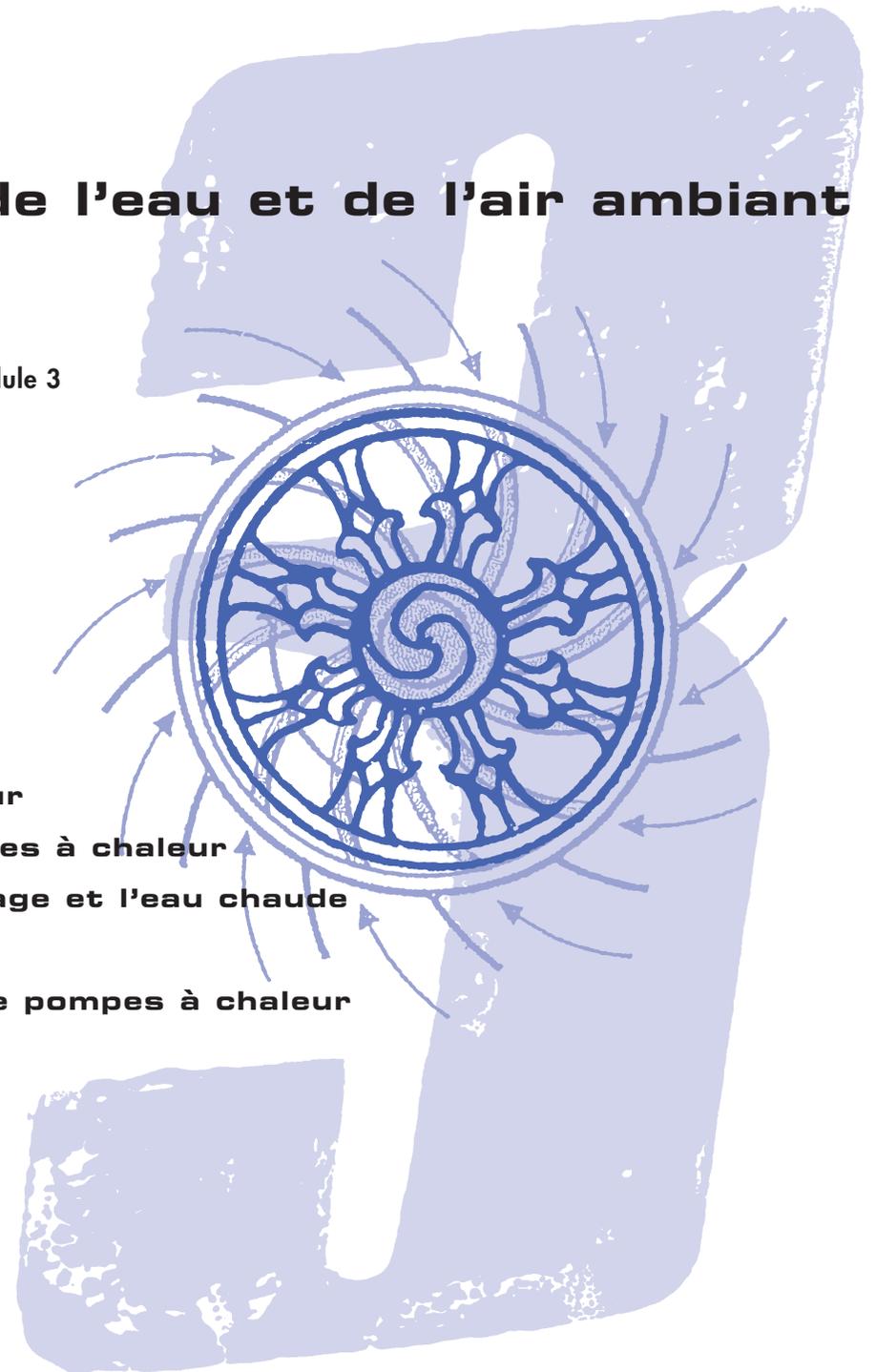


# La chaleur tirée de la terre, de l'eau et de l'air ambiant (pompes à chaleur)

L'énergie dans l'enseignement professionnel

Modules pour les professions techniques, de l'électricité et de l'informatique: Module 3

- 1 Introduction: de quoi s'agit-il?**
- 2 Objectifs de la formation**
- 3 Eléments proposés pour le plan des leçons**
- 4 Connaissances de base**
  - **Mode de fonctionnement d'une pompe à chaleur**
  - **Types d'exploitation des installations de pompes à chaleur**
  - **Systèmes de pompes à chaleur pour le chauffage et l'eau chaude**
  - **Sources de chaleur**
  - **Planification et réalisation des installations de pompes à chaleur**
- 5 Exercices et solutions proposées**
- 6 Bibliographie**
- 7 Sources**
- 8 Modèles**



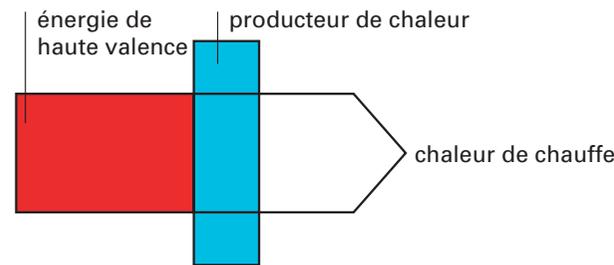
# 1 Introduction: de quoi s'agit-il ?

## Utiliser l'énergie électrique avec efficience

La pompe à chaleur est un système de chauffage connu depuis plus de 100 ans. Il permet de tirer parti de l'environnement et des sources de chaleur perdue pour permettre de chauffer à température élevée.

Avec la pompe à chaleur on peut soutirer de la chaleur de l'air ambiant, de l'eau ou de la terre et la diriger vers une installation de chauffage, par exemple dans une maison, une piscine ou une alimentation en eau chaude.

### Chauffage électrique conventionnel



### Chauffage par pompe à chaleur

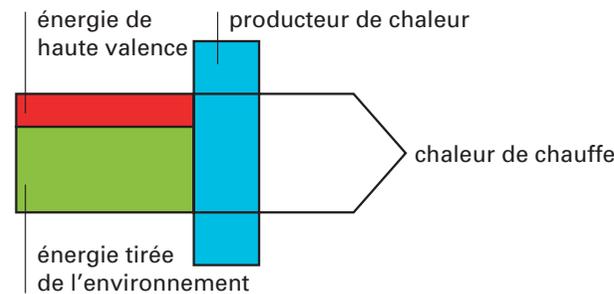


Fig. 1: Comparaison chauffage électrique – chauffage pompe à chaleur

La pompe à chaleur électrique ne pollue pas l'air de substances nuisibles à l'endroit où elle est installée. Le mode de production du courant est cependant à prendre en considération dans l'observation globale. Les bonnes installations - avec un rapport de plus de 3 entre l'apport en énergie électrique et l'énergie calorifique fournie - ménagent l'environnement.

## Qui conçoit et fabrique les installations de pompe à chaleur?

Les professions les plus diverses peuvent être amenées à participer à la conception et à la construction de telles installations, selon leur degré de complexité.

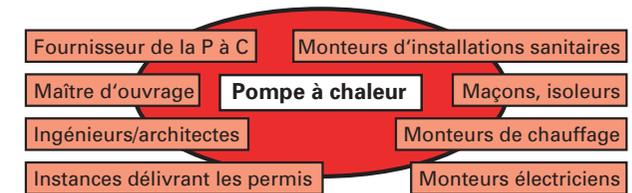


Fig. 2: Partenaires pour la planification et construction d'une pompe à chaleur

## Permis

Un permis délivré par les autorités cantonales compétentes est nécessaire pour presque toutes les sources de chaleur. D'autres conditions techniques peuvent être associées à la délivrance du permis.

## 2 Objectifs de la formation

### L'apprentie, l'apprenti ...

- sont capable d'expliquer le mode de fonctionnement d'une pompe à chaleur
  
- connaissent les avantages d'une pompe à chaleur et les facteurs à examiner

### Exemples de réponses:

- La pompe à chaleur porte une énergie calorifique de basse température à une température plus élevée en utilisant une énergie de haute valence.
- Les énergies utile et calorifique sont produites avec un tiers seulement d'énergie motrice pour que la pompe à chaleur retire la chaleur de l'environnement pour l'amener à une température plus élevée et la transmettre au système de chauffage.
- Elle fonctionne selon le principe du réfrigérateur (retire de la chaleur d'un côté pour la rendre d'un autre côté).

### Avantages:

- Elle utilise la chaleur de l'environnement ou la déperdition de chaleur et obtient avec elle un bon coefficient d'efficacité d'exploitation de l'électricité.
- Elle pèse très faiblement sur l'environnement à l'endroit où elle fonctionne, contrairement aux engins utilisant des énergies fossiles.
- Elle réduit les quantités de mazout à transporter, et par conséquent les risques afférents.

### Facteurs à examiner:

- Quelles sources de chaleur peuvent être utilisées à l'emplacement prévu?
- Est-ce que l'exploitation des sources d'énergie est soumise à la délivrance d'un permis?
- Quel type de P à C fournit le meilleur coefficient de travail et le moindre coût de fonctionnement?

– connaissent les possibilités d'application et les limites de l'utilisation de la pompe à chaleur

– énoncent la disponibilité et la possibilité d'exploitation des sources de chaleur

– connaissent les notions facteurs de charge et coefficients de performance et les principales valeurs d'influence

– Quelles conséquences doit-on attendre au niveau de la construction?

La possibilité d'utilisation dépend des niveaux de température de la source de chaleur disponible et de la chaleur à fournir. La pompe à chaleur est principalement employée pour les chauffages à basse température et l'alimentation en eau chaude.

Les sources de chaleur envisageables sont:

- l'air extérieur, le terrain, la nappe phréatique, les eaux de surface, les eaux usées, l'air dégagé.
- L'utilisation est partiellement limitée par la disponibilité spatio-temporelle et la température.

**Facteur de charge** (facteur de charge annuel)  $\beta$ :  
Rapport entre l'énergie calorifique produite par la pompe à chaleur et la somme de toutes les énergies utilisées et payantes.

**Facteur de rendement** ou coefficient de performance  $\varepsilon$  (valeur instantanée):

Le coefficient de performance indique combien de fois la performance calorifique produite est supérieure à l'apport de puissance de propulsion du compresseur.

**Coefficient de performance COP** (valeur instantanée):  
La norme européenne EN 255 définit le COP à la place du facteur de rendement tel que défini ci-dessus. Outre la puissance de compression, ce coefficient prend aussi en compte la puissance absorbée

par les pompes, resp. les ventilateurs des sources de chaleur.

### **Valeurs d'influence**

Les températures de la source de chaleur et de la chaleur dispensée (eau chaude) exercent l'influence la plus importante sur le facteur de charge et de rendement: plus la différence de température entre la source et la température utile est petite, meilleure est l'efficacité. Naturellement la qualité technique de l'installation et des composants (rendement technique) a aussi une influence. Les grandes installations sont souvent plus efficaces.

### 3 Eléments proposés pour le plan des leçons

#### Visites

- On peut visiter le centre de test de pompes à chaleur Töss, à Winterthur (adresse chap. 6).
- Visite d'une installation de pompe à chaleur importante ou combinée avec d'autres installations intéressantes (couplage chaleur-force). Renseignements: Centre d'information sur les pompes à chaleur (adresse chap. 6), Office communal de la construction, éventuellement Service cantonal de l'énergie.
- De nombreuses écoles disposent de modèles de démonstration de pompes à chaleur (mini P à C fonctionnelles avec thermomètres etc.). Retirer la documentation correspondante!

#### Essais, devoirs

Pour mieux comprendre le mode de fonctionnement de la P à C on peut envisager les réflexions, mesures et essais suivants (év. comme devoir, voir chap. 5).

- Pompe à vélo: en pompant, la partie avant et le tuyau (pas la tige, où il y a frottement) deviennent chauds. Pourquoi?
- Bombe à crème Kisag: après l'avoir beaucoup pressé, la cartouche devient froide, surtout quand elle est vide. Pourquoi?
- On entoure la partie avant d'un thermomètre avec un peu de gaze ou de coton et on lit les températures à sec et après humidification (on favorise l'évaporation en faisant légèrement bouger le thermomètre). A quoi tient la différence ?

- On examine un réfrigérateur ou un congélateur de derrière et de l'intérieur et on en nomme les composants: le compresseur (dans une capsule métallique noire), l'évaporateur (à l'intérieur, sonde de thermostat, év. fixée dessus ou en-dessous avec une vis), le liquéfacteur (condensateur, grille/petits tubes ou surface métallique au dos), la soupape de détente (tuyau capillaire, ressemble à un câble enroulé), la commande (le bouton de réglage du «régulateur» est encore, presque toujours, un thermostat mécanique)
- Selon les possibilités ou comme devoir, mesurer les températures de corps de chauffe (en haut/en bas), du chauffage par le sol (en surface à divers endroits), de l'eau chaude ainsi que des sources de chaleur (lac, rivière, terre à diverses profondeurs) avec un thermomètre à secondes. Etablir un résumé ordonné pour les sources de chaleur et les températures utiles. Influence sur le coefficient de performance?

## 4 Connaissances de base

### Répétition

(voir aussi exercices, chapitre 5)

- Le point d'ébullition d'un liquide dépend de la pression ambiante. Ainsi peut-on p.ex. faire bouillir de l'eau à bien moins de 100°C avec une pompe à jet d'eau (sous pression).
- Pour faire évaporer un liquide il faut apporter de la chaleur (faire bouillir de l'eau sur une cuisinière, «froid» d'évaporation du thermomètre humide), pendant la condensation de la vapeur, de la chaleur est au contraire libérée (le condensateur des turbines à vapeur doit être refroidi, resp. la chaleur en être dégagée).
- Si l'on force la modification de l'état de l'agrégat par une sur- ou une sous-pression, le dégagement ou l'absorption de chaleur peut avoir lieu à différentes températures.

Une pompe à chaleur ou une machine de froid tire parti de ces propriétés des liquides/vapeurs.

#### 4.1 Mode de fonctionnement d'une pompe à chaleur

Dans la pompe à chaleur circule ce qu'on appelle un fluide caloporteur (aussi: frigorigène, voir ci-dessous), qui transporte la chaleur.

- 1 **Evaporateur:** la source de chaleur (de l'air, de l'eau, de la terre, etc.) est conduite à l'évaporateur, p.ex. au moyen d'une saumure (eau/antigel) depuis une sonde terrestre ou directement à partir de l'air. La chaleur est transmise au fluide actif «refroidi» (sous-pression après la soupape de détente), provoquant ainsi son évaporation.
- 2 **Compresseur:** la vapeur produite dans l'évaporateur est aspirée dans le compresseur qui la comprime à haute pression et donc à température plus élevée et la presse dans le condenseur.
- 3 **Condenseur:** c'est au niveau du condenseur que la vapeur surchauffée transmet sa chaleur au circuit à eau du chauffage. La vapeur condense au niveau de son tube, réchauffant ainsi l'eau de chauffage. Le fluide caloporteur, toujours comprimé, redevient liquide. L'évaporateur et le condenseur sont des échangeurs de chaleur.
- 4 **Soupape de détente:** le fluide caloporteur à l'état liquide retourne à l'évaporateur par la soupape de détente. La soupape de détente réduit la pression créée dans le compresseur, ce qui refroidit le fluide caloporteur et permet la poursuite du cycle.

