSYS. En conséquence ils ne sont pas inclus dans le « standard package » de TRNSYS.

Sondes géothermiques

Les modèles de simulation DST et SBM pour sondes géothermiques ont été développés en Suède à l'université de Lund (Hellström, 1989 ; Pahud et Hellström 1996 ; Eskilson, 1986). Ils sont également intégrés dans TRNSYS comme module de calcul de composant de système (Type).

Dans un premier temps, le modèle de calcul **TRNVDSTP** (Pahud et al., 1996a) est utilisé pour développer le modèle de simulation de l'installation de Wollerau. Il permet de simuler un ensemble relativement important de sondes géothermiques régulièrement espacées. La méthodologie suivie pour définir les paramètres de calcul est la même que celle qui a été développée pour la simulation de systèmes avec pieux échangeurs (Fromentin et al., 1997). Elle se base essentiellement sur des paramètres physiques qui permettent de tenir compte des processus thermiques les plus influents. Le modèle TRNVDSTP est utilisé avec la même configuration que celle qui a été implémentée dans PILESIM (Pahud, 1999).

Dans un deuxième temps le modèle TRNVDSTP est substitué par **TRNSBM** (Pahud et al., 1996b). L'avantage de TRNSBM est de prendre en compte la configuration exacte des sondes géothermiques. En revanche le prix à payer est une durée de simulation sensiblement plus élevée.

Pompe à chaleur – machine frigorifique

Le modèle de pompe à chaleur (PAC) utilisé dans YUM (Yearly Utilization Model for Calculating the Seasonal Performance Factor of Electric Driven Heat Pump Heating System) (voir Afjei, 1989) est intégré dans TRNSYS (voir Afjei et al., 1996). Ce module de calcul non standard (**TYPE201**), permet de simuler une PAC électrique air - eau, eau - eau ou saumure - eau. La pompe à chaleur est traitée comme une boîte noire: les puissances thermiques délivrées et électriques consommées dépendent des températures du fluide caloporteur à l'entrée de l'évaporateur et à la sortie du condenseur, conformément aux caractéristiques données par le fabricant. Une constante de temps permet de prendre en compte l'effet transitoire lors d'un enclenchement de la PAC. Le modèle est utilisé en

combinaison avec un autre modèle non standard (voir ci-dessous) pour corriger l'effet d'un débit de fluide traversant l'évaporateur ou le condenseur différent de celui utilisé pour l'établissement des performances de la machine.

Une pompe à chaleur ou machine frigorifique à plusieurs vitesses (ou régimes) est simulée avec plusieurs modèles couplés en parallèle.

Modèles non standards

TYPE299: modèle de régulation d'une pompe à chaleur (ou machine frigorifique) basé sur les températures haut et bas du stockage tampon sur lequel la machine est couplée. Ce modèle permet également de contrôler une machine à plusieurs vitesses (voir la description du TYPEDP99 dans l'annexe 3 de Fromentin et al., 1997).

TYPE300: modèle de régulation développé pour l'installation Wollerau (voir section suivante).

TYPE292: modèle pour corriger un débit de fluide traversant l'évaporateur ou le condenseur d'une PAC/machine frigorifique différent de celui utilisé pour l'établissement des performances de la machine (voir Pahud et al., 2004).

TYPE293: modèle pour limiter la température d'entrée dans l'évaporateur ou le condenseur d'une PAC ou machine frigorifique.

TYPE259: modèle de demande d'énergie thermique simplifié pour générer un profil horaire en fonction de variables météorologiques (température extérieure et ensoleillement). La version originale du modèle (Pahud, 1996) a été améliorée pour simuler également une demande de refroidissement.

A1.3 Schéma de principe et régulation du système

L'agrégat pompe à chaleur/machine frigorifique permet, en mode « chauffage », d'extraire la chaleur du terrain par le biais des sondes géothermiques et éventuellement du stockage de « froid », et de délivrer la chaleur produite dans le stockage de « chaud ». L'agrégat fonctionne ainsi comme une pompe à chaleur. En mode « refroidissement », la chaleur est extraite du stock de froid et les rejets thermiques sont injectés dans le terrain par le biais des sondes géothermiques. L'agrégat fonctionne alors comme une machine frigorifique. Le système peut également fonctionner en mode « refroidissement direct ». L'agrégat est arrêté et le stockage de « froid » est refroidi directement par les sondes géothermiques. Dans ce cas la température du fluide sortant des sondes géothermiques doit être inférieure à celle du stockage de « froid ». Le schéma de principe du système est représenté dans la figure A1.1 (source : Kapp und Morath, 1999).

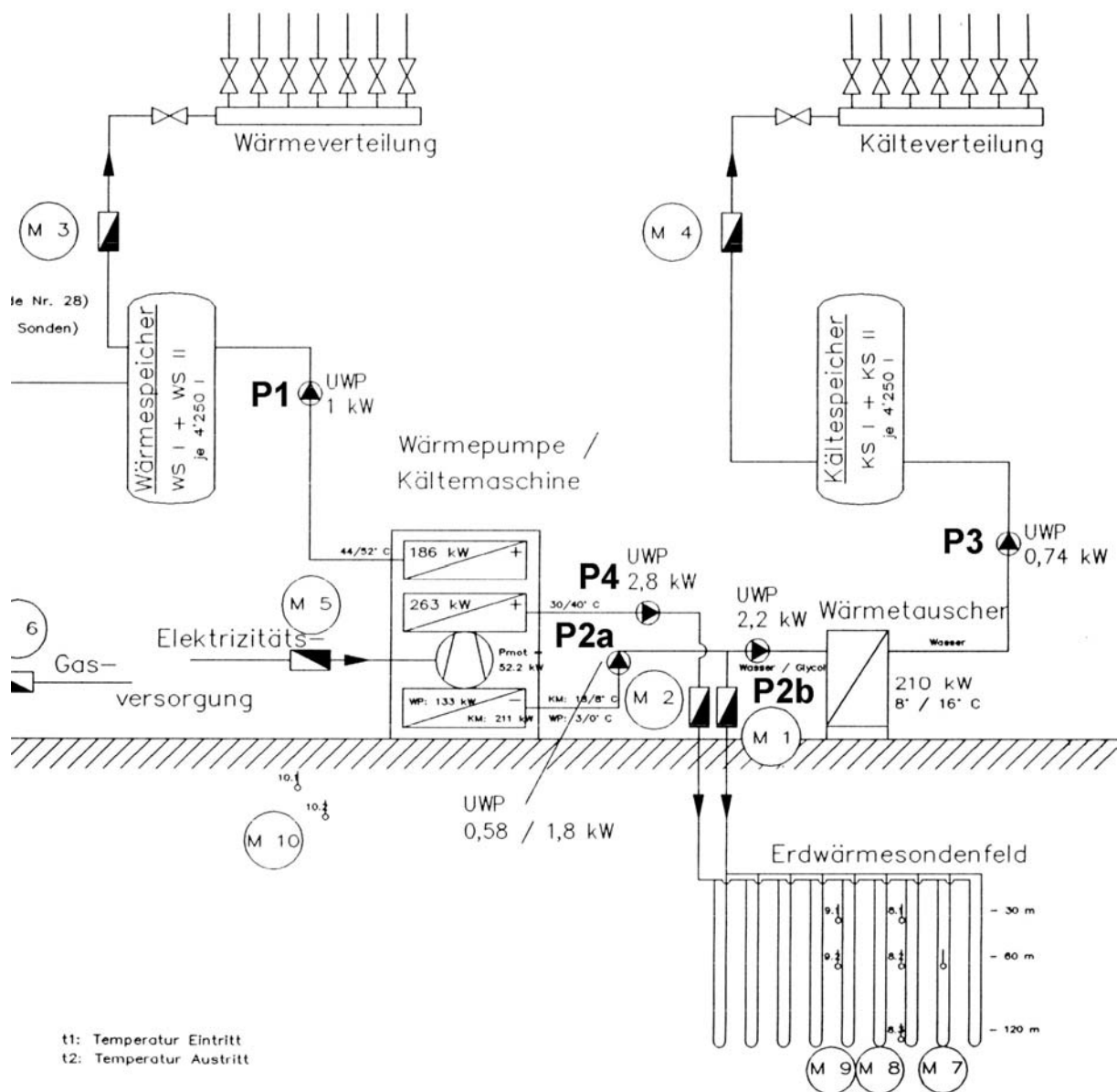
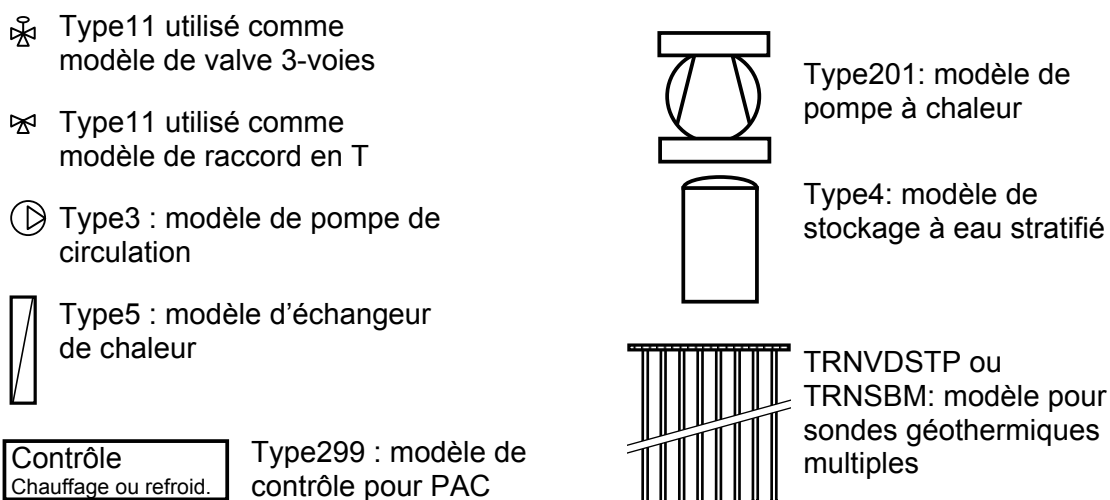


Fig. A1.1 Représentation du schéma de principe de l'installation Wollerau.

L'agrégat pompe à chaleur/machine frigorifique fonctionne à deux allures. Il est simulé par le modèle de pompe à chaleur TYPE201 qui est utilisé 4 fois (2 fois pour le mode pompe à chaleur et 2 fois pour le mode machine frigorifique). La figure A1.2 permet de montrer comment les principaux composants du système (ou modèles de calcul) sont connectés (ou couplés) entre eux pour simuler les différents modes de fonctionnement du système réel. Tous les modèles utilisés dans la simulation du système ne sont pas montrés. La figure A1.2 montre ainsi un schéma de principe virtuel du système. La chaudière à gaz, ne fonctionnant que pour substituer l'agrégat pompe à chaleur/machine frigorifique lorsqu'il est en panne ou en révision, n'est pas simulée.