La largeur des flèches tramées correspond aux quantités de chaleur qui proviennent d'une part de l'environnement et d'autre part du moteur du compresseur.

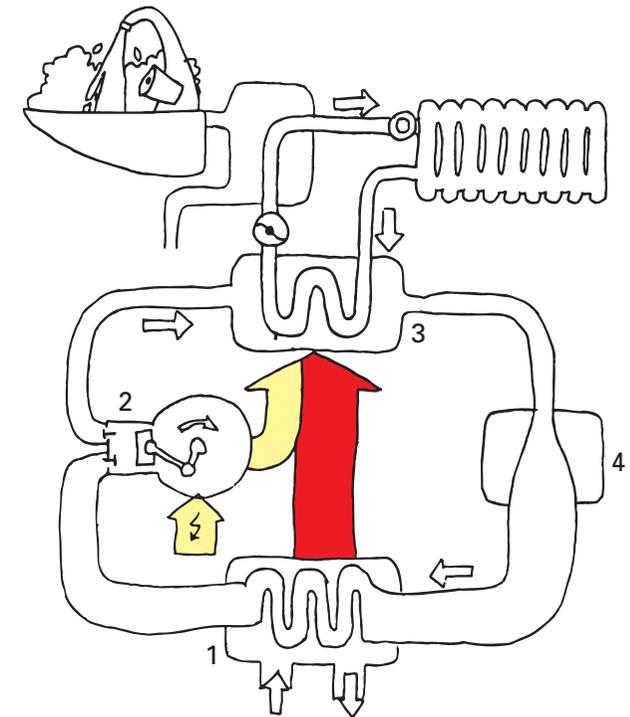


Fig. 3: Mode de fonctionnement d'une pompe à chaleur

**Facteur de rendement  $\epsilon$ , Facteur de charge  $\beta$ , COP**

On appelle facteur de rendement  $\epsilon$  la valeur instantanée du rapport entre puissance calorifique produite et puissance électrique (moteur du compresseur).

Donc:

$$\epsilon = P_{\text{chauf}} [\text{kW}] / P_{\text{él}} [\text{kW}]$$

Au sens strict, le **facteur de rendement  $\epsilon$**  se comprend comme le rapport entre la puissance pure

d'entraînement du compresseur et du dégagement de chaleur du condenseur, c'est-à-dire sans énergie auxiliaire. La norme européenne En 255 définit, au lieu du facteur de rendement  $\epsilon$ , le **COP** (coefficient of performance). Celui-ci considère également, outre la puissance du compresseur, l'absorption de puissance des dispositifs de givrage et des sources de chaleur (pompes et ventilateurs). Le COP est donc inférieur à  $\epsilon$ , mais plus proche de la réalité.

**Facteur COP des pompes à chaleur**

(rapport entre puissance calorifique et puissance électrique du moteur)

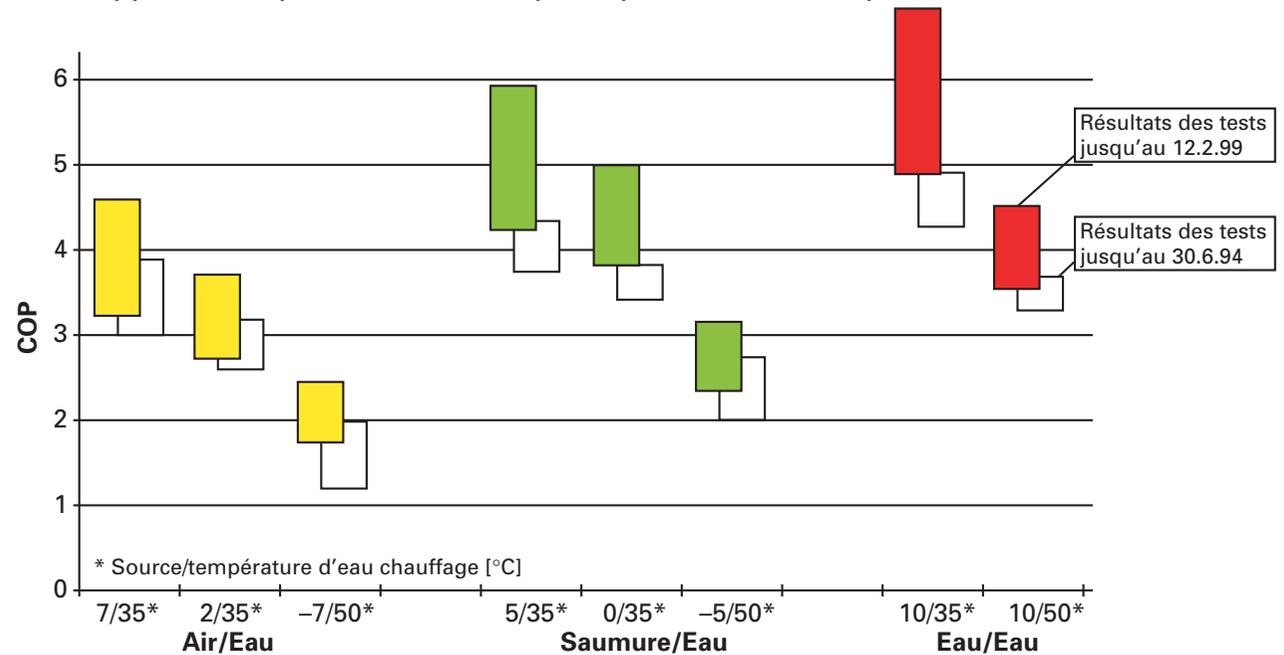


Fig. 4: Facteur COP (résultats de tests)

On appelle **facteur de charge**  $\beta$  le même rapport, mais comme valeur énergétique sur 1 année d'exploitation (apport d'énergie/dépense d'énergie y. c. énergie auxiliaire). Donc:

$$\beta = P_{\text{chauf}} [\text{kWh}] \text{ par année} / P_{\text{el}} [\text{kWh}] \text{ par année.}$$

Exemple:

Pompe à chaleur pour chauffer une maison familiale (MF).

- Énergie de chauffage dégagée par la P à C = 16'000 kWh par an
- Consommation électrique de la P à C (y.c. consommateurs annexes) = 4'000 kWh par an
- facteur de charge annuel  $\beta = 16'000/4'000 = 4,0$

### Influences exercées sur le COP et le facteur de charge

Les deux valeurs d'efficacité dépendent d'un côté de la qualité technique (degré d'efficacité-fraction utile) des composants de l'installation, et de l'autre des températures considérées. Plus la température de chauffage à fournir  $T_1$  est élevée en comparaison avec la température des sources de chaleur  $T_0$ , plus il faut de puissance moteur. Ce rapport est nommé le rendement de Carnot  $\epsilon_c$  qui s'exprime par une formule (le processus des pompes à chaleur est un processus Carnot du point de vue thermodynamique):

$$\epsilon_c = \frac{T_1}{T_1 - T_0}$$

Les températures devant être exprimées en Kelvin ( $0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$ ).

Exemple:

Avec une bonne source de chaleur de  $T_0 = 10^\circ\text{C}$  (p.ex. nappe phréatique) et avec un chauffage par le sol à «échelonnement de température» particulièrement bas  $T_1 = 30^\circ\text{C}$ , on obtient un  $\epsilon_c$  théorique (degré d'efficacité technique supposé admis à 100%) de:

$$\epsilon_c = 303 / (303 - 283) = 15,15$$

Il est pratiquement impossible d'atteindre des chiffres aussi élevés. En effet pour une petite pompe à chaleur de chauffage (6 kW) on peut atteindre un degré d'efficacité technique d'environ 45%, dont il résulte un  $\epsilon_c$  de 6.82, ce qui est une valeur extrêmement bonne. Dans la pratique des valeurs de  $T_0 = 5^\circ\text{C}$ ,  $T_1 = 35^\circ\text{C}$  sont plus réalistes, ce qui donne toujours un très bon  $\epsilon_c$  de 4.62. A ce sujet, voir la composition des résultats de contrôle du centre de test des pompes à chaleur Töss fig. 4, ainsi que la dépendance thermique de la puissance de chauffe fig. 15.

### Fluide actif

Pour le fluide actif du circuit de la pompe à chaleur on utilise des produits qui, à température ambiante et pression normale, sont gazeux, se liquéfient légèrement par augmentation de pression (condensation) et peuvent s'évaporer à nouveau par détente. Les frigorigènes CFC utilisés autrefois contiennent du chlore, lequel, en s'échappant, provoque une détérioration de la couche d'ozone protectrice de la stratosphère.

Certains fluides actifs contenant peu de chlore étaient encore admis jusqu'au 01.01.2002, p. ex. le R22 autrefois presque toujours utilisé pour les pompes à chaleur.

Les prescriptions actuelles correspondent aux catégories de fluides actifs suivantes:

HFC (hydrogènes carburés fluorés mais exempts de chlore), p. ex. R 134a, R 407 A/B/C, R 507. Quelques uns peuvent être introduits à la place de certains CFC («drop-in»). Comparés aux CFC, les HFC sont plutôt délicats à manier et à régler, présentant un haut potentiel d'effet de serre.

### **Les fluides actifs dits naturels**

Comptent parmi ces fluides actifs sans potentiel de destruction de l'ozone ni d'effet de serre, les hydrocarbures, entre autres, p. ex. les mélanges gazeux butane/propane. Ils sont surtout utilisés dans les petits agrégats (réfrigérateurs, etc.). Vu leur nature inflammable ils ne sont utilisables pour de plus grandes puissances que dans des conditions particulières (protection contre l'explosion). Il existe déjà des pompes à chaleur au propane pour l'extérieur.

L'ammoniaque (R 717, chimiquement:  $\text{NH}_3$ ) est toxique, raison pour laquelle ce fluide actif par ailleurs très bon n'est utilisé que dans de grandes installations, le plus souvent encapsulées, p. ex. dans l'industrie des produits alimentaires. Les autres fluides actifs naturels, encore peu employés de nos jours pour des raisons techniques, sont le gaz carbonique (R 744, chimiquement:  $\text{CO}_2$ ), l'air et l'eau.

## 4.2 Types d'exploitation des installations de pompes à chaleur

On distingue les types suivants d'exploitation des installations de pompes à chaleur:

### Exploitation monovalente

Dans l'exploitation monovalente la pompe à chaleur est le seul créateur de chaleur. Cela nécessite une pompe à chaleur dimensionnée pour une puissance totale et donc une installation importante et coûteuse. La température d'alimentation maximale possible est donnée par la température de liquéfaction maximale autorisée de la pompe à chaleur et se situe aux alentours des 50 à 65 °C selon le fluide actif utilisé.

### Exploitation bivalente parallèle

«Bivalente» signifie à deux valeurs : la pompe à chaleur est complétée par un producteur de chaleur supplémentaire permettant d'élargir la production de chaleur pendant les journées froides. «Parallèle» signifie que sous le point de bivalence, où la performance de la pompe à chaleur seule ne suffit plus, les deux producteurs de chaleur travaillent en parallèle. Le point de bivalence est presque toujours situé entre + 2°C et + 7°C dans la commande de la pompe à chaleur. Dans les maisons familiales à basse consommation d'énergie on peut parfois utiliser une pompe à chaleur air/eau avec un four à bois ou éventuellement un chauffage d'appoint électrique pour couvrir les pointes.

### Exploitation bivalente alternative

Dans une exploitation alternative le besoin de chaleur en cas de charge de chauffe petite et moyenne est pris en charge par la pompe à chaleur. Sous le point de bivalence, la pompe à chaleur est déclenchée et la source d'énergie supplémentaire reprend entièrement en charge l'alimentation du réseau de chauffage.

### 4.3 Systèmes de pompes à chaleur pour chauffage et eau chaude

Le schéma de principe d'une installation de pompe à chaleur eau/eau tel que dans la fig. 5 est représentatif de tous les systèmes décrits. Un exercice à ce sujet est proposé au chapitre 5. Dans les autres schémas de principes de systèmes, seule la partie sources de chaleur est représentée.

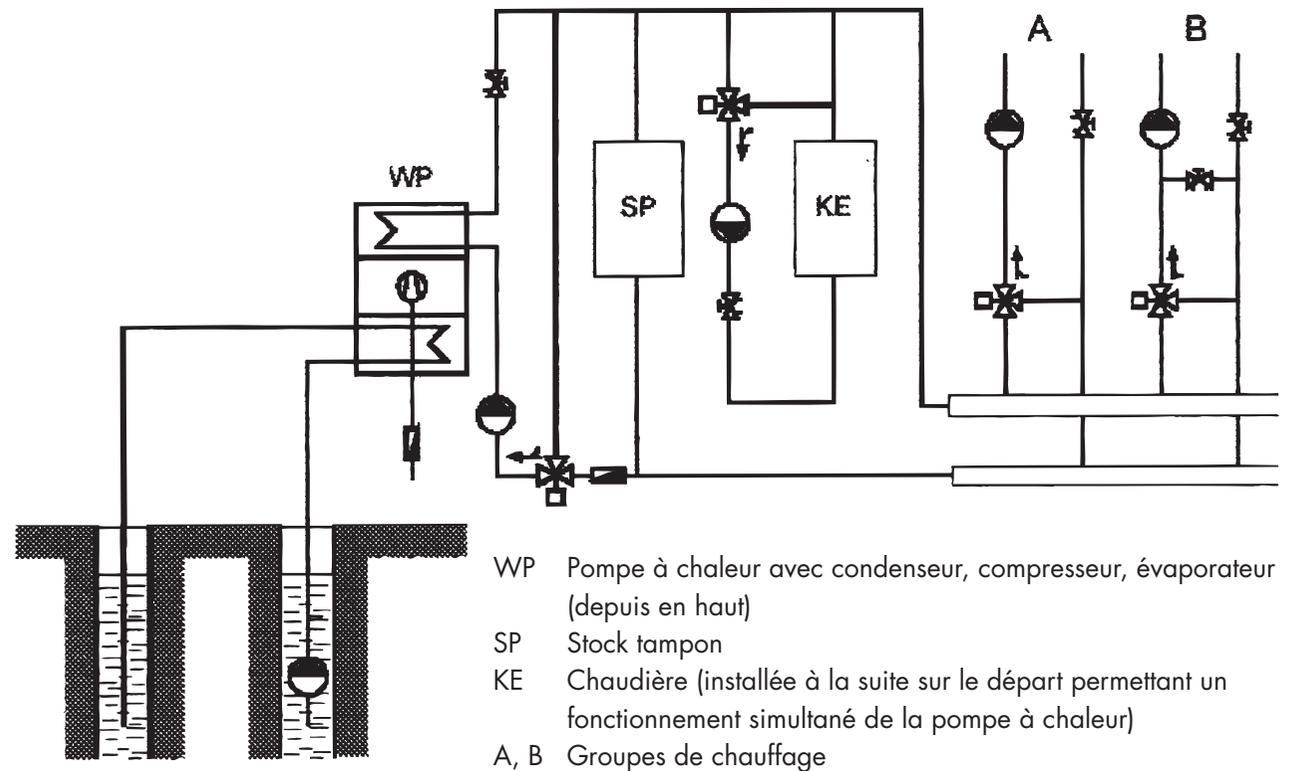


Fig. 5: Schéma de principe d'une installation de pompe à chaleur bivalente eau/eau

### Pompe à chaleur eau/eau et saumure/eau

(Fig. 6)

Le premier mot désigne le support duquel l'évaporateur amène la chaleur (la source de chaleur); le second désigne le support dans lequel le condenseur dégage de la chaleur. Lorsque la température de la source de chaleur peut tomber au-dessous de 0°C, il faut ajouter à l'eau un liquide antigel: on parle alors de saumure.

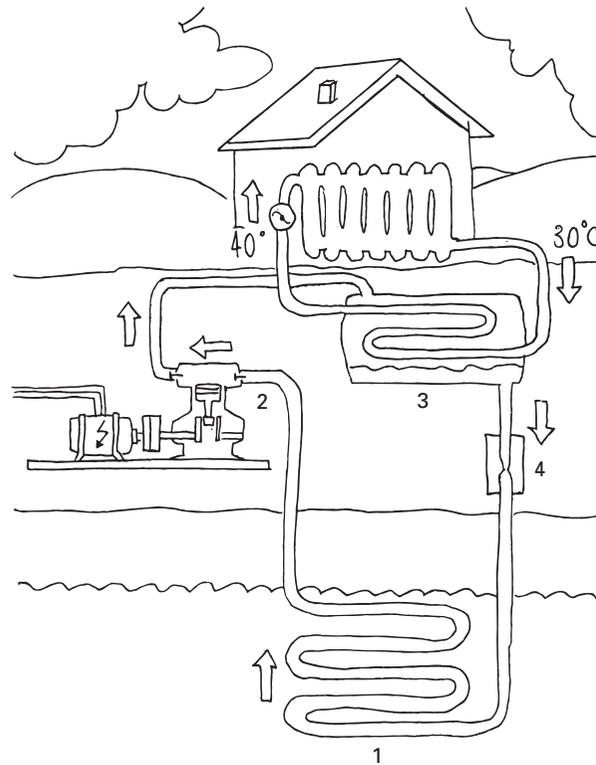


Fig. 6: Schéma d'une pompe à chaleur eau/eau

- 1 Evaporateur (absorption de chaleur). Dans cette illustration la source de chaleur est l'eau. En pratique l'évaporateur ne peut guère être placé directement dans l'eau, mais un circuit à eau ou à saumure transporte la «chaleur» (env. 0 ... 10°C) jusqu'à l'évaporateur, opération nécessitant une pompe de circulation.
- 2 Compresseur avec entraînement à moteur électrique.
- 3 Condenseur (dégagement de chaleur). Support de distribution de chaleur: eau de chauffe. Dans cette illustration, l'eau de retour du chauffage arrive dans le condenseur à 30°C, y est chauffée de 10°C et coule à 40°C dans le départ d'eau conduisant au corps de chauffe. Celui-ci dispense la chaleur dans la pièce. Cela refroidit à nouveau l'eau circulant à 30°C. Une pompe à circulation maintient le fonctionnement de ce circuit. On utilise souvent des chauffages par le sol à la place des corps de chauffe, ce qui permet des températures de départ d'eau plus basses.
- 4 Soupape de détente.

### Pompe à chaleur air/eau

(Fig. 7)

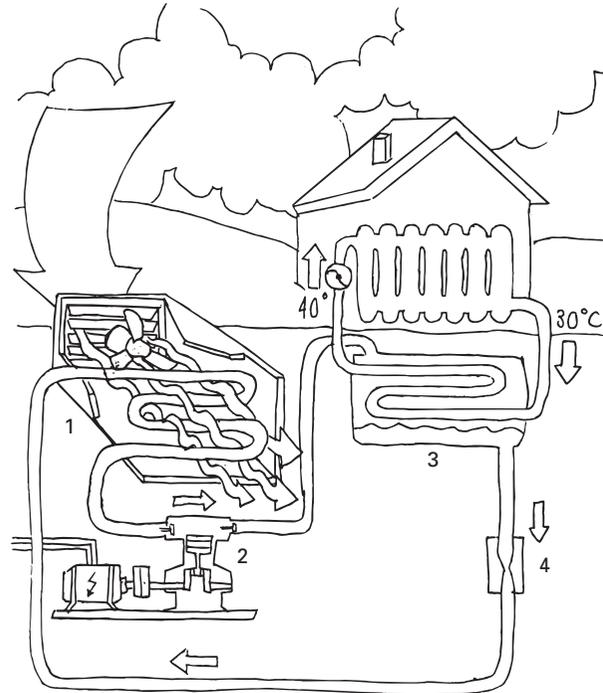


Fig. 7: Schéma d'une pompe à chaleur air/eau

- 1 Evaporateur (absorption de chaleur). Avec la source de chaleur que constitue l'air, l'évaporation directe (sans circulation intermédiaire) est la règle.
2. à 4 comme la pompe à chaleur eau/eau.

### Combinaisons avec l'alimentation en eau chaude

Toute pompe à chaleur possédant une circulation d'eau comme distributeur de chaleur peut être exploitée pour alimenter en eau chaude sanitaire. Il existe pour cela diverses possibilités de commande et de branchement, et dans certains cas même le branchement en série simple de condenseurs peut être utilisé (comme dans la fig. 3). Mais le plus souvent il vaut la peine d'envisager, pour une combinaison entre chauffage de l'eau sanitaire et chauffage, une installation plus coûteuse et à planifier plus soigneusement. Dans les édifices très bien isolés thermiquement (standard basse consommation d'énergie, ou «MINERGIE») la part du besoin de chaleur pour l'eau chaude peut devenir aussi importante que celle dévolue au chauffage des locaux.

### Pompe à chaleur air/air

(Fig. 8)

De petites installations de pompes à chaleur air/air sont planifiées par des projeteurs comme agrégats de récupération d'énergie pour des maisons avec ventilation contrôlée. Dans ces cas, la pompe à chaleur est utilisée à la place d'un échangeur de chaleur air/air. Ainsi plus de puissance peut être fournie qu'avec un échangeur de chaleur seul, bien que la consommation de courant par rapport au gain de chaleur obtenu soit plus élevée (par ex. 1 à 4, avec échangeur de chaleur et ventilateur 1 à 20).

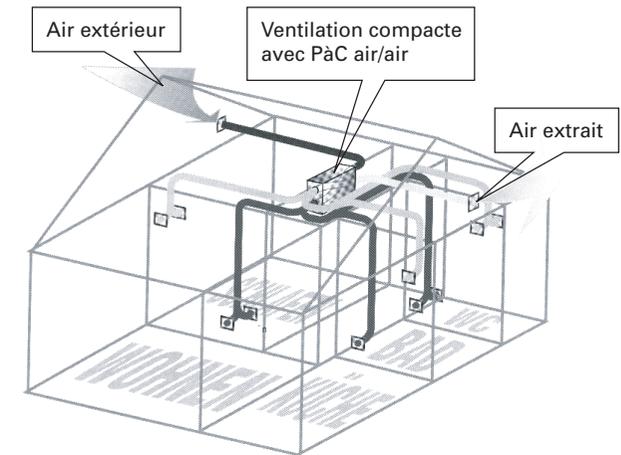


Fig. 8: Ventilation contrôlée d'appartement avec récupération de chaleur avec pompe à chaleur air/air

## 4.4 Sources de chaleur

La température et la nature de la source de chaleur considérée sont d'une importance cruciale pour l'intégration et donc l'exploitation de toute pompe à chaleur. On peut en principe classer les sources de chaleur selon leur provenance et leur état physique (solide, liquide ou gazeux).

### Propriétés de l'eau et de l'air en tant que sources de chaleur

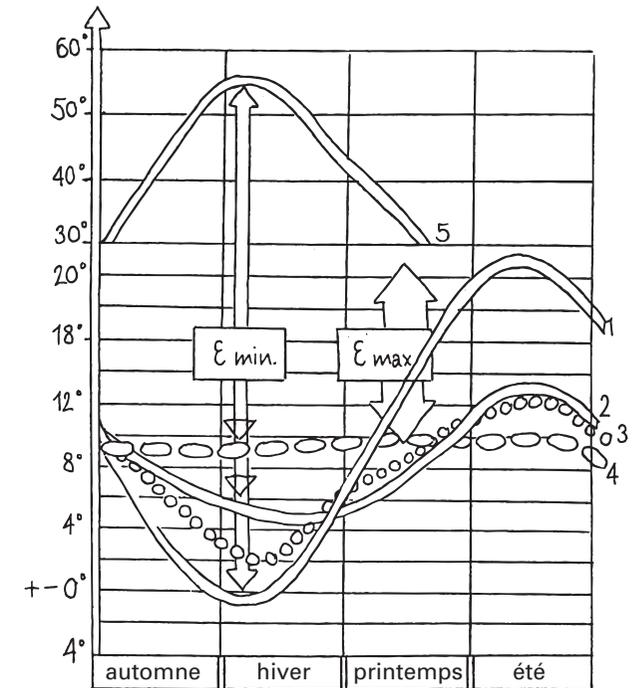
Les propriétés physiques plaident indubitablement en faveur des sources de chaleur à l'état liquide. Par exemple, le gain de chaleur tiré de 1 m<sup>3</sup> d'eau refroidi de 5 K s'élève à 5,8 kWh. En comparaison il faudrait refroidir de 5 K exactement 3500 m<sup>3</sup> d'air pour obtenir un gain de chaleur identique.

### Rapport entre le facteur de rendement $\varepsilon$ et les températures des sources et du chauffage

(Voir fig. 9, comparez 4.1, rendement de Carnot, et fig. 4, facteurs COP)

$\varepsilon_{\min.}$  Pendant les saisons froides, les sources de chaleur indiquent également des températures basses. Or c'est pendant cette période-là qu'il faut chauffer le plus, ce qui nécessite de hautes températures de l'eau de chauffage. La différence de température entre les sources de chaleur et l'eau de chauffage est grande, et le facteur de travail  $\varepsilon$  est donc petit.

$\varepsilon_{\max.}$  Ici c'est exactement le contraire. Le facteur de rendement élevée ne sert malheureusement pas à grand chose parce qu'on a besoin de peu de chaleur et qu'en plus les



- 1 Température extérieure moyenne de l'air
- 2 Température de la terre à environ 1,5 m de profondeur
- 3 Température des eaux de surface
- 4 Température de l'eau de la nappe phréatique
- 5 Température de l'eau de chauffage

Fig. 9: Facteurs de rendement en dépendance de la température de la source

pompes à chaleur à simple effet rendent bien trop de puissance et ne fonctionnent par conséquent que pour de très brèves périodes.

Afin de ne pas devoir installer les pompes à chaleur pour une performance de pointe en cas de grands froids (et de facteurs de rendement bas), on leur adjoint (surtout les grandes installations) une seconde source d'énergie, le plus souvent une chaudière à mazout. On parle alors d'installation bivalente (à deux valeurs), voir paragraphe 4.2.

#### L'air extérieur (fig. 10)

En tant que source de chaleur l'air extérieur a un grand avantage: il est disponible partout et ne nécessite aucune autorisation. L'installation est compacte et facile à contrôler. Et on n'a pas à craindre de pollution insidieuse de l'environnement par la saumure ou le fluide actif.

Il a cependant aussi des inconvénients:

- le mouvement des valeurs contraires entre température de la source de chaleur et température du système de chauffage est extrême, c'est-à-dire que  $\varepsilon_{\min}$  est très bas. Ces installations sont donc souvent bivalentes, c'est-à-dire construites avec un chauffage complémentaire (voir 4.2).
- le givrage de l'évaporateur en dessous d'une température extérieure d'env. 5 ... 7 °C (fluide actif < 0°C) rend nécessaire un dégivrage périodique.
- problèmes de bruit suite au brassage de grandes quantités d'air.

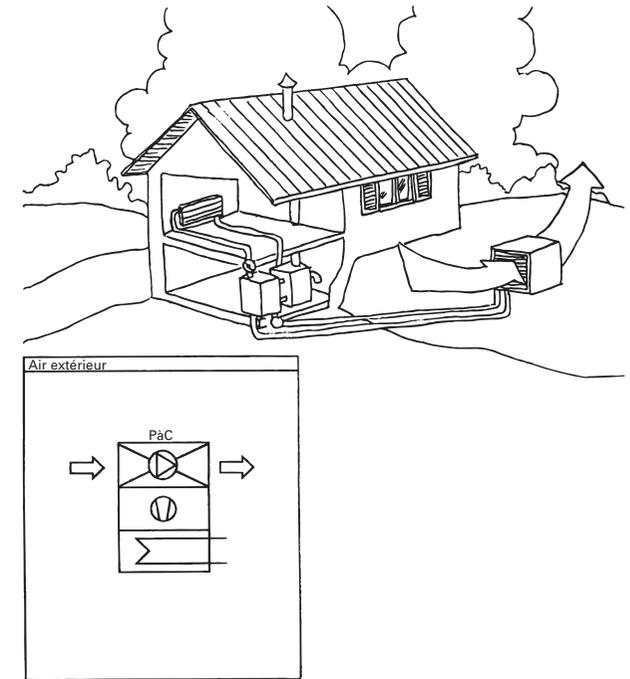


Fig. 10: Représentation graphique et technique d'une installation bivalente avec air extérieur

Aspects de l'application:

Il est extrêmement important d'élucider avec le plus grand soin les points techniques concernant le bruit, y compris pour les installations placées à l'intérieur. La réglementation anti-bruit et les directives locales doivent être impérativement respectées. Recourir à un acousticien si nécessaire. Il existe des types d'installation intérieure, extérieure ou partagée (où seul l'évaporateur est dehors). Pour les installations bivalentes il faut planifier soigneusement la commande (commutation sur chauffage complémentaire).

### L'eau de la nappe phréatique (fig. 11)

On appelle eau de nappe phréatique toutes les eaux se trouvant sous la surface de la terre. Elle circule dans la roche poreuse (pierrailles, sable) et est considérée comme une bonne source de chaleur pour les raisons suivantes:

- niveau de température constant, relativement élevé
- médium propre.

L'eau de nappe phréatique non influencée par l'infiltration d'une eau de surface, se trouve généralement à une température moyenne comprise entre 9 et 11 °C, ce qui est plus chaud que la moyenne annuelle de la température extérieure. L'utilisation des eaux de nappe phréatique nécessite une autorisation administrative parce qu'il peut y avoir danger de pollution des eaux.

Aspects de l'application:

Installations coûteuses (év. mesures de sécurité à cause du danger de pollution) et donc à prévoir de préférence dans les grands immeubles. Autorisation, resp. concession, nécessaires.