Légende des modèles représentés dans la figure A1.2 :



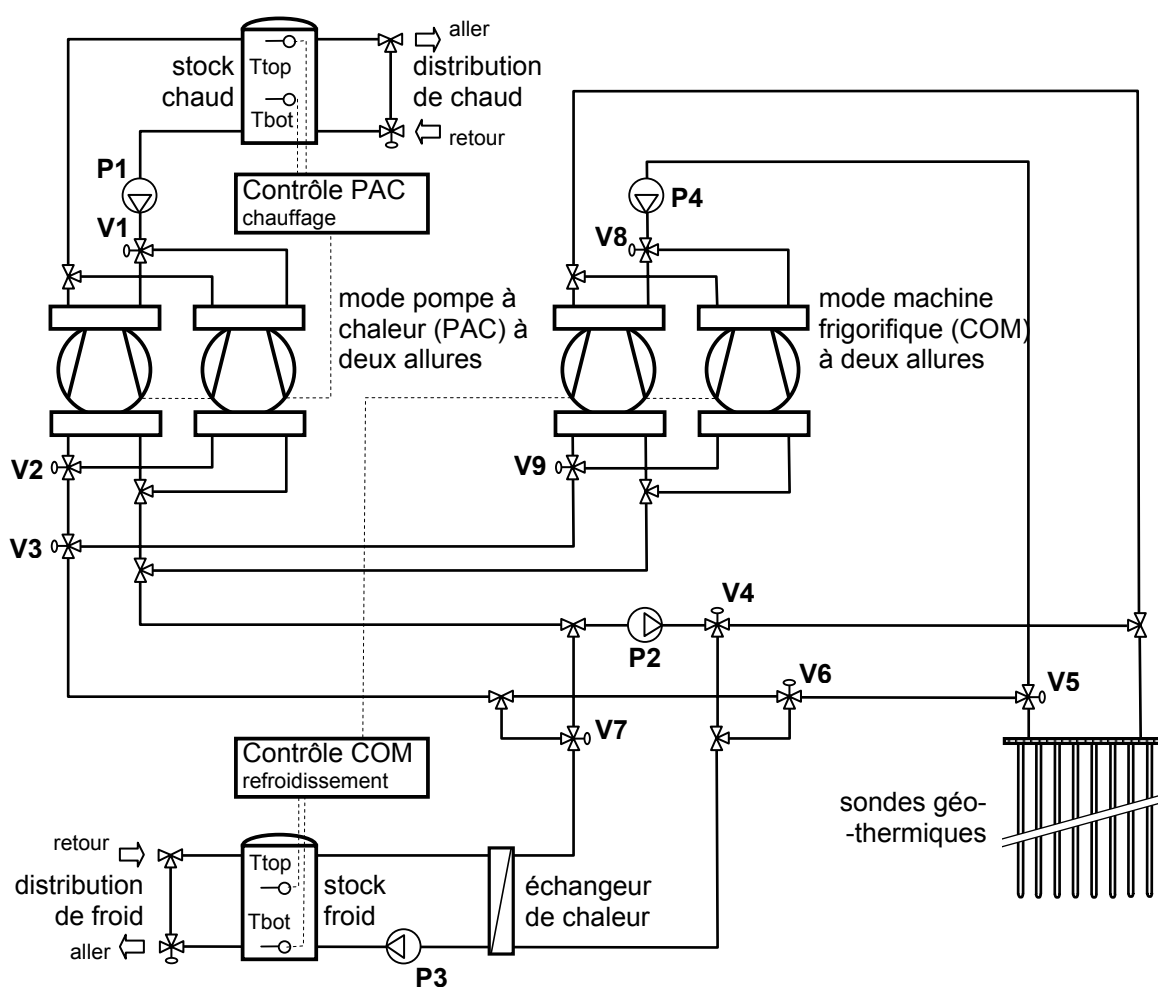
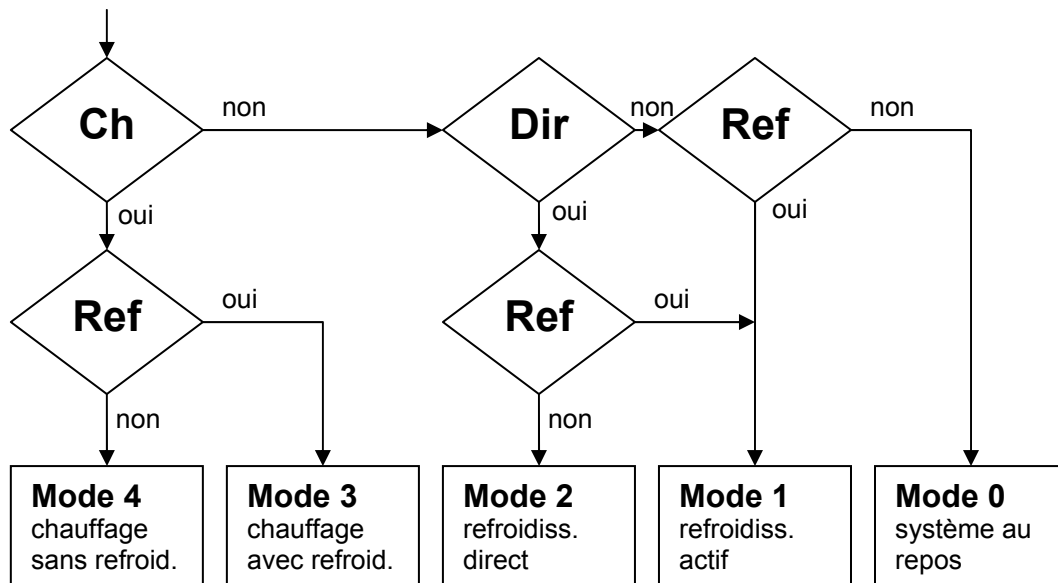


Fig. A1.2 Représentation du schéma de principe pour la simulation du système. Les interconnexions des principaux composants (modèles de calculs) pour la simulation de l'ensemble de l'installation sont montrées.

Le système peut fonctionner dans 4 modes différents, numérotés de 1 à 4. Le mode 0 signifie que le système est à l'arrêt. Les modes de fonctionnement sont définis comme suit :

- Mode 4** : chauffage sans refroidissement
- Mode 3** : chauffage avec refroidissement
- Mode 2** : refroidissement direct
- Mode 1** : refroidissement actif (avec la machine frigorifique)
- Mode 0** : système au repos

Le système est contrôlé selon l'organigramme présenté dans la figure A1.3. Le mode « refroidissement direct » est prioritaire sur le mode « refroidissement actif ».



Ch : test pour vérifier si le stockage de chaud de la distribution de chauffage doit être « chargé ». La réponse du test est « oui » si le composant « contrôle PAC » demande la marche de la pompe à chaleur.

Dir : test pour vérifier si le mode « refroidissement direct » est possible. La réponse du test est « oui » si la température en haut du stock de « froid » est plus élevée que la température du fluide à la sortie des sondes géothermiques. Un contrôleur ON/OFF (TYPE2) est utilisé pour éviter une instabilité du test lors de la détermination du mode de fonctionnement (oscillation entre « oui » et « non »).

Ref : test pour vérifier si le stockage de froid de la distribution de refroidissement doit être « chargé ». La réponse du test est « oui » si le composant « contrôle COM » demande la marche de la machine frigorifique.

Fig. A1.3 Organigramme de contrôle du système, tel que simulé dans le TYPE300.

Bien que le schéma de principe montré dans la figure A1.2 soit virtuel, il est utilisé pour expliquer les différents modes de fonctionnement du système. Les 4 figures suivantes illustrent le fonctionnement des 4 modes. Ils sont définis par l'état des vannes trois voies V3, V4, V5, V6 et V7 et des pompes de circulation P1, P2, P3 et P4. Les débits de fluide dans le condenseur et l'évaporateur de l'agrégat pompe à chaleur – machine frigorifique ne dépendent pas du régime de fonctionnement de ce dernier (50% ou 100%). Le débit total est par conséquent distribué équitablement dans les condenseurs et les évaporateurs des deux modèles de pompes à chaleur couplés en parallèle. Chaque modèle permet de simuler le 50% du régime de fonctionnement de la machine. Par conséquent, les vannes V1, V2, V8 et V9 divisent le débit en deux dans chacun des embranchements (réglage constant de la vanne sur une ouverture de 50%, ce qui, dans la simulation, correspond à 50% du débit entrant).

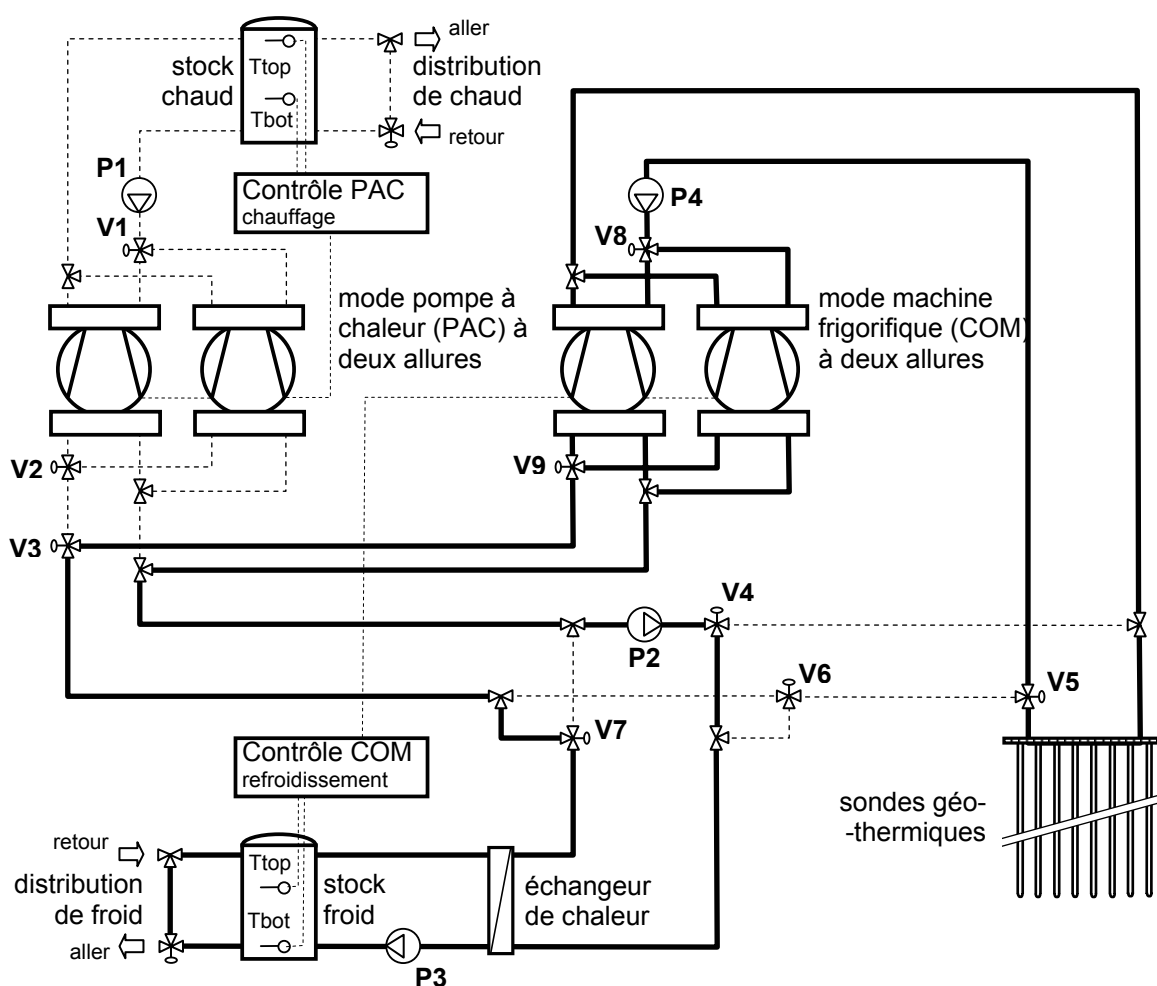


Fig. A1.3 Fonctionnement du système dans le **mode 1**, refroidissement actif avec la machine frigorifique.

L'agrégat fonctionne comme une machine frigorifique. Les pompes P1, P3 et P4 correspondent à celles du schéma de principe de la figure A1.1. Dans ce dernier, la pompe P2a est en réalité deux pompes montées en parallèle et de puissance (et débit) différent. Quand le système est en mode 1, la pompe de faible puissance est enclenchée (0.58 kW, 18 m³/h). La pompe P2b est « bypassée » et n'est pas enclenchée. La simulation du système en mode 1 fixe les états suivants pour les pompes P1, P2, P3 et P4 :

Pompe	Etat (mode 1)	Débit	Puissance électrique consommée
P1	OFF	-	-
P2	ON	18 m ³ /h	0.58 kW
P3	ON	22 m ³ /h	0.74 kW
P4	ON	28 m ³ /h	2.80 kW

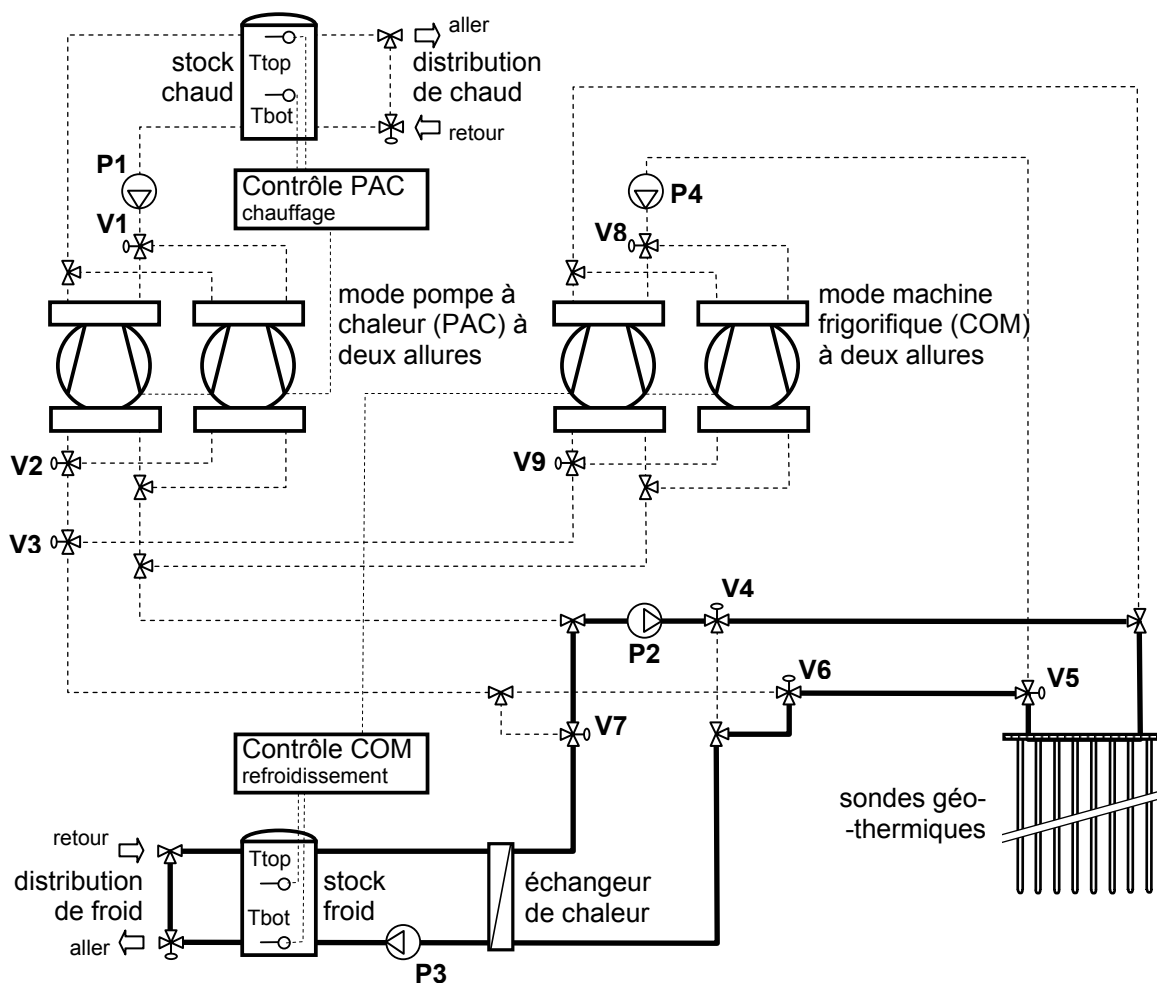


Fig. A1.4 Fonctionnement du système dans le **mode 2**, refroidissement direct, donc sans l'utilisation de la machine frigorifique.

L'agrégat est à l'arrêt. La pompe P2 correspond à la pompe P2b du schéma de principe de la figure A1.1. La simulation du système en mode 2 fixe les états suivants pour les pompes P1, P2, P3 et P4 :

Pompe	Etat (mode 2)	Débit	Puissance électrique consommée
P1	OFF	-	-
P2	ON	24 m ³ /h	2.20 kW
P3	ON	22 m ³ /h	0.74 kW
P4	OFF	-	-

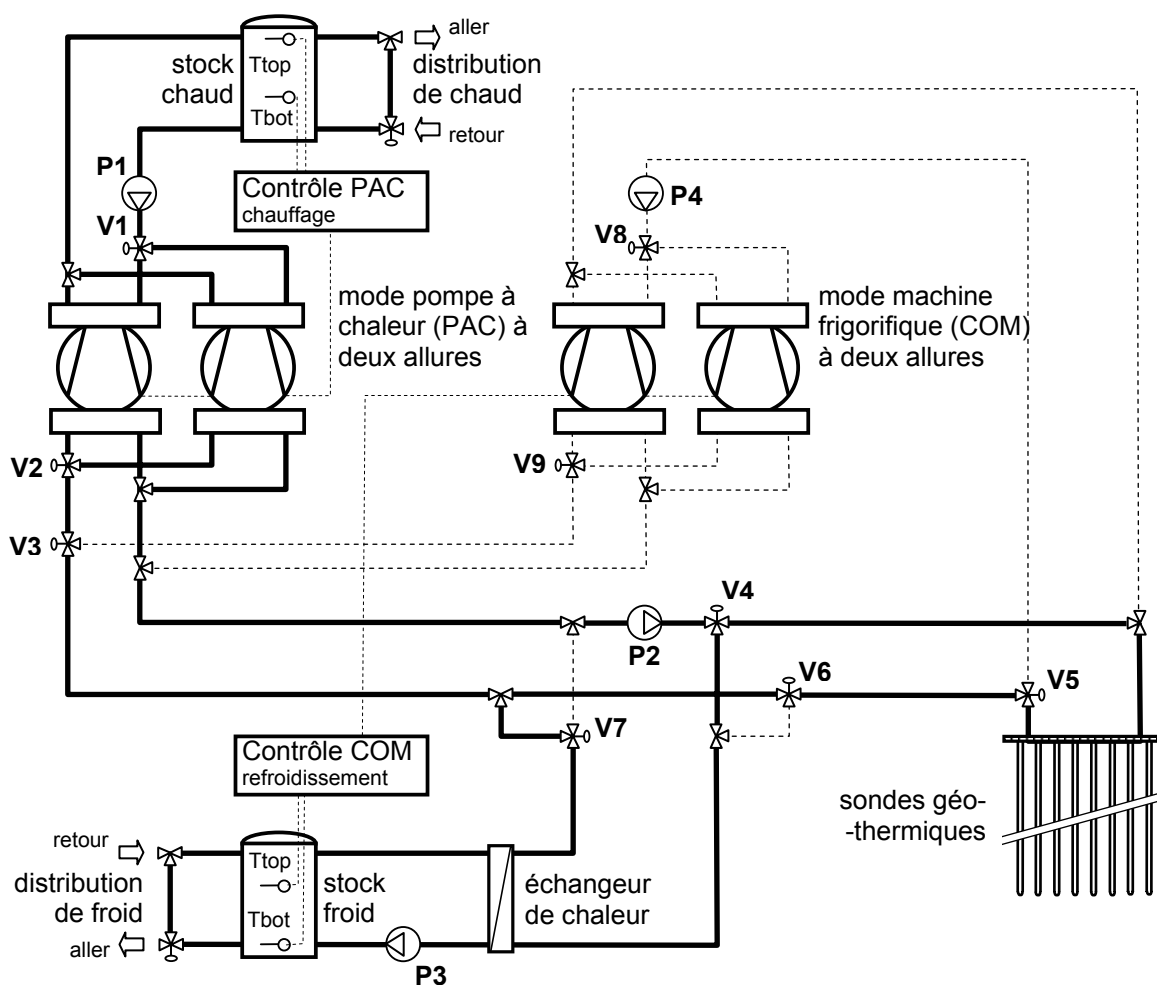


Fig. A1.5 Fonctionnement du système dans le **mode 3**, chauffage avec refroidissement.

L'agrégat fonctionne comme une pompe à chaleur. La pompe P2 correspond à la pompe P2a du schéma de principe de la figure A1.1. Comme expliqué pour le mode 1, la pompe P2a est en réalité deux pompes montées en parallèle et de puissance différente. En mode 3, la pompe la plus puissante est enclenchée (1.8 kW, 39 m³/h). La pompe P2b est « bypassée » et n'est pas enclenchée. La vanne **V4** est réglée pour envoyer **40%** du débit dans l'échangeur du **stock de froid** et **60%** du débit dans les **sondes géothermiques**. En effet, des simulations préliminaires ont montré qu'il n'était pas possible de connecter la pompe à chaleur uniquement sur le stock de froid sans risquer le gel dans l'échangeur de chaleur associé. La simulation du système en mode 3 fixe les états suivants pour les pompes P1, P2, P3 et P4 :

Pompe	Etat (mode 3)	Débit	Puissance électrique consommée
P1	ON	20 m ³ /h	1.00 kW
P2	ON	39 m ³ /h	1.80 kW
P3	ON	22 m ³ /h	0.74 kW
P4	OFF	-	-

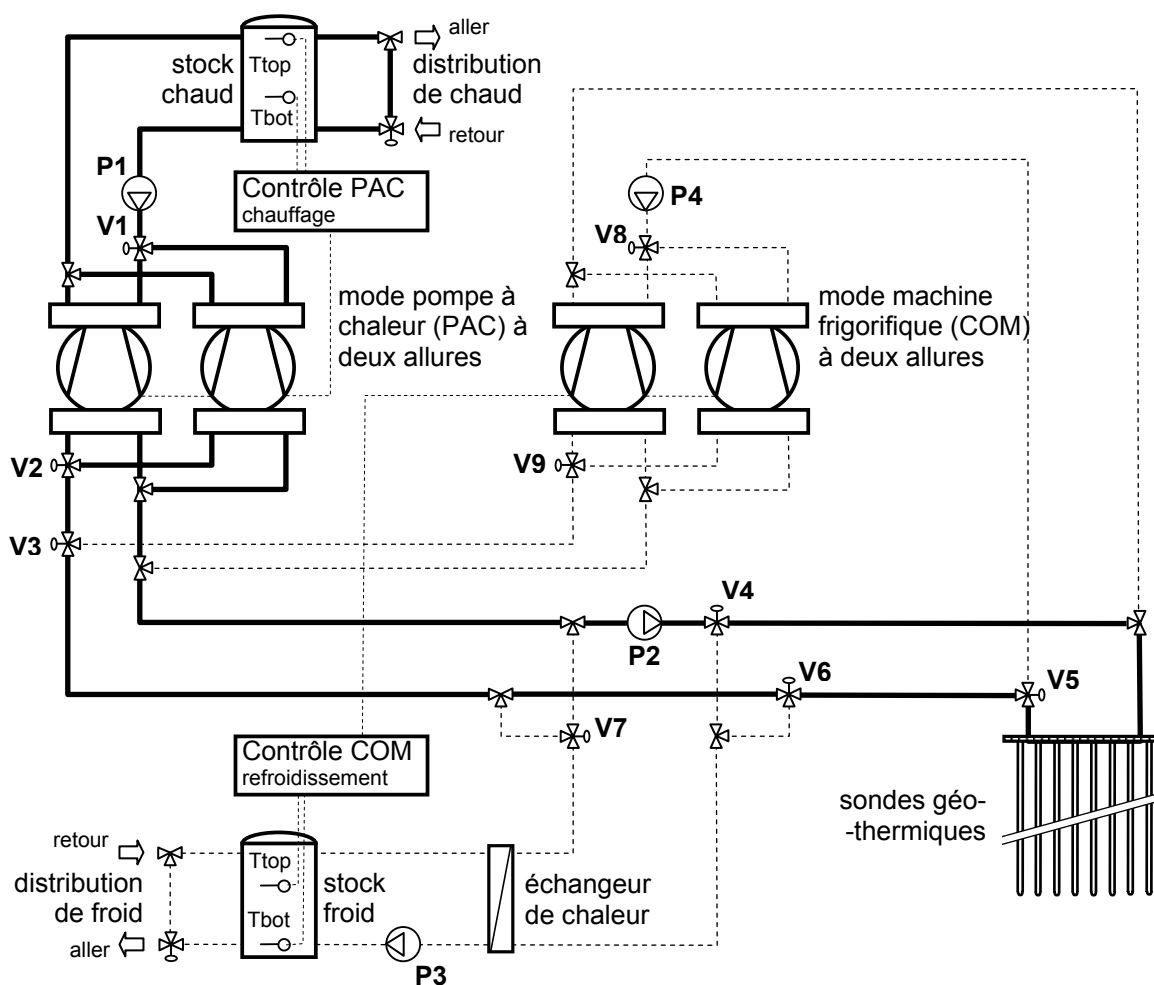


Fig. A1.6 Fonctionnement du système dans le **mode 4**, chauffage sans refroidissement.