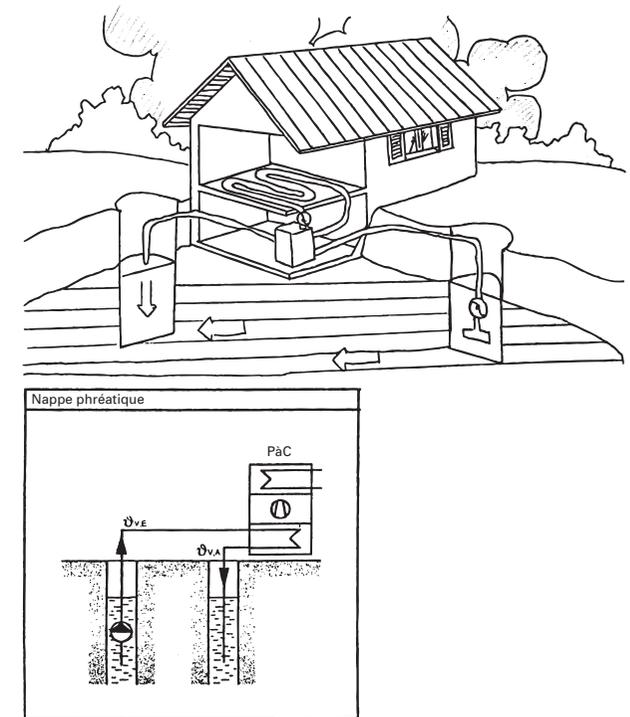


Fig. 11: Représentation graphique et technique d'une installation utilisant la nappe phréatique

### L'eau de surface (fig. 12)

Les eaux de surface (lacs, rivières et de ruisseaux) sont généralement soumises à de plus fortes variations de température et peuvent par conséquent s'avérer problématiques pour une exploitation monovalente (danger de formation de glace sur l'évaporateur).

On peut gagner de la chaleur des eaux de surface de deux façons:

- registre dans l'eau courante; une grande quantité d'eau coule par le registre de l'échangeur de chaleur et le refroidissement est donc réduit.
- l'eau est collectée dans un réservoir à filtre (év. eau lacustre saisie directement) et pompée vers l'échangeur de chaleur.

Aspects de l'application:

Nécessite de grandes quantités d'eau, puisque les prescriptions en vigueur ne permettent qu'un léger refroidissement. Autorisation et mesures de sécurité comme pour l'eau de nappe phréatique.

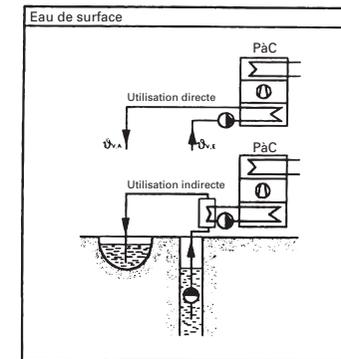
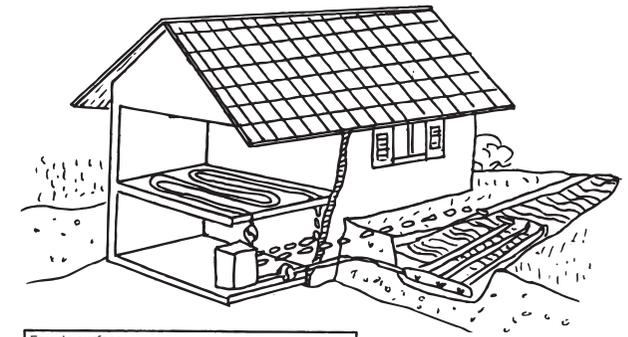


Fig. 12: Représentation graphique et technique d'une installation utilisant l'eau de surface

### Chaleur terrestre

Pour les petites installations, l'évaporateur peut être posé sous forme de tuyaux en plastique directement dans le sol. La chaleur est alors sous-tirée du sol. C'est surtout le soleil qui fournit la chaleur du sol jusqu'à environ 2 m de profondeur. La capacité calorifique de la terre dépend de sa nature et de sa teneur en eau.

On peut l'utiliser de deux manières:

- horizontalement avec registres terrestres
- verticalement avec sondes, resp. forages en profondeur.

### Registres terrestres (fig. 13)

Les registres terrestres doivent pour ainsi dire être qualifiés de «collecteurs solaires» exploitant la capacité d'accumulation thermique de la terre. La surface nécessaire à la pose d'un registre peut représenter jusqu'à trois fois la surface habitable chauffée. La nature du sol et le temps qu'il fait sont essentiels en matière d'absorption de chaleur. En cas d'absorption énergétique continue, la température du sol chute relativement fortement. Si la surface terrestre du collecteur n'est pas suffisamment grande, il est judicieux de le combiner avec un dispositif de décharge (p. ex. un capteur solaire non vitré, un registre de toit).

Aspects de l'application :

ne convient qu'aux petites installations à cause de la surface nécessitée par le registre terrestre.

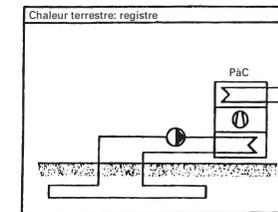
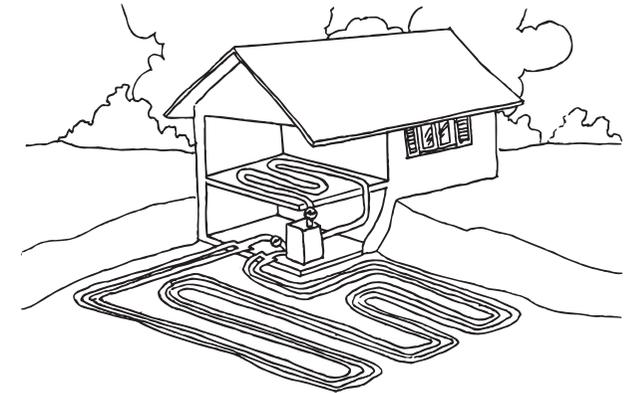


Fig. 13: Représentation graphique et technique d'une installation utilisant un registre terrestre

### Sondes à chaleur terrestres (fig. 14)

Avec les sondes à chaleur terrestre on enfouit des tuyaux en plastique dans des forages verticaux profonds. Il faut presque toujours plusieurs forages (au même endroit) pour maintenir une puissance calorifique suffisante avec une profondeur de forage raisonnable (50 à 200 m). Le refroidissement du sol crée une «sorte d'entonnoir de température» dépendant de la puissance spécifique de la sonde (limite supérieure 50 W/m). Plus cette absorption est intensive, plus la forme de cet «entonnoir» est verticale. Le sol entourant la sonde récupère pendant les pauses d'exploitation de celle-ci. Ces pauses sont absolument nécessaires car le faible apport calorifique provenant de l'intérieur de la Terre ne suffit pas à maintenir les conditions du dimensionnement.

Aspects de l'application:

Plus coûteux que le registre terrestre, mais évolution des températures plus favorable si la mise en place est correcte. Pour les petites et moyennes installations (pour les capacités importantes les forages doivent être plus espacés).

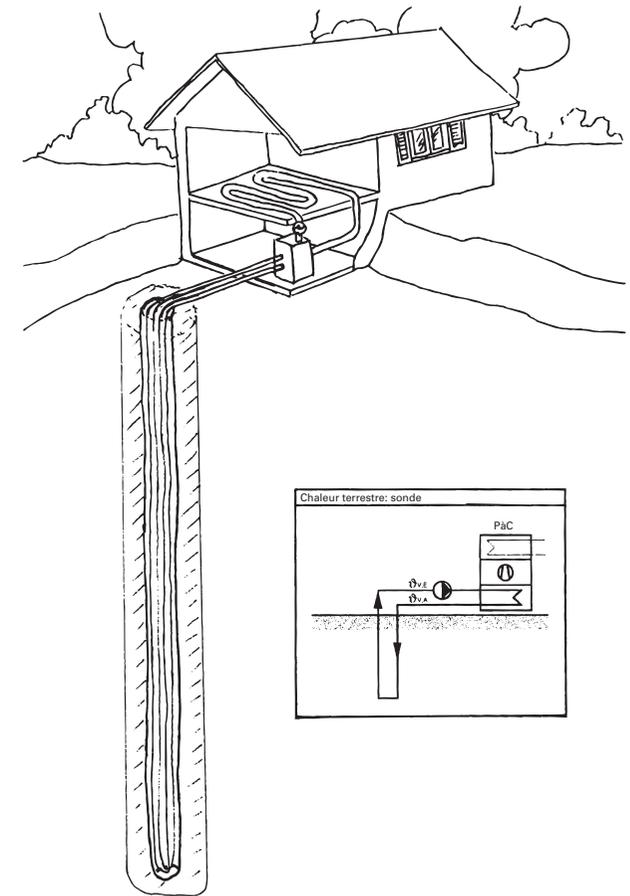


Fig. 14: Représentation graphique et technique d'une installation utilisant une sonde terrestre

### Forages profonds

Les forages à grande profondeur (p. ex. 500 à 1000 m) permettent de gagner une chaleur géothermique à température plus élevée. Cette eau peut, selon le niveau de température, être utilisée directement ou bien amenée à une température utilisable par le biais d'une pompe à chaleur. Les coûts d'accès étant élevés une exploitation économique raisonnable n'est possible qu'avec de grandes installations et des rendements de travail supérieurs à 4, ainsi qu'avec des subventions pour le forage. Le plus intéressant, ce sont les forages susceptibles d'être repris gratuitement provenant d'autres prospections (eau, gaz naturel...).

Aspects de l'application:

Grandes et très grandes installations. Des réseaux de chaleur à distance sont nécessaires. Le risque de forages trop peu rentables doit être couvert par des subventions ou des techniques d'assurances.

### Chaleur dégagée

La chaleur dégagée peut être disponible au niveau des entreprises industrielles et artisanales. Comme, bien souvent, la production de chaleur dégagée et les besoins en chaleur ne coïncident pas, une analyse précise est donc nécessaire. On décide alors si le problème peut être résolu par un accumulateur (côté froid et/ou côté chaleur). Une exploitation judicieuse par accumulateur permet une utilisation optimale dans les secteurs de charge partielle et

peut en outre servir à limiter les pointes à pleine capacité (ce qui donne des avantages financiers). On applique souvent une forme particulièrement intéressante d'exploitation de la chaleur dégagée en cas d'aération contrôlée de l'habitat : l'air qui s'échappe après la récupération de chaleur peut encore être refroidi avec une petite pompe à chaleur, ce qui permet de chauffer un réservoir d'eau chaude.

### «Chaleur à distance froide»

La chaleur dégagée des stations d'épuration d'eau STEP (toute l'année supérieure à 10°C) ou des installations industrielles (température presque toujours supérieure à celle des STEP, mais souvent non disponible 24 h sur 24) convient comme source de chaleur pour les pompes à chaleur. Ce qu'on appelle la «chaleur à distance froide» permet d'amener la chaleur dégagée aux installations de pompes à chaleur souvent quelque peu éloignées. Les basses températures permettent d'utiliser des conduites non isolées au coût avantageux et éventuellement de renoncer à une conduite de retour (circuit ouvert: l'eau refroidie par les pompes à chaleur est injectée dans d'autres eaux, appropriées).

## 4.5 Planification et réalisation des installations de pompes à chaleur

### Où peut-on installer d'une pompe à chaleur ?

En premier lieu il faut élucider la question de la source de chaleur: type, puissance/rendement, autorisation. Dans les nouvelles installations les plus petites pompes à chaleur combinées avec une aération contrôlée de l'habitat sont presque toujours possibles, de préférence pour chauffer ou préchauffer l'eau.

### Comment déterminer la puissance d'une pompe à chaleur ?

La puissance calorifique de la P à C est déclarée dans le livret de données techniques avec indications complémentaires sur les températures témoins. Il signifie:

- A 10 température extérieure de l'air 10°C
- B 0 température de saumure 0°C
- W 10 température de l'eau 10°C
- W 35 température de l'eau chaude 35°C
- W 50 température de l'eau chaude 50°C

Exemples P à C air/eau

Températures [°C]	Puissance calorifique [kW]
A 10/W 35	7,8
A 7/W 35	7,3
A 2/W 35	5,3
A -7/W 35	4,1
A 7/W 50	7,0
A 2/W 50	5,1
A -7/W 50	4,2

Les températures de la source de chaleur et le dégagement de chaleur sont - comme le montre l'exemple - non seulement déterminantes pour le facteur de rendement (voir 4.1), mais aussi pour la puissance calorifique effectivement livrable (fig. 15). Pour déterminer la puissance de la P à C il faut donc des connaissances précises sur la source de chaleur et sur le dégagement de chaleur.

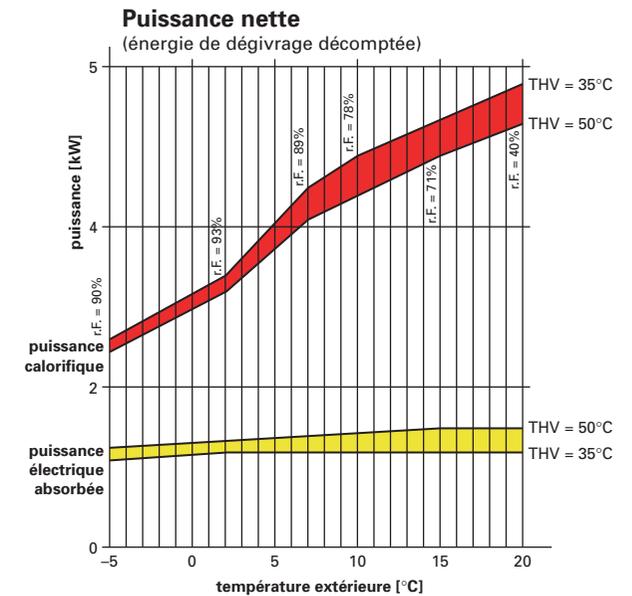


Fig. 15: Puissance calorifique d'une P à C air/eau en relation avec la température ext. (influence du dégivrage à remarquer entre 2 et 7 degrés !)  
THV = Température départ chauffage

### **Corps de chauffe ou chauffage par le sol ?**

Les chauffages par le sol permettent d'atteindre des températures d'eau chaude plus basses qu'avec des corps de chauffe (où elles deviennent plus élevées). Dans les bâtiments anciens possédant déjà des radiateurs il faut donc accepter des rendements plus bas et une P à C de plus grande puissance, même si une installation bivalente offre souvent un compromis (avec un chauffage d'appoint éventuellement déjà disponible). Mais les chauffages par le sol doivent aussi être conçus pour des températures d'eau chaude aussi basses que possible, p. ex. 30°C pour une température extérieure de -8°C, ce qui implique une disposition de tuyaux plus dense et donc des coûts un peu plus élevés.

### **Prendre en compte l'alimentation en eau chaude?**

Il existe encore des fournisseurs d'installations de P à C qui proposent un chauffe-eau électrique à côté de la P à C dans leur offre standard. Cela n'a pas grand sens puisqu'une partie intéressante de l'exploitation de la P à C (et même une partie importante dans les maisons à basse consommation d'énergie) est ainsi «gaspillée». Il est possible de chauffer l'eau sans problème avec une P à C à bon rendement, mais cela requiert toutefois une planification compétente (p. ex. la capacité d'une P à C à simple est très haute en été et doit donc être compensée par un échangeur de chaleur dimensionné en conséquence). Dans certains cas il est judicieux d'avoir des chauffe-eau à P à C séparés et compacts (bouilleurs à P à C) ou bien une combinaison avec l'aération contrôlée de l'habitat.