L'agrégat fonctionne comme une pompe à chaleur. Comme pour le mode 3, la pompe P2 correspond à la pompe double P2a du schéma de principe de la figure A1.1 (la pompe la plus puissante est enclenchée, 1.8 kW, 39 m³/h). La pompe P2b est « bypassée » et n'est pas enclenchée. La simulation du système en mode 4 fixe les états suivants pour les pompes P1, P2, P3 et P4 :

Pompe	Etat (mode 4)	Débit	Puissance électrique consommée
P1	ON	20 m ³ /h	1.00 kW
P2	ON	39 m ³ /h	1.80 kW
P3	OFF	-	-
P4	OFF	-	-

A1.4 Quantités calculées par le modèle de simulation (output)

Toutes les quantités calculées sur un intervalle de temps donné (quantité d'énergie, niveau de température moyen, valeur maximum, etc.) sont enregistrées dans un fichier « sumary » du type Woll00.sum. L'intervalle de temps est généralement le mois ou l'année. Les quantités sont produites à l'aide de l'usage multiple du type SIMSUM (Simulation Summary) de TRNSYS. Elles sont énumérées et expliquées dans l'ordre d'apparition dans le fichier. Certaines quantités d'énergie sont calculées avec redondance.

MaxHeatDem [kW]: puissance thermique maximum de la demande de chauffage pendant le mois ou l'année.

MaxExtPile [kW]: puissance thermique maximum extraite des sondes géothermiques pendant le mois ou l'année.

MaxColdDem [kW]: puissance thermique maximum de la demande de refroidissement pendant le mois ou l'année.

MaxInjPile [kW]: puissance thermique maximum injectée dans les sondes géothermiques pendant le mois ou l'année.

TinPileMin [degré C]: température minimum du fluide caloporteur à l'entrée des sondes géothermiques pendant le mois ou l'année.

TinPileMax [degré C]: température maximum du fluide caloporteur à l'entrée des sondes géothermiques pendant le mois ou l'année.

TinCHXMin [degré C]: température minimum du fluide caloporteur à l'entrée de l'échangeur de chaleur du stockage de froid pendant le mois ou l'année.

SIMSUM 1

QHeat [kWh]: demande d'énergie totale pour le chauffage.

QHeatCov [kWh]: énergie thermique distribuée pour le chauffage depuis le stock de "chaud" qui est chargé par la pompe à chaleur.

QCold [kWh]: demande d'énergie totale pour le refroidissement.

QColdCov [kWh]: énergie thermique prélevée de la distribution de refroidissement et stockée dans le stock de froid. Ce dernier est déchargé soit par refroidissement direct sur les sondes géothermiques, soit par l'agrégat pompe à chaleur – machine frigorifique.

QHeatPAC [kWh]: énergie thermique totale délivrée par le condenseur de la PAC (PAC: pompe à chaleur).

QHeatPil [kWh]: énergie thermique délivrée par le condenseur de la PAC quand cette dernière est couplée sur les sondes géothermiques (le fonctionnement du système est le mode 4 "chauffage sans refroidissement"). Le reste, QHeatPAC-QHeatPil, est produit lorsque la pompe à chaleur est couplée à la distribution de « froid ».

QCoolTot [kWh]: énergie de refroidissement produite par refroidissement direct (QFreeCool), pour des besoins de chauffage (QHextCold), et par la machine frigorifique (QCoolMach).

$$\mathbf{QCoolTot = QFreeCool + QHextCold + QCoolMach}$$

(voir SIMSUM 2 pour QHextCold et QCoolMach)

QFreeCool [kWh]: énergie de refroidissement produite par refroidissement direct avec les sondes géothermiques. QFreeCool est calculé avec l'énergie transférée à travers l'échangeur de chaleur du stock de froid lorsque le mode de fonctionnement du système est « refroidissement direct » (mode 2).

SIMSUM 2

QHextCold [kWh]: énergie extraite de la distribution de froid par la pompe à chaleur pour couvrir des besoins de chauffage. QHextCold est déterminé par l'énergie extraite du stockage de froid lorsque le système fonctionne en mode 3 (chauffage avec refroidissement).

QHextGrnd [kWh]: énergie extraite du terrain par la pompe à chaleur. QHextGrnd est déterminé par l'énergie extraite à l'évaporateur de la PAC, à laquelle est soustraite l'énergie extraite du stockage de froid pour des besoins de chauffage (QHextCold).

QHinjGrnd [kWh]: énergie injectée dans le terrain (avec les modes 2 « refroidissement direct » et 1 « refroidissement actif avec la machine frigorifique »). QHinjGrnd est déterminée par la somme de l'énergie délivrée au condenseur de la machine frigorifique (QHCoolMach) et de l'énergie gagnée par refroidissement direct (QFreeCool).

L'énergie injectée dans le terrain par la machine frigorifique est:

$$\mathbf{QHCoolMach = QHinjGrnd - QFreeCool}$$

GrndRatio [-]: rapport de l'énergie injectée dans le terrain par l'énergie extraite du terrain:

$$\mathbf{GrndRatio = QHinjGrnd/QHextGrnd}$$

FracHeat [-]: fraction de la demande d'énergie de chauffage totale qui est couverte par la production de la pompe à chaleur:

$$\mathbf{FracHeat = QHeatCov/QHeat}$$

Qext/mPil [kWh/m]: énergie extraite du terrain par mètre de sonde géothermique.

FracCold [-]: fraction de la demande de refroidissement totale qui est couverte par le système avec sondes géothermiques:

$$\mathbf{FracCold = QColdCov/QCold}$$

Qinj/mPil [kWh/m]: énergie injectée dans le terrain par mètre de sonde géothermique.

QCoolMach [kWh]: énergie de refroidissement produite par la machine frigorifique. QCoolMach est déterminé par l'énergie extraite à l'évaporateur de la machine frigorifique.

QelCoolM [kWh]: énergie électrique consommée par le compresseur de la machine frigorifique, calculée par:

$$\mathbf{QelCoolM = QHCoolMach - QCoolMach}$$

QHCoolMach est l'énergie délivrée au condenseur de la machine frigorifique, calculé par $QHinjGrnd - QFreeCool$.

SIMSUM 3

QelPAC [kWh]: énergie électrique consommée par le compresseur de la PAC et son carter.

QelP1 [kWh]: énergie électrique consommée par la pompe de circulation du condenseur de la PAC (pompe P1).

QelP2H [kWh]: énergie électrique consommée par la pompe de circulation du circuit géothermique (pompe P2), quand le système fonctionne pour satisfaire des besoins de chauffage (fonctionnement du système dans les modes 3 et 4, "chauffage avec refroidissement" et "chauffage sans refroidissement").

QelP3H [kWh]: énergie électrique consommée par la pompe de circulation du stock de froid (pompe P3), quand le système fonctionne pour satisfaire des besoins de chauffage (fonctionnement du système dans le mode 3, "chauffage avec refroidissement").

QelP2F [kWh]: énergie électrique consommé par la pompe de circulation du circuit géothermique (pompe P2), quand le système fonctionne dans le mode « refroidissement direct » (mode 2).

QelP3F [kWh]: énergie électrique consommé par la pompe de circulation du stock de froid (pompe P3), quand le système fonctionne dans le mode « refroidissement direct » (mode 2).

QelCOM [kWh]: énergie électrique consommé par le compresseur de la machine frigorifique et son carter.

QelP2C [kWh]: énergie électrique consommé par la pompe de circulation P2, quand le système fonctionne dans le mode « refroidissement actif avec la machine frigorifique » (mode 1).

QelP3C [kWh]: énergie électrique consommé par la pompe de circulation du stock de froid (pompe P3), quand le système fonctionne dans le mode « refroidissement actif avec la machine frigorifique » (mode 1).

QelP4 [kWh]: énergie électrique consommé par la pompe de circulation du condenseur de la machine frigorifique (pompe P4).

SIMSUM 4 – bilan énergétique

QHeatCov [kWh]: énergie thermique distribuée pour le chauffage depuis le stock de "chaud" qui est chargé par la pompe à chaleur.

QHloss [kWh]: pertes thermiques du stock de chaud (pour le chauffage).

QelPACc [kWh]: énergie électrique consommée par le compresseur de la PAC (sans le carter).

BilanH%	<p>[%]: erreur sur le bilan énergétique de la production de chaleur.</p> <p>QHeatCov + DEH + QHloss = QelPACc - QSU + QHextCold</p> <p>DEH : variation de l'énergie interne du stock de chaud (calculé avec la capacité thermique du stock et la variation de température).</p> <p>QSU : énergie extraite du terrain quand le système fonctionne dans les modes 3 ou 4. QSU est calculé avec un signe négatif, d'où le signe (-) dans l'équation pour le comptabiliser positivement.</p>
QColdCov	<p>[kWh]: énergie thermique prélevée de la distribution de refroidissement et stockée dans le stock de froid. Ce dernier est déchargé soit par refroidissement direct sur les sondes géothermiques, soit par l'agrégat pompe à chaleur – machine frigorifique.</p>
QCloss	<p>[kWh]: pertes thermiques du stock de froid (pour le refroidissement). Une perte thermique négative est en fait un gain thermique.</p>
QColdProd	<p>[kWh]: énergie de refroidissement totale, calculée avec:</p> <p>QColdProd = QSL - QelCOMc</p> <p>QColdProd devrait être égal à QCoolTot - QHextCold</p> <p>QelCOMc : énergie électrique consommée par le compresseur de la machine frigorifique (sans le carter). QelCOMc est égal à QelCoolIM (cf. ci-dessus).</p> <p>QSL : énergie injectée dans le terrain quand le système fonctionne dans les modes 1 ou 2 (refroidissement actif ou refroidissement direct). QSL est égal à QFreeCool + QHCoolMach.</p>
BilanC%	<p>[%]: erreur sur le bilan énergétique de la production de refroidissement.</p> <p>QColdCov - DEC - QCloss = QHextCold + QColdProd</p> <p>DEC : variation de l'énergie interne du stock de froid (calculé avec la capacité thermique du stock et la variation de température).</p>
SIMSUM 5	
Imod0	[h]: durée de fonctionnement du système dans le mode 0 (repos).
Imod1	[h]: durée de fonctionnement du système dans le mode 1 (refroidissement actif avec la machine frigorifique).
Imod2	[h]: durée de fonctionnement du système dans le mode 2 (refroidissement direct).
Imod3	[h]: durée de fonctionnement du système dans le mode 3 (chauffage avec refroidissement).
Imod4	[h]: durée de fonctionnement du système dans le mode 4 (chauffage sans refroidissement).
PACerr1	[-]: erreur détectée lors du fonctionnement de la PAC 1 (si la valeur est différente de 0).
PACerr2	[-]: erreur détectée lors du fonctionnement de la PAC 2 (si la valeur est différente de 0).

COMerr1	[-]: erreur détectée lors du fonctionnement de la machine frigorifique 1 (si la valeur est différente de 0).
COMerr2	[-]: erreur détectée lors du fonctionnement de la machine frigorifique 2 (si la valeur est différente de 0).
SIMSUM 6	
TMSI	[°C]: niveau de température du fluide circulant dans les sondes géothermiques. Si le paramètre FLMEAN est fixé à 0, il s'agit de la température du fluide à l'entrée des sondes. Si FLMEAN est fixé à 1, TMSI est la moyenne entrée – sortie.
TMSO	[°C]: niveau de température du fluide circulant dans les sondes géothermiques. Si le paramètre FLMEAN est fixé à 0, il s'agit de la température du fluide à la sortie des sondes. Si FLMEAN est fixé à 1, TMSO est la moyenne entrée – sortie.
TMColdX1	[°C]: niveau de température du fluide traversant l'échangeur de chaleur du stock de froid, côté primaire (circuit géothermique). Si le paramètre FLMEAN est fixé à 0, il s'agit de la température du fluide à l'entrée de l'échangeur de chaleur. Si FLMEAN est fixé à 1, TMColdX1 est la moyenne entrée – sortie.
TMColdX2	[°C]: niveau de température du fluide traversant l'échangeur de chaleur du stock de froid, côté secondaire (circuit stock de froid). Si le paramètre FLMEAN est fixé à 0, il s'agit de la température du fluide à l'entrée de l'échangeur de chaleur. Si FLMEAN est fixé à 1, TMColdX2 est la moyenne entrée – sortie.
TMColdD	[°C]: niveau de température du fluide dans la distribution de froid. Si le paramètre FLMEAN est fixé à 0, il s'agit de la température de départ du fluide dans la distribution de froid. Si FLMEAN est fixé à 1, TMColdD est la moyenne aller – retour.
QSL+	[kWh]: énergie thermique injectée dans le terrain (refroidissement direct et refroidissement actif). QSL+ est déterminé par la somme des puissances thermiques transférées par les sondes géothermiques et les connections horizontales, intégrées pour les puissances positives seulement. QSL+ a donc une valeur positive.
QSU-	[kWh]: énergie thermique extraite du terrain par la pompe à chaleur. QSU- est déterminé par la somme des puissances thermiques transférées par les sondes géothermiques et les connections horizontales, intégrées pour les puissances négatives seulement. QSU- a donc une valeur négative.
QColdX	[kWh]: énergie de refroidissement totale produite, déterminée par l'énergie thermique transférée à travers l'échangeur de chaleur du stock de froid.
QColdD	[kWh]: énergie de refroidissement totale distribuée, déterminée par l'énergie thermique extraite de la distribution de froid ; (est égal à QColdCov).

SIMSUM 7

TMEvapC	[°C]: niveau de température du fluide dans l'évaporateur de la machine frigorifique. Si le paramètre FLMEAN est fixé à 0, il s'agit de la température du fluide à l'entrée de l'évaporateur. Si FLMEAN est fixé à 1, TMEvapC est la moyenne entrée – sortie.
TMHeatC	[°C]: niveau de température du fluide dans le condenseur de la machine frigorifique. Si le paramètre FLMEAN est fixé à 0, il s'agit de la température du fluide à la sortie du condenseur. Si FLMEAN est fixé à 1, TMHeatC est la moyenne entrée – sortie.
TMEvapP	[°C]: niveau de température du fluide dans l'évaporateur de la PAC. Si le paramètre FLMEAN est fixé à 0, il s'agit de la température du fluide à l'entrée de l'évaporateur. Si FLMEAN est fixé à 1, TMEvapP est la moyenne entrée – sortie.
TMHeatP	[°C]: niveau de température du fluide dans le condenseur de la PAC. Si le paramètre FLMEAN est fixé à 0, il s'agit de la température du fluide à la sortie du condenseur. Si FLMEAN est fixé à 1, TMHeatP est la moyenne entrée – sortie.
TMHeatD	[°C]: niveau de température du fluide dans la distribution de chaleur. Si le paramètre FLMEAN est fixé à 0, il s'agit de la température de départ du fluide dans la distribution de chaleur. Si FLMEAN est fixé à 1, TMHeatD est la moyenne aller – retour.
QEvapC	[kWh]: énergie de refroidissement extraite à l'évaporateur de la machine frigorifique (est égale à QCoolMach)
QCondC	[kWh]: rejets thermiques délivrés au condenseur de la machine frigorifique (sont égaux à QHCoolMach).
QEvapP	[kWh]: énergie thermique extraite à l'évaporateur de la PAC.
QCondP	[kWh]: énergie thermique délivrée au condenseur de la PAC (est égale à QHeatPAC).
QHeatD	[kWh]: énergie thermique délivrée dans la distribution de chaleur (est égal à QHeatCov).

SIMSUM 8

COP3	[-]: coefficient de performance moyen de la PAC pour la frontière du système 3: chaleur distribuée du stock de chaud et énergie électrique pour la PAC et les pompes se trouvant entre le stock de chaud et de froid. Il est défini par le rapport suivant : $\text{COP3} = \text{QHeatCov} / (\text{QelPAC} + \text{QelP1} + \text{QelP2H} + \text{QelP3H})$
COP2	[-]:coefficient de performance moyen de la PAC pour la frontière du système 2: chaleur délivrée par la PAC et énergie électrique pour la PAC et les pompes se trouvant entre le stock de chaud et de froid. Il est défini par le rapport suivant: $\text{COP2} = \text{QHeatPAC} / (\text{QelPAC} + \text{QelP1} + \text{QelP2H} + \text{QelP3H})$

COP1	<p>[-]:coefficient de performance moyen de la PAC pour la frontière du système 1: chaleur distribuée par la PAC et énergie électrique pour la PAC. Il est défini par le rapport suivant:</p> <p>$COP1 = Q_{HeatPAC} / Q_{elPAC}$</p>
EfFCool	<p>[-]: efficacité moyenne du mode « refroidissement direct », défini par le rapport:</p> <p>$EfFCool = Q_{FreeCool} / (Q_{elP2F} + Q_{elP3F})$</p>
EfCOOLt	<p>[-]: efficacité globale moyenne du système pour le refroidissement, défini par le rapport:</p> <p>$EfCOOLt = Q_{ColdCov} / (Q_{elP2F} + Q_{elP3F} + Q_{elCOM} + Q_{elP2C} + Q_{elP3C} + Q_{elP4})$</p>
EfCOM2	<p>[-]: efficacité moyenne de la machine frigorifique pour la frontière du système 2: énergie de refroidissement produite par la machine frigorifique et énergie électrique pour la machine frigorifique et les pompes se trouvant entre le stock de froid et les sondes géothermiques. Il est défini par le rapport suivant:</p> <p>$EfCOM2 = Q_{CoolMach} / (Q_{elCOM} + Q_{elP2C} + Q_{elP3C} + Q_{elP4})$</p>
EfCOM1	<p>[-]: efficacité moyenne de la machine frigorifique pour la frontière du système 1: énergie de refroidissement produite par la machine frigorifique et énergie électrique pour la faire fonctionner. Il est défini par le rapport suivant:</p> <p>$EfCOM1 = Q_{CoolMach} / Q_{elCOM}$</p>
COPt	<p>[-]: efficacité globale moyenne du système de chauffage et de refroidissement. Il est défini par le rapport suivant:</p> <p>$COPt = (Q_{HeatCov} + Q_{ColdCov}) / (Q_{elPAC} + Q_{elP1} + Q_{elP2H} + Q_{elP3H} + Q_{elP2F} + Q_{elP3F} + Q_{elCOM} + Q_{elP2C} + Q_{elP3C} + Q_{elP4})$</p>
SIMSUM 9	
QSLm12	<p>[kWh]: énergie injectée dans le terrain (par les sondes géothermiques et les connections hydrauliques horizontales) quand le système fonctionne dans les modes 1 ou 2 (refroidissement actif ou refroidissement direct). Cette énergie est comptabilisée avec un signe positif.</p>
QSUM34	<p>[kWh]: énergie extraite du terrain (par les sondes géothermiques et les connections hydrauliques horizontales) quand le système fonctionne dans les modes 3 ou 4 (chauffage avec ou sans refroidissement). Cette énergie est comptabilisée avec un signe négatif.</p>
QDSTm0	<p>[kWh]: énergie injectée (+) ou extraite (-) du terrain (par les sondes géothermiques et les connections hydrauliques horizontales), quand le système est au repos.</p>
QPIP+	<p>[kWh]: énergie transférée par les connections horizontales des sondes géothermiques lorsque le système fonctionne en production</p>

de froid (lorsque $QSL+ > 0$). Si $QPIP+ < 0$, cela signifie que malgré l'injection de chaleur dans les sondes géothermiques, les connections horizontales soutirent de l'énergie thermique de l'espace (cave) situé au-dessus des sondes géothermiques.

- QPIP-** [kWh]: énergie transférée par les connections horizontales des sondes géothermiques lorsque le système fonctionne en production de chaleur (lorsque $QSU- < 0$). Si $QPIP- > 0$, cela signifie que malgré l'extraction de chaleur dans les sondes géothermiques, les connections horizontales injectent de l'énergie thermique dans l'espace (cave) situé au-dessus des sondes géothermiques.
- QFLm12** [kWh]: énergie injectée (+) dans le terrain (par les sondes géothermiques et les connections hydrauliques horizontales), quand le système fonctionne dans les modes 1 ou 2 (refroidissement actif ou refroidissement direct). Cette énergie est calculée avec le débit et les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur.
- QFLm34** [kWh]: énergie extraite (-) du terrain (par les sondes géothermiques et les connections hydrauliques horizontales), quand le système fonctionne dans les modes 3 ou 4 (chauffage avec ou sans refroidissement). Cette énergie est calculée avec le débit et les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur.
- QFLOWG** [kWh]: énergie totale injectée (+) ou extraite (-) du terrain par les sondes géothermiques et les connections hydrauliques horizontales. Cette énergie est calculée avec le débit et les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur.
- QtoGrd** [kWh]: énergie totale injectée (+) ou extraite (-) du terrain par les sondes géothermiques et les connections hydrauliques horizontales. Cette énergie est déterminée avec les puissances calculées par les modèles de calcul pour les sondes géothermiques et les connections horizontales.
- QDSTtoGrd** [kWh]: énergie injectée (+) ou extraite (-) du terrain par les sondes géothermiques uniquement.

A1.5 Paramètres de simulation pour le système de référence

Météorologie

Les valeurs météorologiques du lieu géographique Wollerau sont générées avec le programme Meteonorm en valeurs horaires. Les valeurs mensuelles sont énumérées dans la table A1.1.

Mois	Température air extérieur °C	Ensoleillement global horizontal kWh	Ensoleillement global vertical sud kWh
Janvier	1.1	30	40
Février	1.1	46	53
Mars	4.5	92	86
Avril	7.3	113	78
Mai	11.7	146	82
Juin	14.5	149	78
Juillet	18.3	168	89
Août	17.9	141	88
Septembre	14.8	100	80
Octobre	10.4	62	62
Novembre	4.7	31	36
Décembre	2.6	23	31
Année	9.1	1'097	801

Table A1.1 Valeurs mensuelles de la température de l'air extérieur et de l'ensoleillement à Wollerau

Demande d'énergie de chauffage et de refroidissement

Les températures "aller" et "retour" du fluide caloporteur dans la distribution de chauffage sont fixées en fonction de la température de l'air extérieur. Elles sont spécifiées par différentes valeurs de la température extérieure et interpolées linéairement pour les températures intermédiaires. Les paramètres du modèle de demande de chaleur (TYPE259 (type non standard), Pahud, 1996) sont fixés de manière à définir les températures de fluide « aller » et « retour » dans la distribution de chauffage (distribution de chaud) comme dans le graphe de la figure A1.7.