### **Intégrer un détecteur ou un compteur pour mesurer la performance**

Les facteurs de rendements mesurés pour des installations de pompes à chaleur de même type restent très variables, ce qui est surtout dû à la qualité variable de la planification et de la réalisation. Pour pouvoir contrôler les rendements promis ou garantis, il faut installer dès le départ un dispositif simple de mesure ou de comptage. Outre les thermomètres de surveillance des températures de départ, de retour et d'accumulateur (qui font normalement partie de l'installation) il faut aussi un compteur électrique séparé, un compteur de chaleur (qui saisit le débit, la température de départ et de retour côté chauffage) ainsi qu'un compteur des heures d'exploitation et des impulsions de commutation. Le tout coûte environ 2'500.– Fr. Mais un tel dispositif installé plus tard reviendrait beaucoup plus cher. Si les compteurs sont relevés chaque mois, on a alors une bonne base de données pour analyser le facteur de rendement et de charge et étudier le comportement de l'installation dans la durée.

### **Exiger la garantie de performance Energie 2000 et le label de qualité D-A-CH**

Pour donner aux maîtres d'ouvrage, souvent peu versés en technique, une meilleure assurance de la qualité des installations P à C, Energie 2000 a développé une garantie de performance. Sur ce formulaire le constructeur de l'installation confirme certains critères de qualité. Si des doutes devaient surgir par la suite, cette garantie de performance (ainsi que les valeurs relevées aux compteurs) aiderait à juger des résultats. Le label de qualité D-A-CH se porte garant d'une autre garantie de qualité (concernant les appareils fournis). Ce label a été mis au point par la société suisse de promotion des pompes à chaleur (FWS) en collaboration avec les organisations allemande (D) et autrichienne (A).

## 5 Exercices et solutions proposées

### Exercice 1

Remplissez un flacon de laboratoire en verre avec de l'eau chauffée à environ 80°C; veillez à ce que le flacon soit traversé par un thermomètre et un tube en verre. Fermez le flacon. A l'aide d'une pompe à jet d'eau ou d'une pompe à main, aspirez l'air hors du flacon.

Observez et expliquez le processus.

### Exercice 2

Nous chauffons de l'eau dans un récipient de verre ouvert. Dès que l'eau bout, nous mesurons la température et observons le processus d'ébullition. Expliquez le processus.

### Exercice 3

Gonflez une roue de vélo avec une pompe. Observez et expliquez le processus.

### Exercice 4

Etudiez le schéma de principe d'une installation de pompe à chaleur (fig. 5) et réfléchissez aux différentes situations d'exploitation en ce qui concerne les éléments de commande nécessaires. Etablissez une liste des fonctions de commande et dessinez les symboles et liens correspondants dans le schéma.

### Solution 1

L'eau du flacon commence à bouillir, la température de l'eau chute rapidement.

Explication:

Lorsqu'on pompe l'air, une dépression se produit dans le flacon de verre. Or en dépression la température d'ébullition descend (voir introduction). Comme elle ne vient pas de l'extérieur, l'énergie nécessaire à l'évaporation est retirée au liquide.

### Solution 2

La température d'ébullition de l'eau s'élève à 100 °C. La température ne monte pas plus haut bien que l'eau soit constamment chauffée.

Explication:

L'énergie calorifique consommée est utilisée pour faire évaporer l'eau.

### Solution 3

La pompe à vélo devient chaude, et elle est la plus chaude à l'endroit où le piston ne peut pas provoquer de friction.

Explication:

En comprimant l'air, celui-ci s'échauffe. La chaleur de compression est transmise à la tête de pompe et au tuyau.

## 6 Bibliographie

### Documents issus de l'ancien office fédéral des questions conjoncturelles

- Programme d'impulsion PACER, Pour le bon usage de la chaleur de l'environnement EDMZ N° 724.260 f
- Programme d'impulsion RAVEL, Pompes à chaleur, EDMZ N° 724.356 f
- Programme d'impulsion RAVEL, Manuel de l'industrie, EDMZ N° 724.370 f
- Programme d'impulsion RAVEL, Habitat et économies d'énergie, des réponses pratiques, EDMZ N° 724.386 f
- Programme d'impulsion RAVEL, «Strom rationell nutzen», Edition vdf, EPF Zurich, 1992
- Maja Messmer et al., l'énergie - facteur-clé de notre temps (manuel de base), adaptation Joël Fournier et Olivier Mercier, LEP, loisirs et pédagogie, Le Mont-sur-Lausanne, 1998, tél. 021/653 53 37

### Documentation sur les pompes à chaleur-modèles de démonstration

(dans beaucoup d'écoles, ces modèles sont disponibles)

### Centre d'information sur les pompes à chaleur (FWS)

CP 298, 3000 Bern, tél. 031 352 41 13, fax 031 352 42 06, E-Mail wp@mkr.ch

- «Die Wärmepumpe im Minergie-Haus» (La pompe à chaleur dans une maison minergie), FWS, 2000

### Centre de test de pompes à chaleur Töss

Auwiesenstr. 47, 8406 Winterthur, tél. 052 202 34 53  
(visite possible)

### Revue Sonnen énergie solaire, de l'association suisse d'énergie solaire (SSES)

Belpstrasse 69, 3007 Berne, tél. 031 371 80 00  
(publie continuellement des articles sur les P à C)

### Services cantonaux et communaux de conseils en matière d'énergie, INFOENERGIE

Voir adresses Internet

### Adresses internet

- [www.fws.ch](http://www.fws.ch)
- [www.wpz.ch](http://www.wpz.ch)
- [www.pompeàchaleur.ch](http://www.pompeàchaleur.ch)
- [www.infel.ch](http://www.infel.ch)
- [www.nok.ch](http://www.nok.ch)
- [www.infoenergie.ch](http://www.infoenergie.ch)
- [www.swissolar.ch](http://www.swissolar.ch)

## 7 Sources

Les dessins réalisés à la main ont été repris de la documentation personnelle de P. Hänni; les idées ainsi que les passages de textes proviennent des sources suivantes:

- Programmes d'impulsion, CD, V3, 1997 (commande par SIA, cp, 8039 Zurich)
- «Unterrichtswerk Wärmepumpe», INFEL, Zurich, 1992
- «Fachkunde Elektrotechnik», Europa Lehrmittel, ISBN 3-8085-3431-1, 1996
- «Fachzeitschrift UMWELTPRAXIS» N° 21, canton de Zurich, octobre 1999
- «Strom-Panorama», octobre 1999
- «Zürcher Energie-Praxis» 2/1995, AWEL, canton de Zurich, 1995

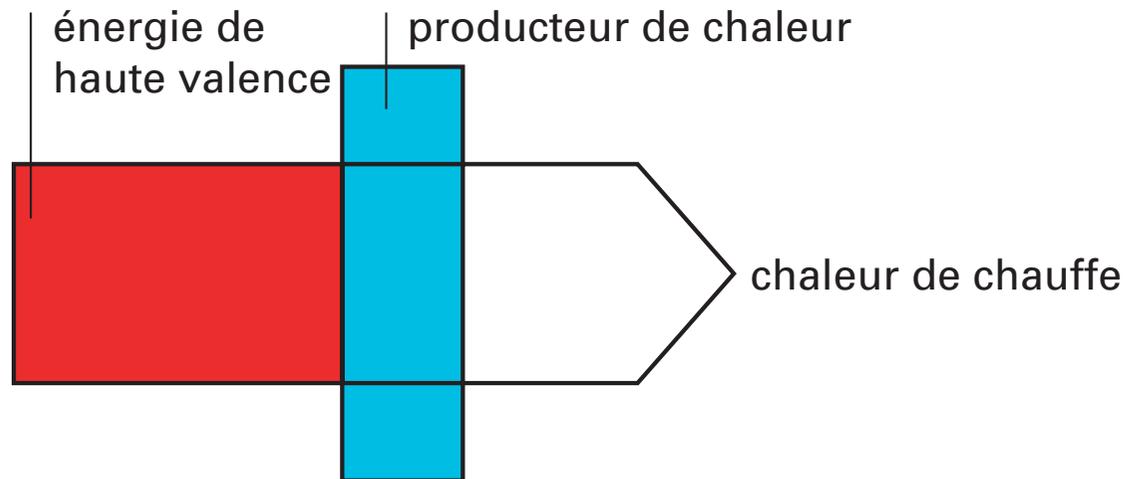
Le développement et les compléments du manuscrit de Peter Hänni a été traité par Jürg Nipkow.

Les figures suivantes ont directement été reprises:

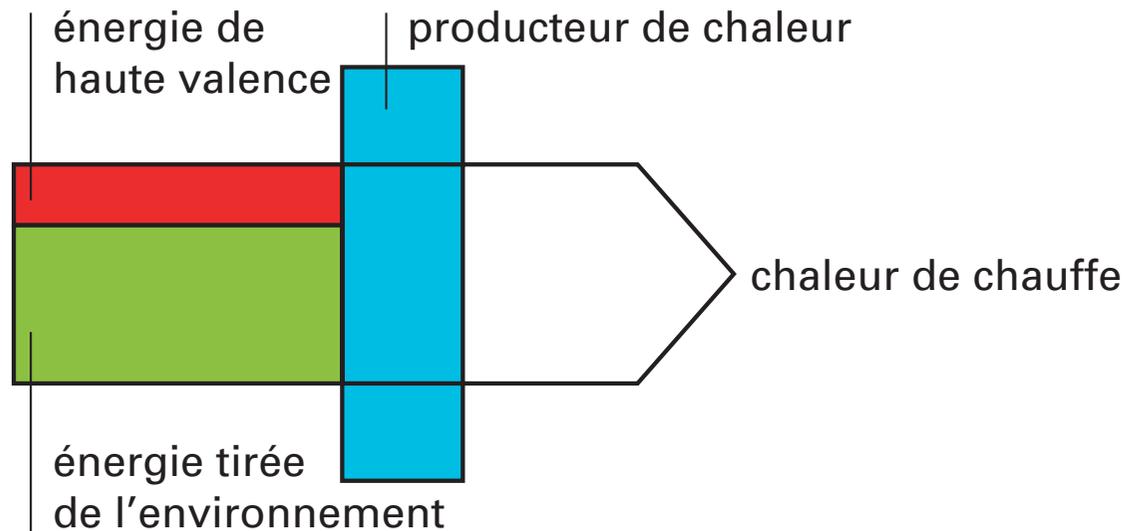
- Fig. 4 source: «Zürcher Energie-Praxis», AWEL; Zürich
- Fig. 5 source: cahier «Pompes à chaleur», RAVEL, ancien Office fédéral pour les questions conjoncturelles, Berne
- Fig. 8 source: prospectus Hegner AG, Galgenen
- Fig. 15 source: documentation Saurer Thermodynamik, Arbon

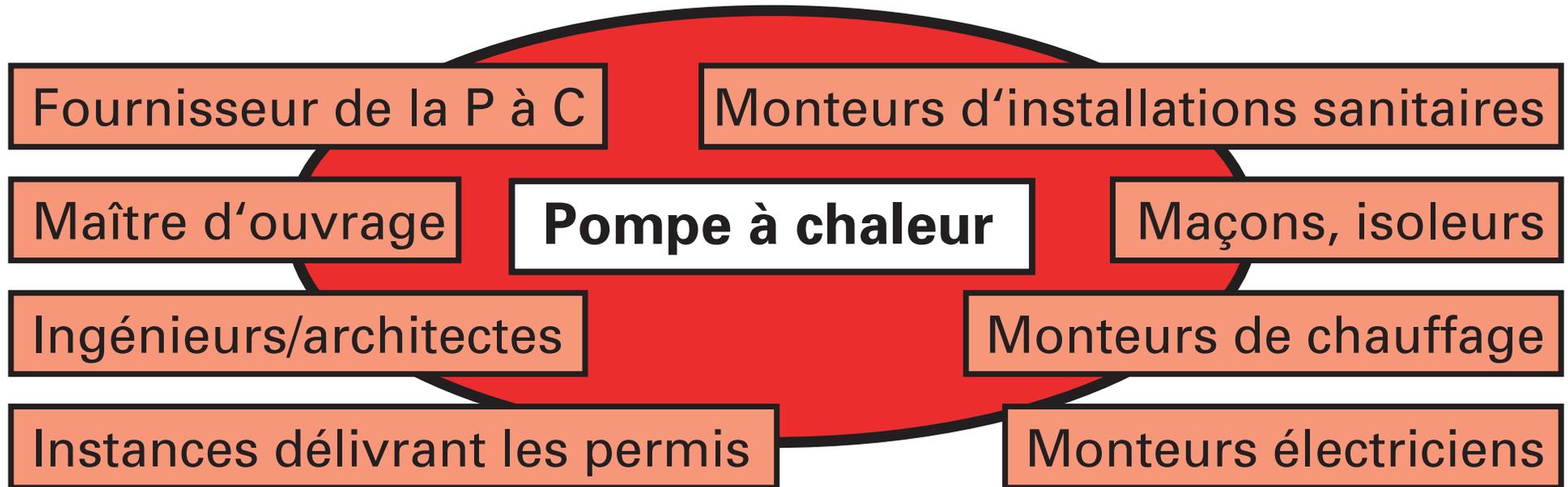
## 8 Modèles

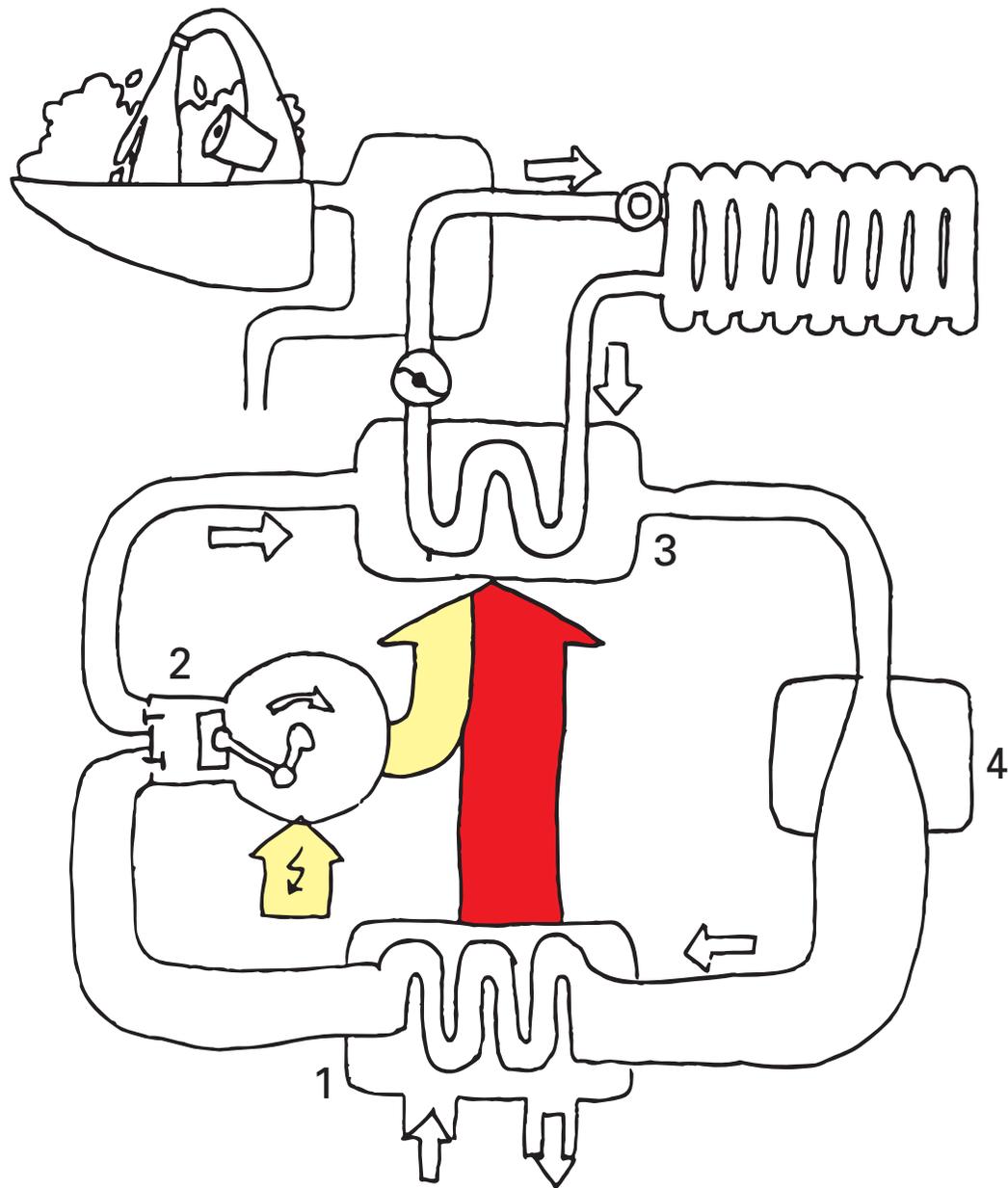
### Chauffage électrique conventionnel



### Chauffage par pompe à chaleur

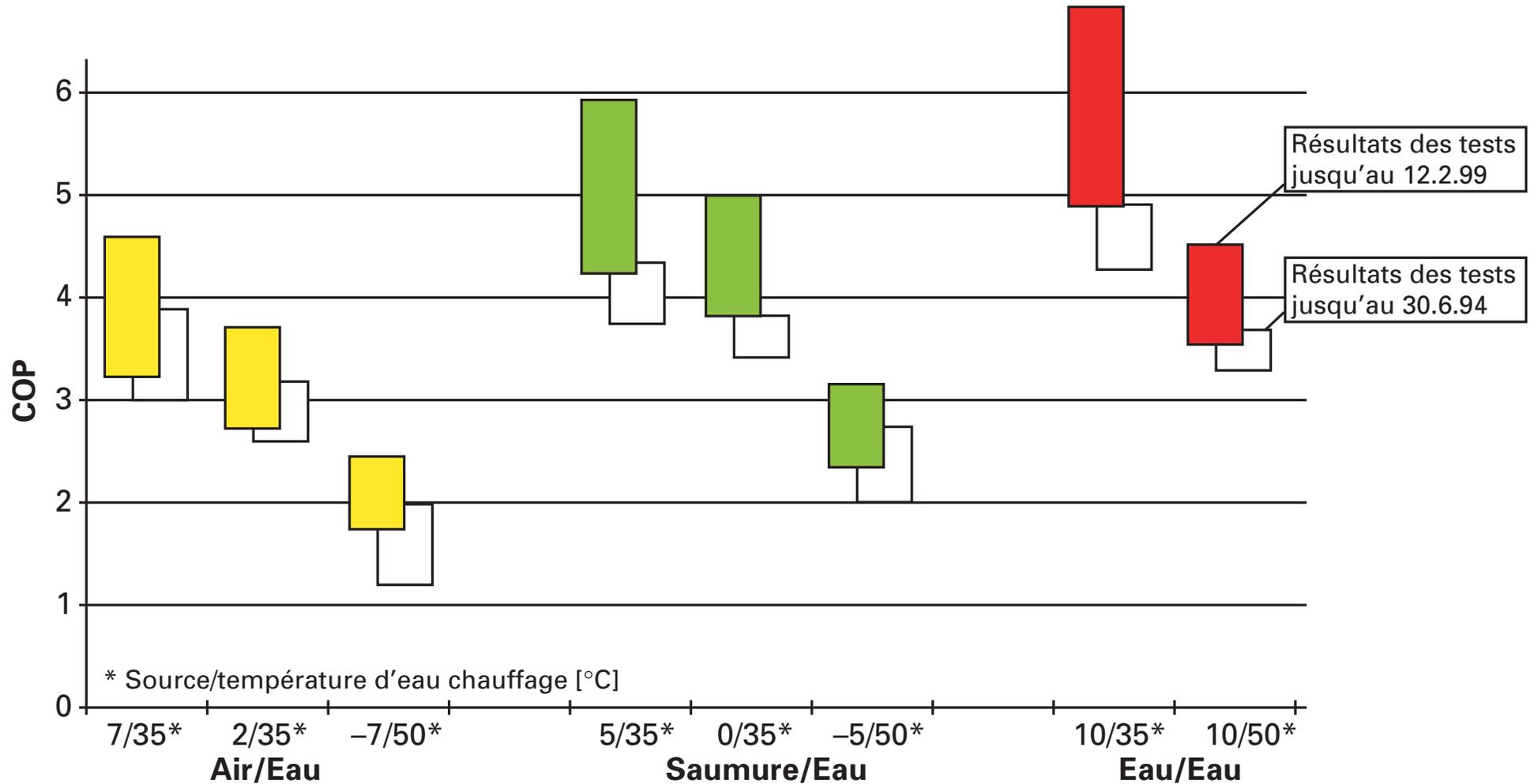


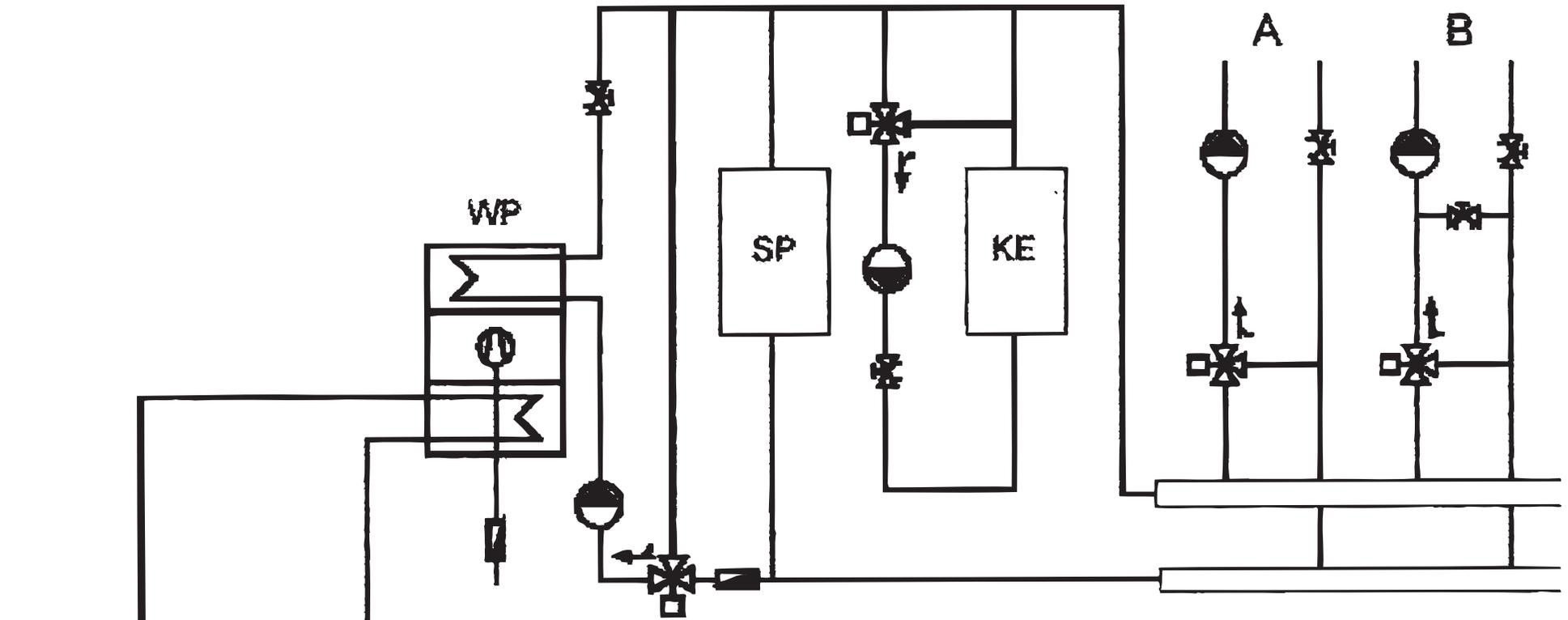




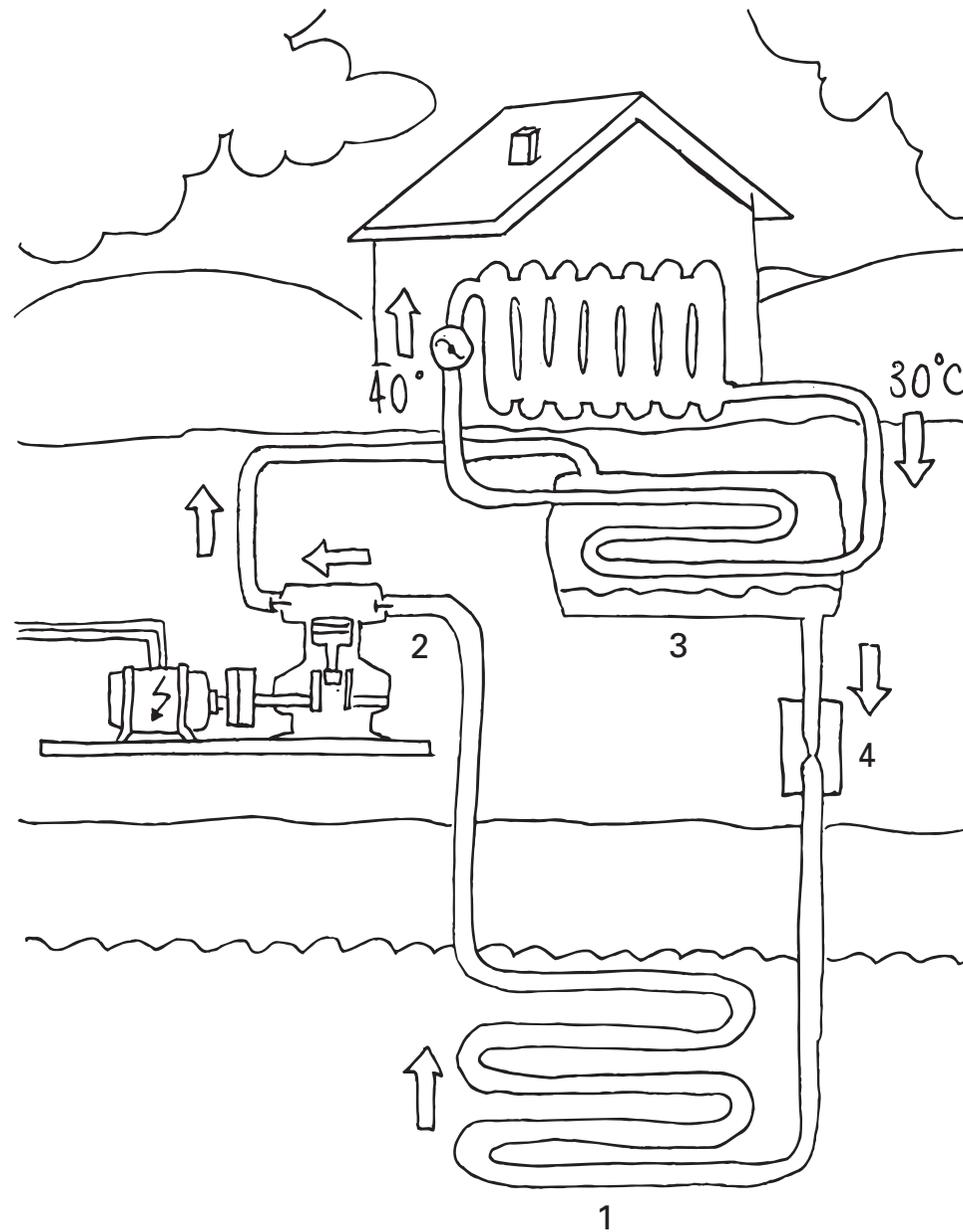
## Facteur COP des pompes à chaleur

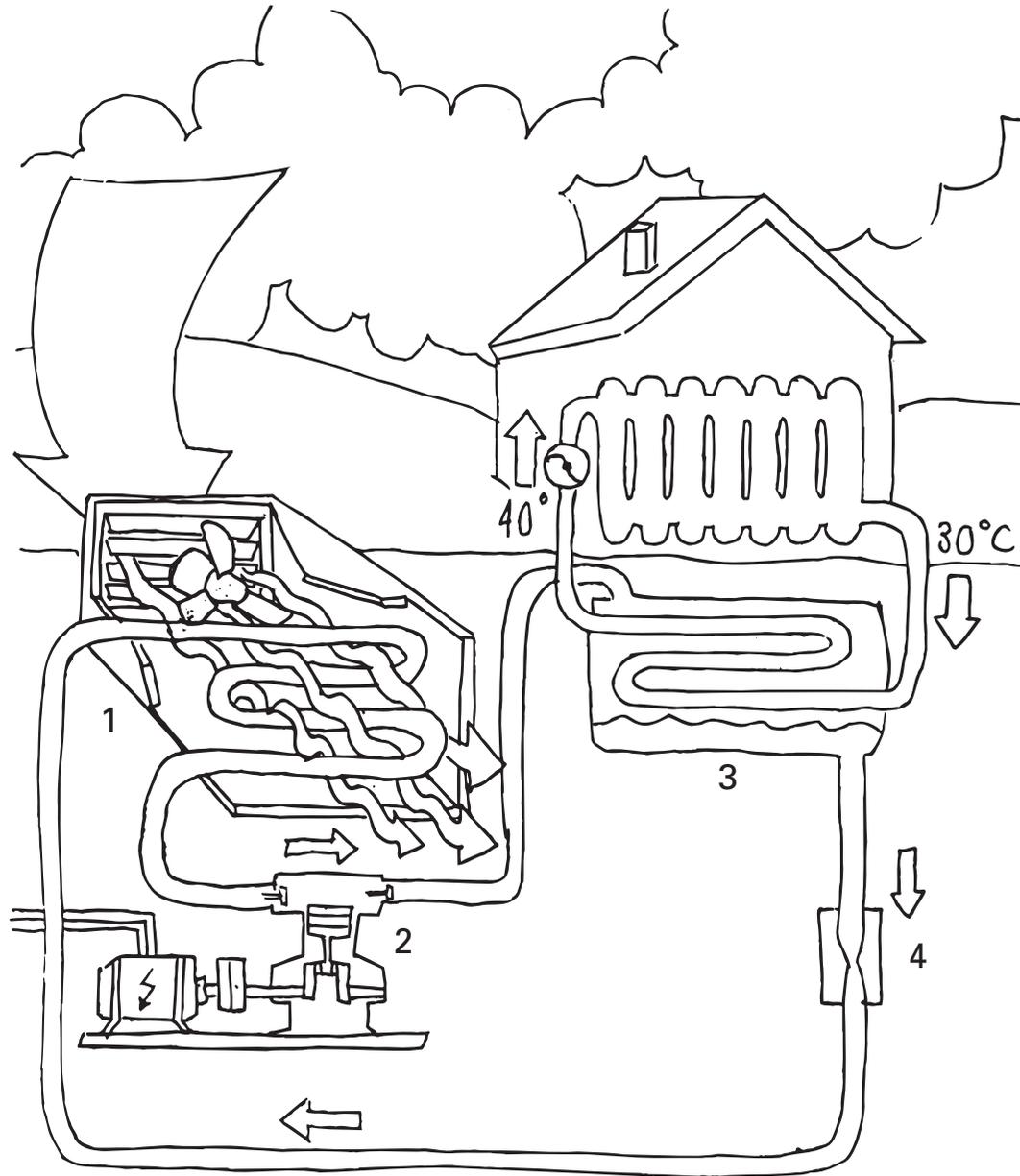
(rapport entre puissance calorifique et puissance électrique du moteur)