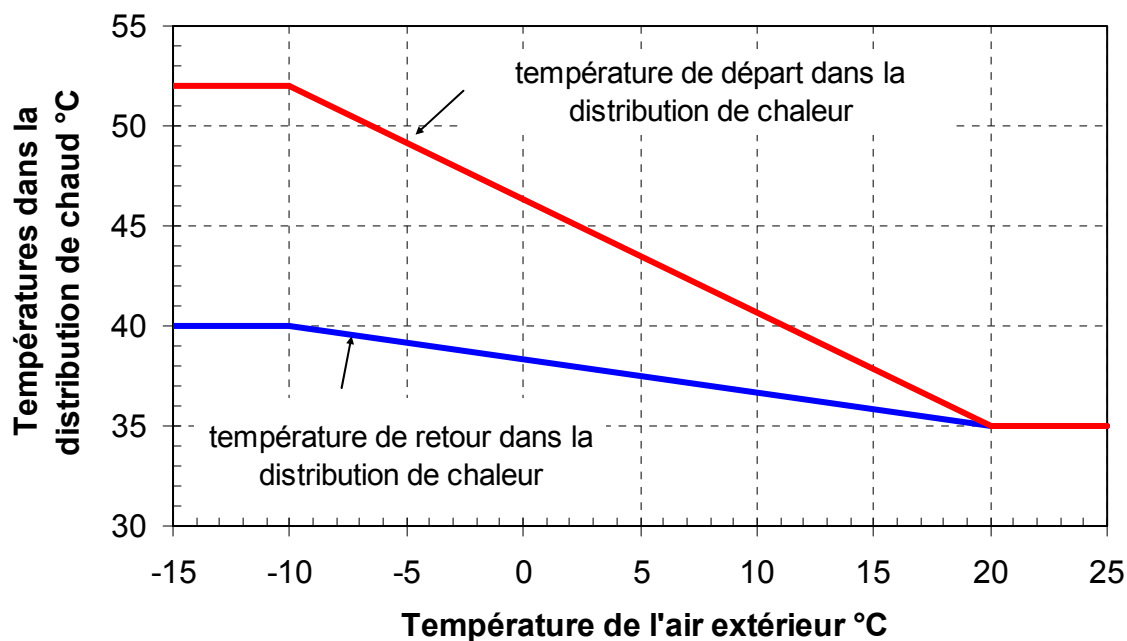


Fig. A1.7 Températures « aller » et « retour » du fluide caloporteur dans la distribution de chauffage, au départ du stockage de chaud.

De la même façon les températures « aller » et « retour » sont définies dans la distribution de froid. Le modèle de calcul TYPE259 (Pahud, 1996) a été légèrement modifié pour être utilisé également pour une demande de refroidissement. Les températures de fluide dans la distribution de froid sont montrées dans la figure A1.8.

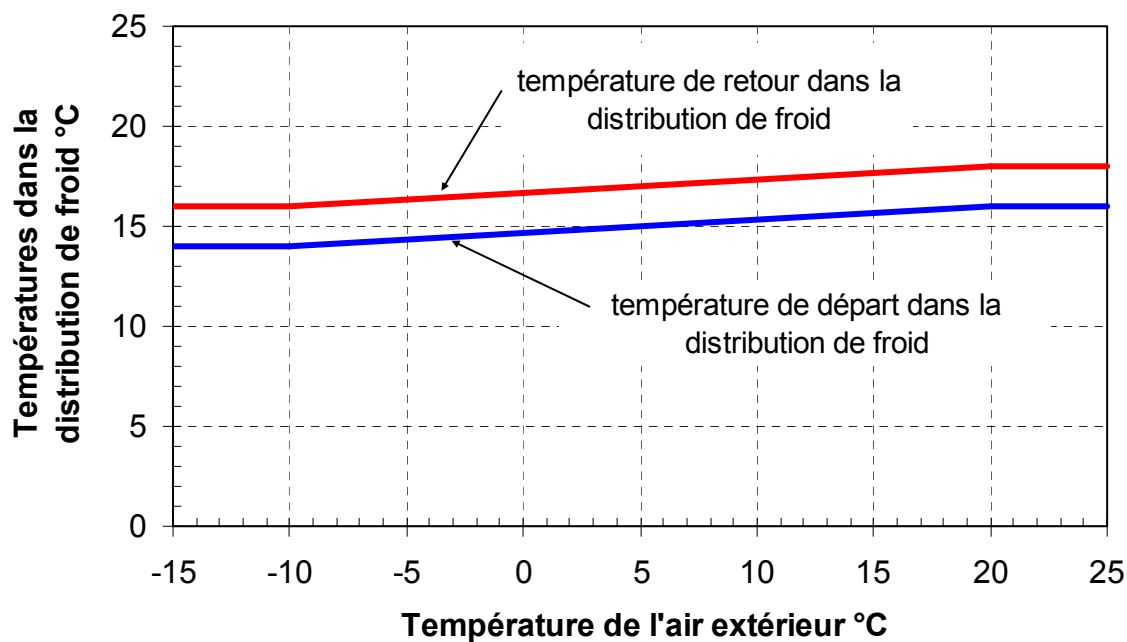


Fig. A1.8 Températures « aller » et « retour » du fluide caloporteur dans la distribution de froid, au départ du stockage de froid.

Les demandes d'énergie de chauffage et refroidissement mensuelles sont énumérées dans la table A1.2. Les paramètres du modèle de calcul pour générer les demandes de chauffage et de refroidissement ont été ajustés pour reproduire les estimations annuelles de l'énergie de chauffage (470 MWh) et de refroidissement (75 MWh) (Kapp und Morath, 1997).

Mois	Demande de chauffage MWh	Demande de refroidissement MWh	Total MWh
Janvier	87.8	-0.1	87.7
Février	74.1	-0.2	73.9
Mars	57.6	-1.0	56.6
Avril	42.4	-1.5	40.9
Mai	21.2	-6.9	14.3
Juin	8.3	-11.3	-3.0
Juillet	0.4	-18.4	-18.0
Août	0.3	-17.6	-17.3
Septembre	9.2	-11.8	-2.6
Octobre	30.5	-5.2	25.3
Novembre	64.3	-0.7	63.6
Décembre	80.1	-0.3	79.8
Année	476	-75	401

Table A1.2 Valeurs mensuelles des demandes d'énergie de chauffage et de refroidissement pour l'installation « Wollerau ».

Stockage de chaud

Le stockage de chaud est simulé avec le type standard TYPE4. La stratification verticale des températures est représentée par 4 couches superposées ayant chacune une température constante. Le stockage est « chargé » par le circuit hydraulique connecté au condenseur de la pompe à chaleur. L'entrée du circuit dans le stockage est fixée dans la deuxième couche (à 75% de la hauteur du stockage) et la sortie (retour au condensateur de la PAC) tout en bas (quatrième couche du stockage). Le départ du circuit hydraulique de la distribution de chaleur est connecté en haut du stockage et le retour en bas. Les principaux paramètres du stockage sont énumérés dans la table A1.3.

Stockage de chaud	Valeur paramètre
Volume du stockage	8.5 m ³
Hauteur du stockage	4.0 m
Isolation stockage, facteur de perte thermique moyen U	0.6 W/m ² K
Entrée circuit hydraulique de la PAC	¾ hauteur
Sortie circuit hydraulique de la PAC	bas
Entrée circuit hydraulique de la distribution de chaleur	bas
Sortie circuit hydraulique de la distribution de chaleur	haut
Nombre de nœuds (couches horizontales) pour la simulation de la stratification verticale des températures	4 -

Table A1.3 Dimensions et principales caractéristiques du stockage de chaud.

Pompe à chaleur

Les caractéristiques de la pompe à chaleur sont données dans la table A1.4.

Agrégat pompe à chaleur – machine frigorifique:	YORK YCW 44 CB – HR
Performances thermiques pour le chauffage	
Puissance à l'évaporateur (entrée 3°C / sortie 0°C)	133 kW
Puissance au condenseur (entrée 44°C / sortie 52°C)	186 kW
Puissance électrique absorbée au compresseur	52 kW
Débit nominal de fluide dans le condenseur (eau)	20 m ³ /heure
Débit nominal de fluide dans l'évaporateur (mélange eau - antigel)	39 m ³ /heure

Table A1.4 Caractéristiques thermiques de l'agrégat pompe à chaleur – machine frigorifique en mode chauffage.

La puissance thermique délivrée au condenseur et la puissance électrique consommée par la PAC sont présentées sous forme graphique dans la figure A1.9, en fonction des niveaux de température du fluide caloporteur dans l'évaporateur et le condenseur. Les courbes proviennent d'un autre modèle YORK, mais les puissances ont été multipliées par un facteur d'échelle pour les faire correspondre à celles de la machine de l'installation Wollerau.

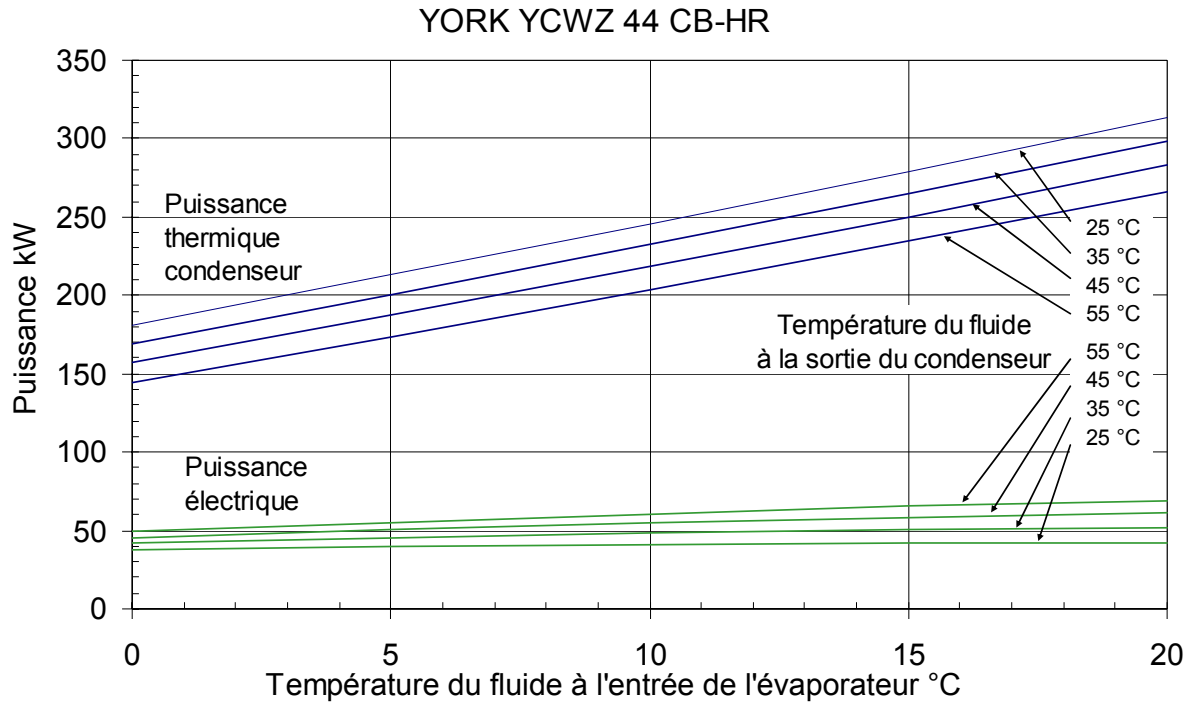


Fig. A1.9 Puissance thermique délivrée au condenseur et puissance électrique absorbée par le compresseur en fonction de la température d'entrée du fluide dans l'évaporateur et de la température de sortie au condenseur.

Les courbes du graphique de la figure A1.9 sont obtenues avec une fonction polynomiale qui est utilisée comme « input » par le modèle de pompe à chaleur non standard TYPE201. Les 6 coefficients du polynôme sont déterminés par régression multilinéaire avec les points de fonctionnement de la machine. Le polynôme, défini par l'expression A1.1, permet de calculer la puissance thermique ou la puissance électrique en fonction de la température d'entrée dans l'évaporateur et de la température de sortie du condenseur.

$$P = B1 + B2 \cdot \bar{T}_{e,in} + B3 \cdot \bar{T}_{c,out} + B4 \cdot \bar{T}_{e,in} \cdot \bar{T}_{c,out} + B5 \cdot \bar{T}_{e,in}^2 + B6 \cdot \bar{T}_{c,out}^2 \quad (A1.1)$$

Avec P: puissance thermique ou électrique interpolée (W);
 B1 à B6: coefficients du polynôme obtenus par régression multilinéaire (W);
 \bar{T} : température normalisée = $((T [^{\circ}\text{C}] + 273.15) [\text{K}]) / (273.15 [\text{K}])$ (-);
 e,in : indice pour spécifier la température du fluide caloporteur à l'entrée de l'évaporateur;
 c,out : indice pour spécifier la température du fluide caloporteur à la sortie du condenseur.

Les coefficients du polynôme énumérés dans la table A1.5 représentent les performances de la machine à 50% de sa puissance. Le plein régime est obtenu en simulant deux machines à 50%.

Coefficients polynomiaux	Puissance thermique au condenseur	Puissance électrique au compresseur
B1	-786	270
B2	248	108
B3	750	-690
B4	-656	977
B5	663	-551
B6	-114	-102

Table A1.5 Coefficients polynomiaux de l'équation A1.1 déterminés pour la pompe à chaleur YORK YCWZ 44 CB-HR à mi-régime.

Les constantes de temps liées à l'enclenchement et au déclenchement de la machine sont fixées à respectivement 3 et 5 minutes. Ces paramètres sont énumérés dans la table A1.6 avec les paramètres thermiques attribués aux fluides caloporteurs simulés. Les valeurs de ces derniers ne dépendent pas de la température du fluide et sont donc constants au cours d'une simulation. Pour des débits dans le condenseur et l'évaporateur différents des débits nominaux (cf. table A1.4), une correction est effectuée avec le type non standard TYPE292. D'autre part, la température d'entrée dans l'évaporateur est limitée au maximum à 15 °C avec le type non standard TYPE293.

Machine YORK YCWZ 44 CB-HR	
Constante de temps associée à un enclenchement	3 minutes
Constante de temps associée à un déclenchement	5 minutes
Fluide circulant dans le condenseur (eau)	
Chaleur massique	4.19 kJ/(kg K)
Densité	1'000 kg/m ³
Fluide circulant dans l'évaporateur (eau avec antigel)	
Chaleur massique	3.90 kJ/(kg K)
Densité	1'050 kg/m ³
Température maximum à l'entrée de l'évaporateur	15 °C

Table A1.6 Valeurs des paramètres utilisés pour la simulation de l'agrégat pompe à chaleur – machine frigorifique en mode chauffage.

Contrôle pompe à chaleur

Le module de régulation de la PAC permet de contrôler ses deux allures de fonctionnement (50 et 100%). Ce type non standard (TYPE299) a été développé pour la simulation de pompes à chaleur couplées à des pieux échangeurs (cf. annexe 3 de Fromentin et al. (1997) pour la description du composant). Les critères

d'enclenchement et de déclenchement sont déterminés sur la base de deux températures d'eau dans le stockage de chaud à des niveaux différents (T_{top} , placé dans le 2^e nœud, à 75% de la hauteur, et T_{bot} , fixé en bas du stockage).

La pompe à chaleur est enclenchée (ou le régime de fonctionnement augmenté) lorsque la température T_{bot} descend sous une valeur de consigne. La pompe à chaleur est déclenchée (ou le régime de fonctionnement diminué) lorsque la température T_{top} dépasse une autre température de consigne. Un laps de temps peut être imposé entre deux décisions de contrôle successives. D'autre part, même si le critère de température demande l'enclenchement de la PAC à 100%, il est possible de ne pas augmenter le régime de fonctionnement si l'évolution de la température dans le stockage tampon va dans le bon sens, i.e. si l'augmentation de la température est plus rapide que celle de la température de consigne. Des critères analogues sont appliqués pour le déclenchement des PAC. Les paramètres de contrôle de la PAC sont synthétisés dans la table A1.7.

Contrôle pompe à chaleur	Valeur paramètre
Température T_{top} dans le stock de chaud	Température à 75% de la hauteur du stockage
Température T_{bot} dans le stock de chaud	Température en bas du stockage
Température de consigne T_{for}	Température de consigne fixant la température de départ dans la distribution de chaleur
Critère d'enclenchement	$T_{top} < T_{for}$ ou $T_{top} < 47\text{ °C}$
Critère de déclenchement	$T_{bot} > (T_{for} + 10\text{ K})$ ou $T_{bot} > 52\text{ °C}$
Laps de temps minimum entre deux décisions de contrôle	9 minutes
Contrôle bloqué si l'évolution de la température va dans le bon sens	Oui

Table A1.7 Paramètres pour le contrôle de la PAC.

Stockage de froid

Comme pour le stockage de chaud, le stockage de froid est simulé avec le type standard TYPE4. La stratification verticale des températures est représentées par 4 couches superposées ayant chacune une température constante. Le stockage est « chargé en froid » par le circuit hydraulique connecté à l'échangeur de chaleur de froid. L'entrée du circuit dans le stockage est fixée dans la troisième couche (à 25% de la hauteur du stockage) et la sortie (retour à l'échangeur) tout en haut (première couche du stockage). Le retour du circuit hydraulique de la distribution de froid est connecté en haut du stockage et l'aller en bas. Les principaux paramètres du stockage sont énumérés dans la table A1.8.

Stockage de froid	Valeur paramètre
Volume du stockage	8.5 m ³
Hauteur du stockage	4.0 m
Isolation stockage, facteur de perte thermique moyen U	0.6 W/m ² K
Entrée circuit hydraulique de l'échangeur de chaleur	¾ hauteur
Sortie circuit hydraulique de l'échangeur de chaleur	haut
Entrée circuit hydraulique de la distribution de froid	haut
Sortie circuit hydraulique de la distribution de froid	bas
Nombre de nœuds (couches horizontales) pour la simulation de la stratification verticale des températures	4 -

Table A1.8 Dimensions et principales caractéristiques du stockage de froid.

Echangeur de chaleur du stockage de froid

L'échangeur de chaleur à contre-courant est simulé avec le type standard TYPE5. Les paramètres de simulation sont énumérés dans la table A1.9.

Echangeur de chaleur du stockage de froid	Valeur paramètre
Type d'échangeur	contre-courant
Valeur UA de l'échangeur	100 kW/K
Circuit primaire (sondes géothermiques et machine frigorifique)	eau + antigel ¹⁾
Circuit secondaire (stockage de froid)	eau ²⁾

¹⁾ eau+antigel : chaleur spécifique 4.19 kJ/(kg K), densité 1'000 kg/m³

²⁾ eau : chaleur spécifique 3.90 kJ/(kg K), densité 1'050 kg/m³

Table A1.9 Caractéristiques de l'échangeur de chaleur du stockage de froid.

Machine frigorifique

Les caractéristiques de la machine frigorifique sont données dans la table A1.10.

Agrégat pompe à chaleur – machine frigorifique:	YORK YCW 44 CB – HR
Performances thermiques pour le refroidissement	
Puissance à l'évaporateur (entrée 18°C / sortie 8°C)	211 kW
Puissance au condenseur (entrée 30°C / sortie 40°C)	263 kW
Puissance électrique absorbée au compresseur	52 kW
Débit nominal de fluide dans le condenseur (mélange eau - antigel)	28 m ³ /heure
Débit nominal de fluide dans l'évaporateur (mélange eau - antigel)	18 m ³ /heure

Table A1.10 Caractéristiques thermiques de l'agrégat pompe à chaleur – machine frigorifique en mode refroidissement.

Les puissances de la machine frigorifique sont reproduites avec les caractéristiques de la pompe à chaleur (cf. figure A1.9), si la correction pour des débits dans l'évaporateur et le condenseur différents est appliquée. Les performances thermiques de la machine sont donc simulées avec le polynôme utilisé pour le mode pompe à chaleur (cf. table A1.5). De manière analogue il représente les performances de la machine à 50% de sa puissance. Le plein régime est obtenu en simulant deux machines à 50%. La correction pour débits différents est effectuée avec le type non standard TYPE 292.

Les constantes de temps liées à l'enclenchement et au déclenchement de la machine sont également fixées à respectivement 3 et 5 minutes. La température d'entrée dans l'évaporateur est limitée à 15 °C au maximum avec le type non standard TYPE293. De même la température d'entrée dans le condenseur est limitée à 20 °C au minimum dans le condenseur. Les paramètres sont énumérés dans la table A1.11.

Machine YORK YCWZ 44 CB-HR	
Constante de temps associée à un enclenchement	3 minutes
Constante de temps associée à un déclenchement	5 minutes
Fluide circulant dans le condenseur (eau avec antigel)	
Chaleur massique	3.90 kJ/(kg K)
Densité	1'050 kg/m ³
Fluide circulant dans l'évaporateur (eau avec antigel)	
Chaleur massique	3.90 kJ/(kg K)
Densité	1'050 kg/m ³
Température maximum à l'entrée de l'évaporateur	15 °C
Température minimum à l'entrée du condenseur	20 °C

Table A1.11 Valeurs de paramètres utilisés pour la simulation de l'agrégat pompe à chaleur – machine frigorifique en mode refroidissement.

Contrôle machine frigorifique

Comme pour la pompe à chaleur, le module de régulation de la machine frigorifique (type non standard TYPE299) permet de contrôler les deux allures de fonctionnement (50 et 100%). Les critères d'enclenchement et de déclenchement sont déterminés sur la base de deux températures d'eau dans le stockage de froid à deux niveaux différents (T_{top}, placé en haut du stockage, et T_{bot}, placé dans le 3^e nœud, à 25% de la hauteur).

Le mode refroidissement direct ou la machine frigorifique est enclenchée (ou le régime de fonctionnement augmenté) lorsque la température T_{top} dépasse une valeur de consigne. Le mode refroidissement direct est arrêté, ou la machine frigorifique est déclenchée (ou le régime de fonctionnement diminué) lorsque la température T_{bot} descend au dessous d'une autre température de consigne. Un laps de temps peut être imposé entre deux décisions de contrôle successives. D'autre part, même si le critère de température demande l'enclenchement de la machine frigorifique à 100%, il est possible de ne pas augmenter le régime de fonctionnement si l'évolution de la température dans le stockage tampon va dans le bon sens, i.e. si l'abaissement de la température est plus rapide que celui de la température de consigne. Des critères analogues sont appliqués pour le déclenchement de la machine frigorifique. Les paramètres de contrôle de la machine frigorifique sont synthétisés dans la table A1.12.

Contrôle pompe à chaleur	Valeur paramètre
Température T_{top} dans le stock de chaud	Température en haut du stockage
Température T_{bot} dans le stock de chaud	Température à 25% de la hauteur du stockage
Température de consigne T_{for}	Température de consigne fixant la température de départ dans la distribution de froid
Critère d'enclenchement	$T_{bot} > T_{for}$
Critère de déclenchement	$T_{top} < 7\text{ °C}$
Laps de temps minimum entre deux décisions de contrôle	9 minutes
Contrôle bloqué si l'évolution de la température va dans le bon sens	Oui

Table A1.7 Paramètres pour le contrôle de la machine frigorifique.

Contrôle système

Le contrôle du système détermine les modes de fonctionnement du système (voir section A1.3). Pour rappel, la régulation du système se base sur les trois tests suivants qui permettent de déterminer le mode de fonctionnement conformément à la figure A1.3.

Ch : test pour vérifier si le stockage de chaud de la distribution de chauffage doit être « chargé ». La réponse du test est « oui » si le composant « contrôle PAC » demande la marche de la pompe à chaleur.

Dir : test pour vérifier si le mode « refroidissement direct » est possible. La réponse du test est « oui » si la température en haut du stock de « froid » ($T_{stk-froid}$) est plus élevée que la température du fluide à la sortie des sondes géothermiques ($T_{sonde-out}$). Un contrôleur ON/OFF (TYPE2) est utilisé pour éviter une instabilité du test lors de la détermination du mode de fonctionnement, avec les « dead band temperature difference » ΔT_{on} et ΔT_{off} .