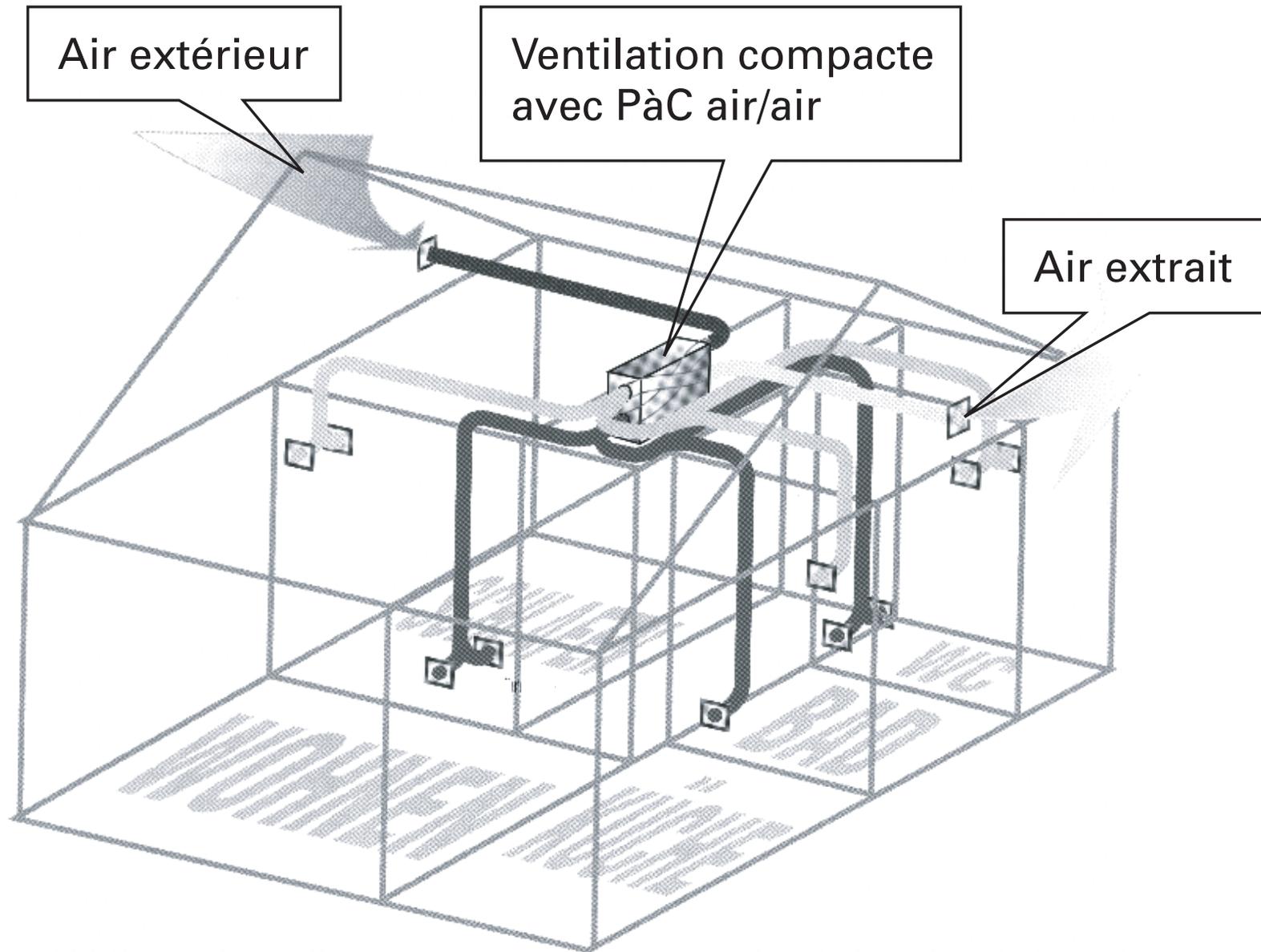


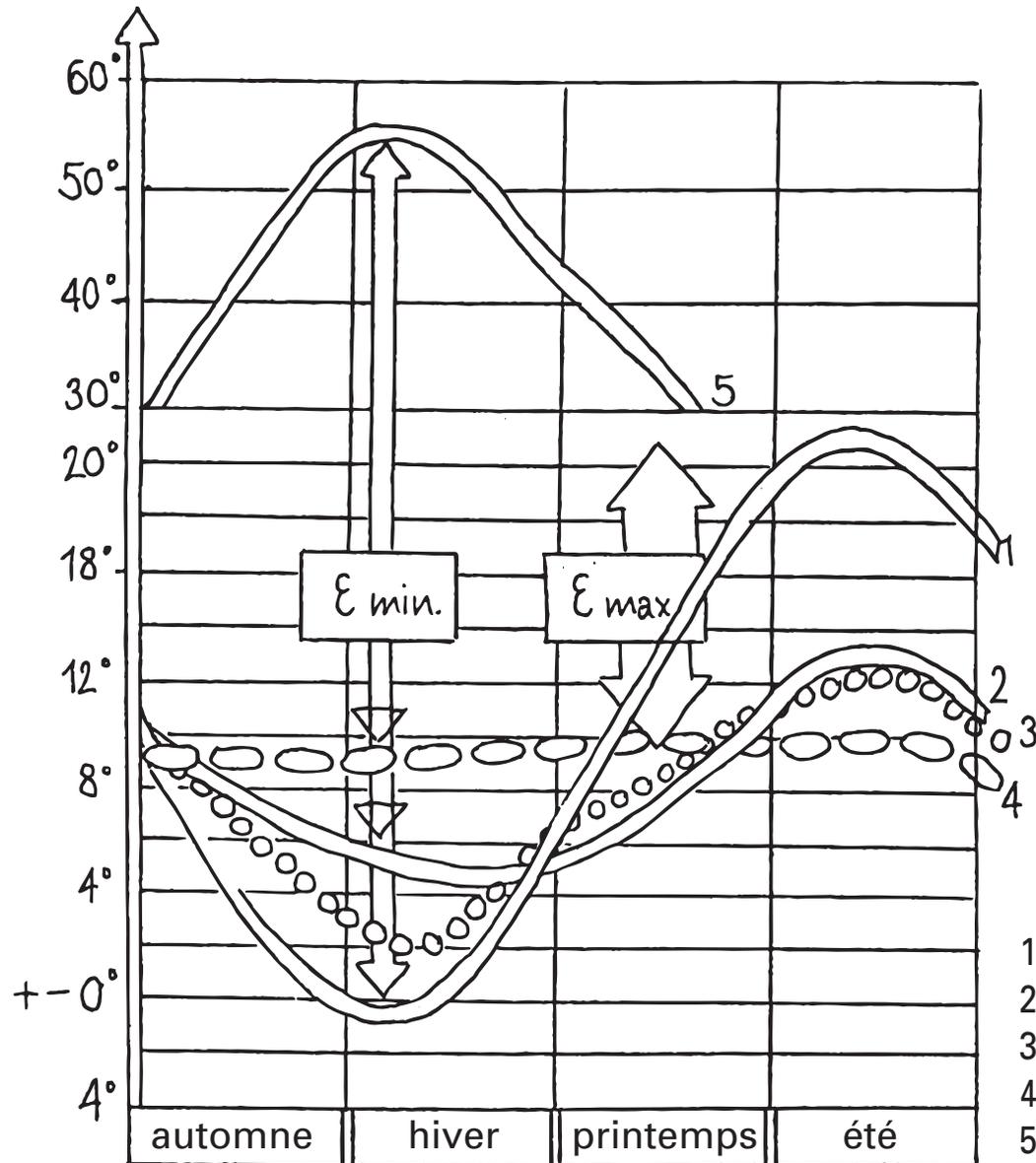


- WP Pompe à chaleur avec condenseur, compresseur, évaporateur (depuis en haut)
- SP Stock tampon
- KE Chaudière (installée à la suite sur le départ permettant un fonctionnement simultané de la pompe à chaleur)
- A, B Groupes de chauffage

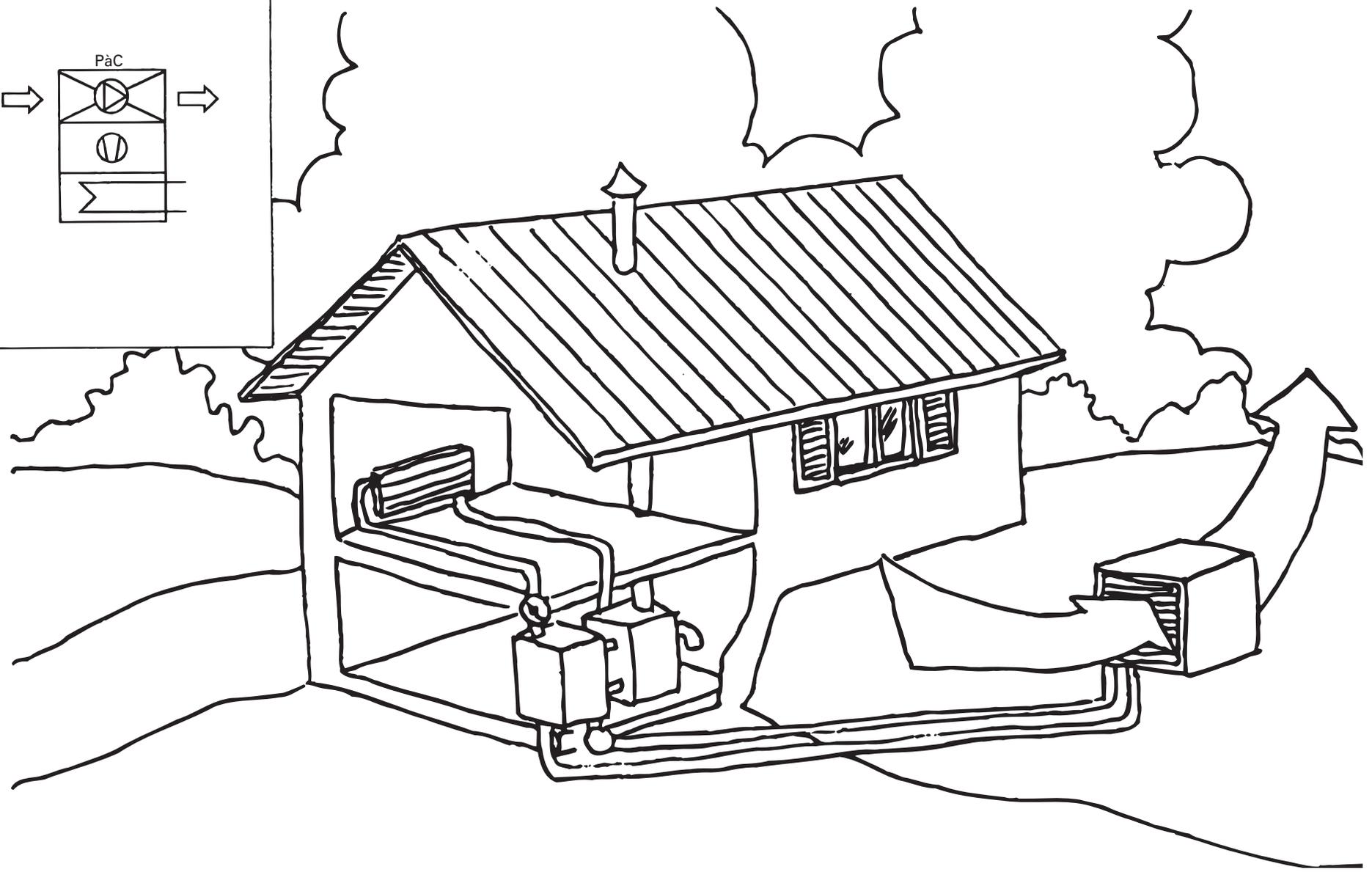
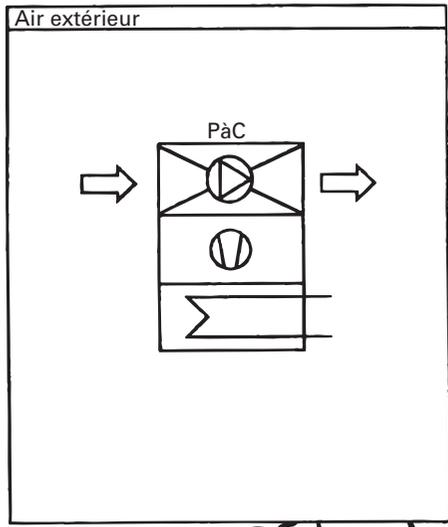