Si le test est négatif (refroidissement direct pas possible) et que la condition suivante devient vraie :

$$(T_{stk-froid} - T_{sonde-out}) > \Delta T_{on} \quad \text{et} \quad \Delta T_{on} = 5\text{ K}$$

alors le test devient positif (refroidissement direct possible). Le test reste positif jusqu'à ce que la condition suivante devient vraie :

$$(T_{stk-froid} - T_{sonde-out}) < \Delta T_{off} \quad \text{et} \quad \Delta T_{off} = 1\text{ K}$$

Ref : test pour vérifier si le stockage de froid de la distribution de refroidissement doit être « chargé ». La réponse du test est « oui » si le composant « contrôle machine frigorifique » demande la marche de la machine frigorifique.

Pompes de circulation

Les débits et puissances électriques des pompes de circulation simulées (cf. schéma de principe de la figure A1.2) sont énumérées dans la table A1.8 pour chaque mode de fonctionnement du système. Pour rappel, la pompe P2 simulée représente en réalité trois pompes de circulation différentes.

Pompe	Mode 4 (PAC)	Mode 3 (PAC avec refroidissement)	Mode2 (refroidissement direct)	Mode 1 (machine frigorifique)
P1	20 m ³ /h 1'000 W	20 m ³ /h 1'000 W	-	-
P2	39 m ³ /h 1'800 W	39 m ³ /h 1'800 W	24 m ³ /h 2'200 W	18 m ³ /h 580 W
P3	-	22 m ³ /h 740 W	22 m ³ /h 740 W	22 m ³ /h 740 W
P4	-	-	-	28 m ³ /h 2'800 W

Table A1.8 Débit et puissance électrique de chaque pompe de circulation en fonction des modes de fonctionnement du système.

Sondes géothermiques et terrain

Les sondes géothermiques et le terrain sont simulés avec le type non standard TRNSBM. Contrairement au type non standard TRNVDSTP (simulation d'un stockage de chaleur par sondes géothermiques ou d'un ensemble de pieux échangeurs), les connections horizontales reliant les sondes géothermiques ne peuvent pas être prises en compte. Les principaux paramètres de simulation sont énumérés dans la table A1.9.

Sondes géothermiques et terrain	
Nombre de sondes géothermiques	32
Longueur active de chaque sonde	135
Espacement moyen entre les sondes géothermiques ¹⁾	environ 8 m
Diamètre d'une sonde géothermique	0.13 m
Résistance thermique d'une sonde géothermique R _b	0.11 K/(W/m)
Résistance thermique interne d'une sonde géothermique R _a	0.35 K/(W/m)
Température moyenne de l'air en surface (cave)	18 °C
Epaisseur de la couche de terrain recouvrant les sondes ²⁾	1 m
Propriétés thermiques du terrain	
conductibilité thermique	2.3 W/mK
capacité thermique volumique	2.2 MJ/m ³ K
Température initiale moyenne annuelle du terrain en surface	12 °C
Gradient géothermique	20 K/km

¹⁾ l'arrangement exact des sondes est en fait pris en considération dans TRNSBM (cf. table A1.10)

²⁾ la couche de « terrain » qui recouvre les sondes géothermiques a les mêmes propriétés thermiques que celle du terrain. Une épaisseur de 1 m avec un λ de 2.3 W/mK est équivalent du point de vue transmission thermique (valeur U) à une épaisseur de 0.57 m de béton maigre de λ égal à 1.3 W/mk.

Table A1.9 Paramètres de simulation pour les sondes géothermiques et le terrain.

La disposition des sondes géothermiques est indiquée dans la figure A1.10.

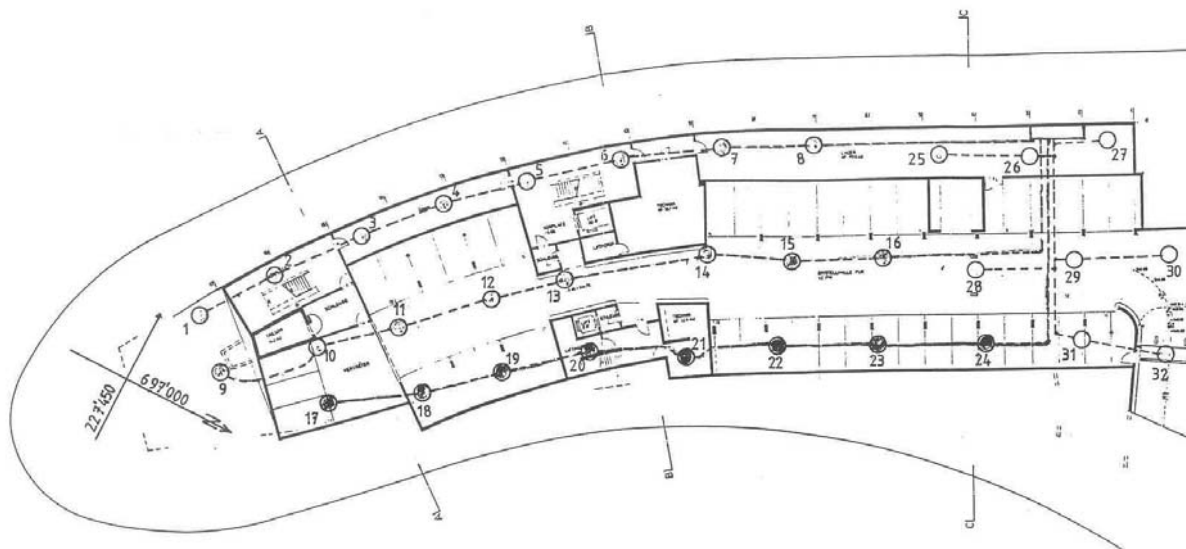


Figure A1.10 Position des 32 sondes sous les fondations du bâtiment (source : Kapp und Morath, 1999).

Le positionnement exact des sondes est simulé dans TRNSBM. Par défaut de mesures plus précises, elles sont toutes supposées verticales. La position des sondes en surface est définie par les coordonnées (x,y) qui sont énumérées dans la table A1.10. L'origine est arbitrairement fixée sur la sonde numéro 16.

Sonde numéro	position X	position Y	Sonde numéro	position X	position Y
1	-59.7 m	-4.2 m	17	-48.6 m	-15.6 m
2	-53.2 m	-0.8 m	18	-40.3 m	-11.0 m
3	-45.6 m	2.7 m	19	-33.4 m	-9.5 m
4	-38.0 m	5.3 m	20	-25.8 m	-7.6 m
5	-30.8 m	7.2 m	21	-17.5 m	-8.4 m
6	-22.8 m	9.1 m	22	-9.5 m	-7.6 m
7	-14.1 m	9.9 m	23	-0.8 m	-7.6 m
8	-5.7 m	9.9 m	24	8.7 m	-7.6 m
9	-58.1 m	-9.1 m	25	4.9 m	9.1 m
10	-49.4 m	-7.2 m	26	12.9 m	8.7 m
11	-42.2 m	-5.7 m	27	19.8 m	9.9 m
12	-34.2 m	-3.0 m	28	8.0 m	-1.5 m
13	-27.7 m	-1.5 m	29	16.7 m	-0.8 m
14	-15.2 m	0.4 m	30	24.7 m	-0.4 m
15	-7.6 m	-0.4 m	31	17.1 m	-7.6 m
16	0.0 m	0.0 m	32	24.3 m	-9.1 m

Table A1.10 Coordonnées (x,y) des 32 sondes sous les fondations du bâtiment.

A1.6 Bilan énergétique simulé du système de référence

Le fonctionnement du système est simulé pour une dizaine d'années avec un pas de temps de 3 minutes. Pour un PC muni d'un processeur de 800 MHz, il faut 31 heures pour mener à terme la simulation. Les performances moyennes annuelles du système (moyenne sur les 10 premières années de fonctionnement), sont montrées dans la figure A1.11.

Bilan énergétique du système

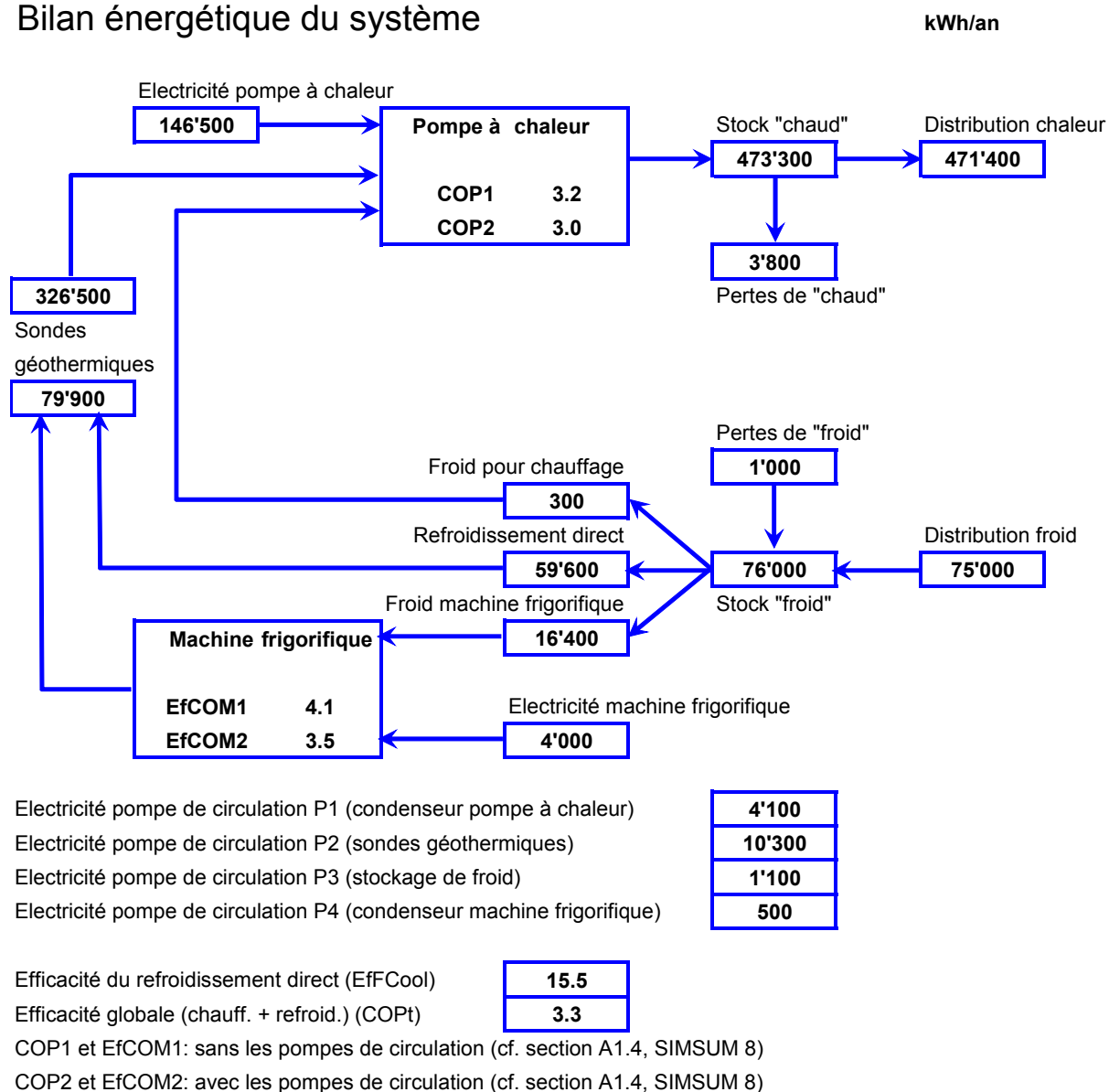


Figure A1.11 Performances thermiques du système dit de référence, constituant la base des systèmes simulés.

La recharge thermique du terrain pour la production de froid ne représente qu'un quart de l'énergie extraite pour le chauffage en hiver.