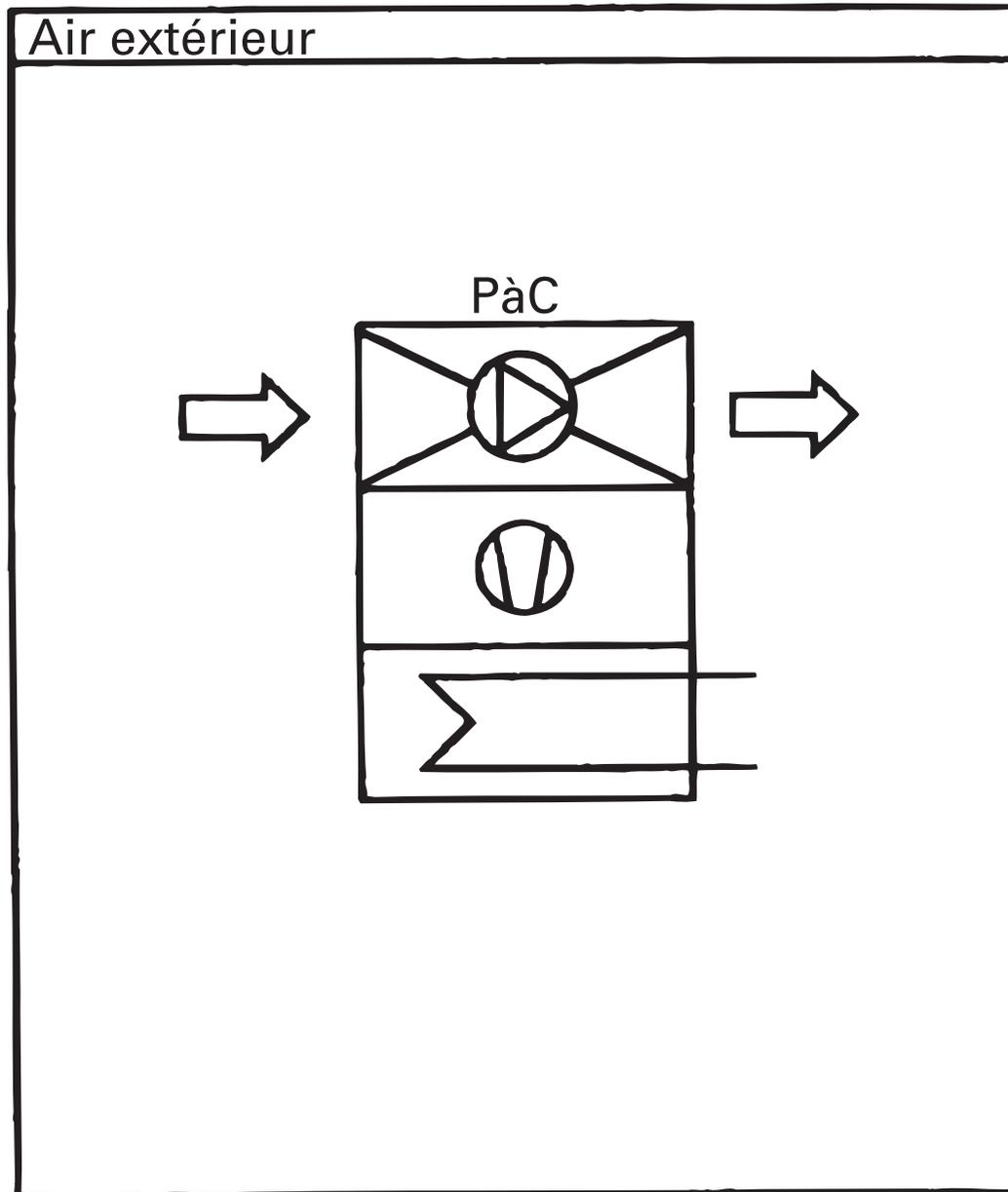


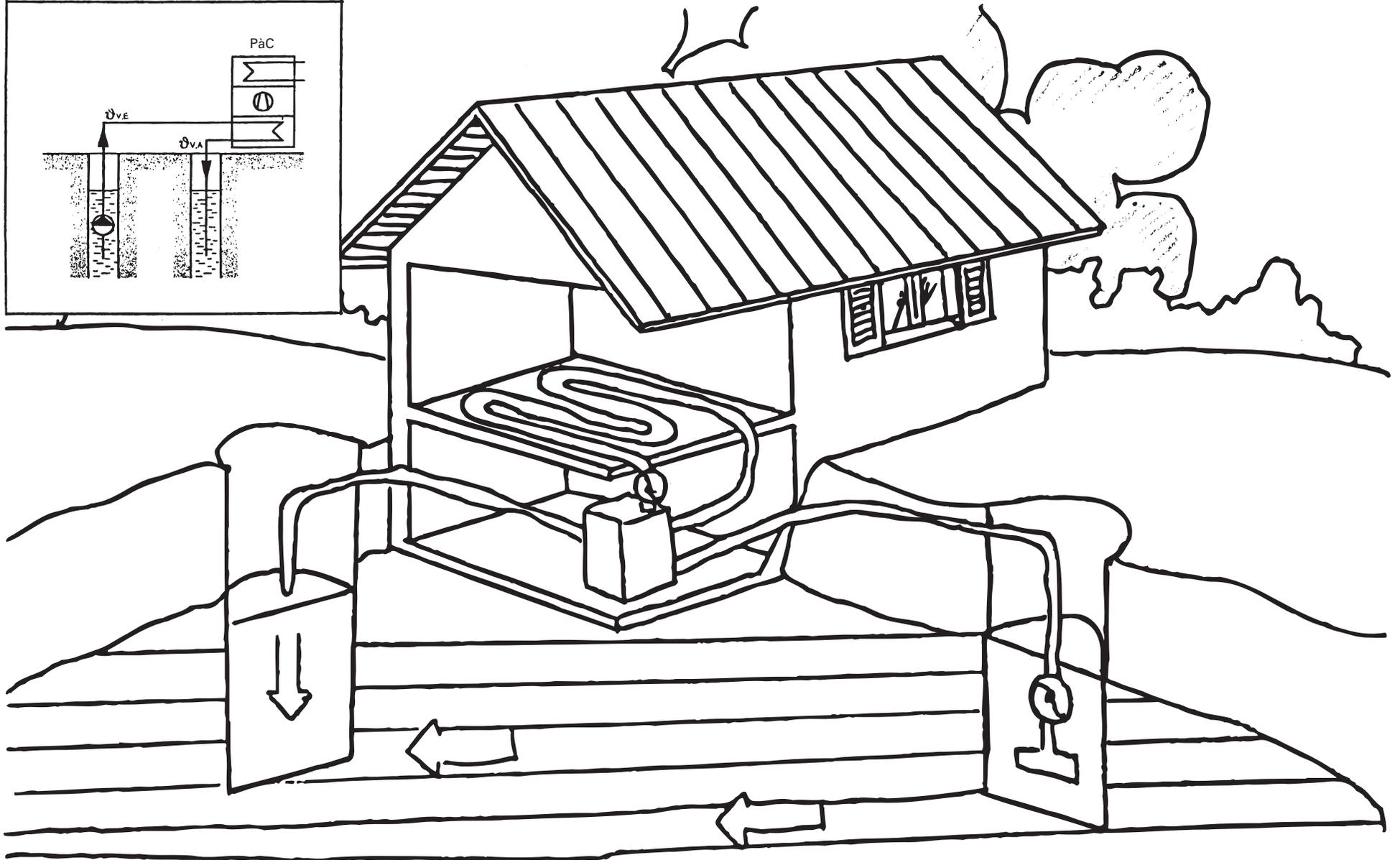
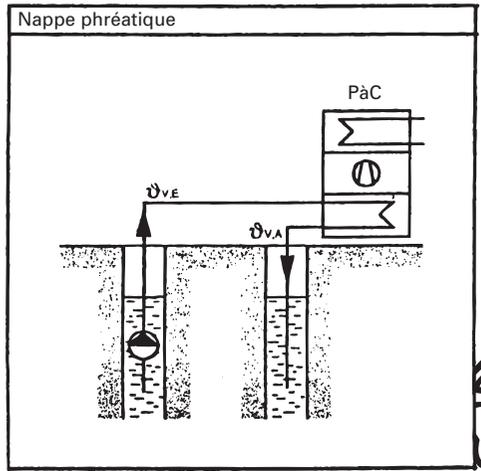


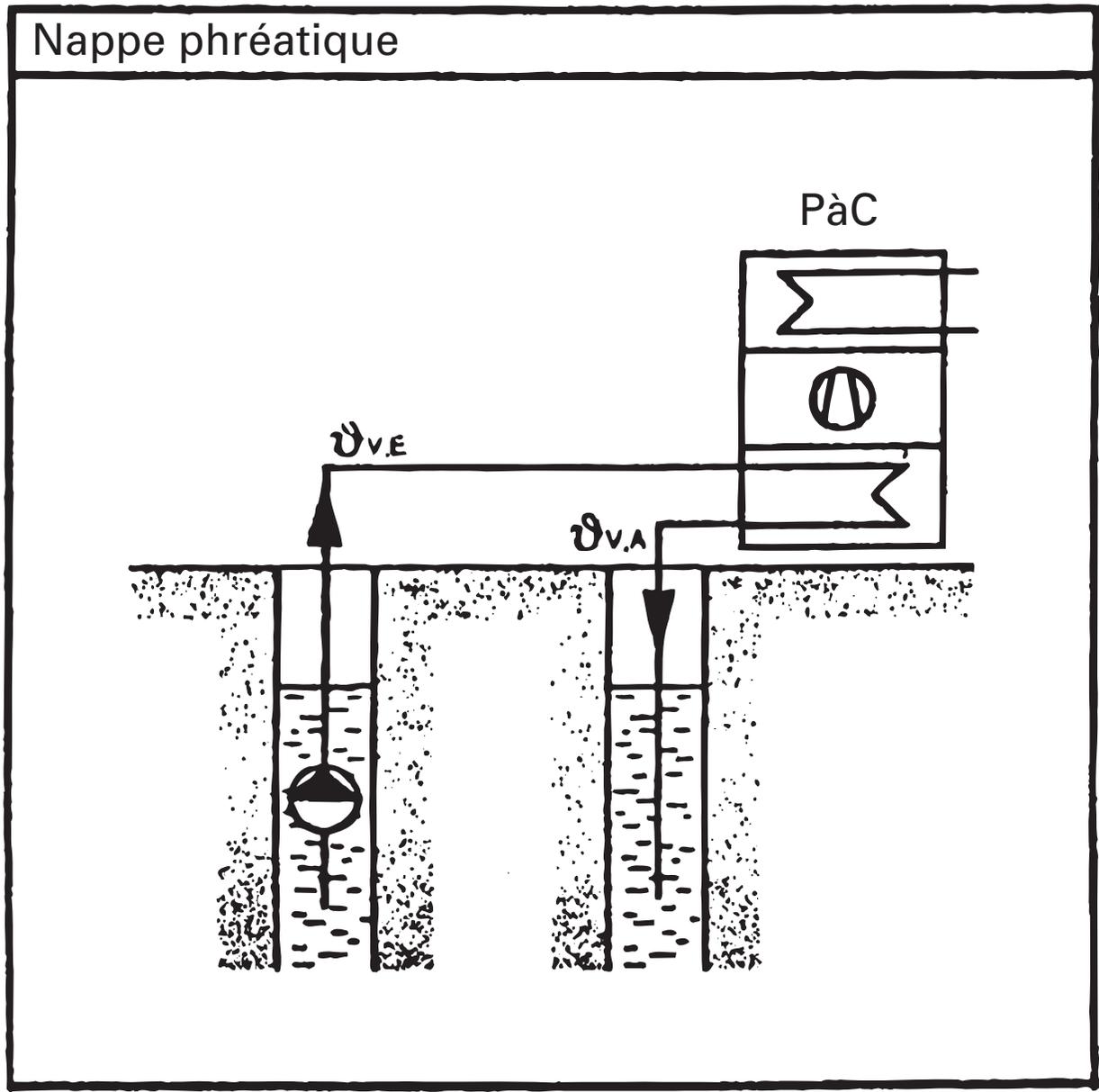


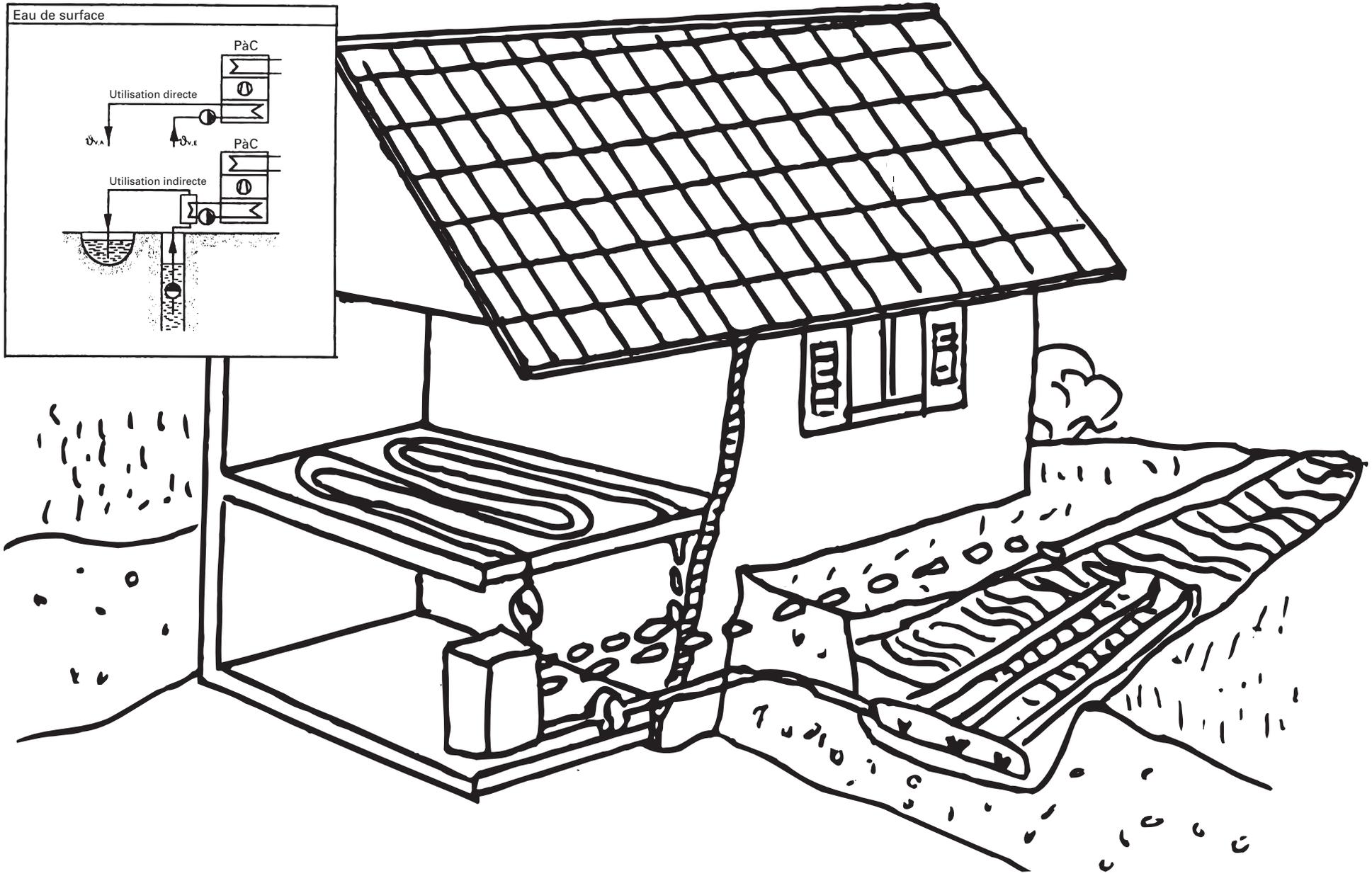
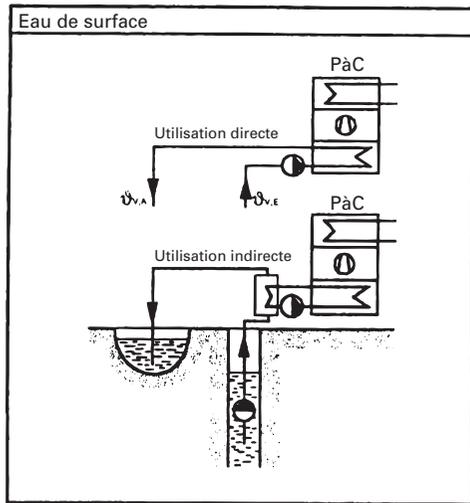
- 1 Température extérieure moyenne de l'air
- 2 Température de la terre à environ 1,5 m de profondeur
- 3 Température des eaux de surface
- 4 Température de l'eau de la nappe phréatique
- 5 Température de l'eau de chauffage

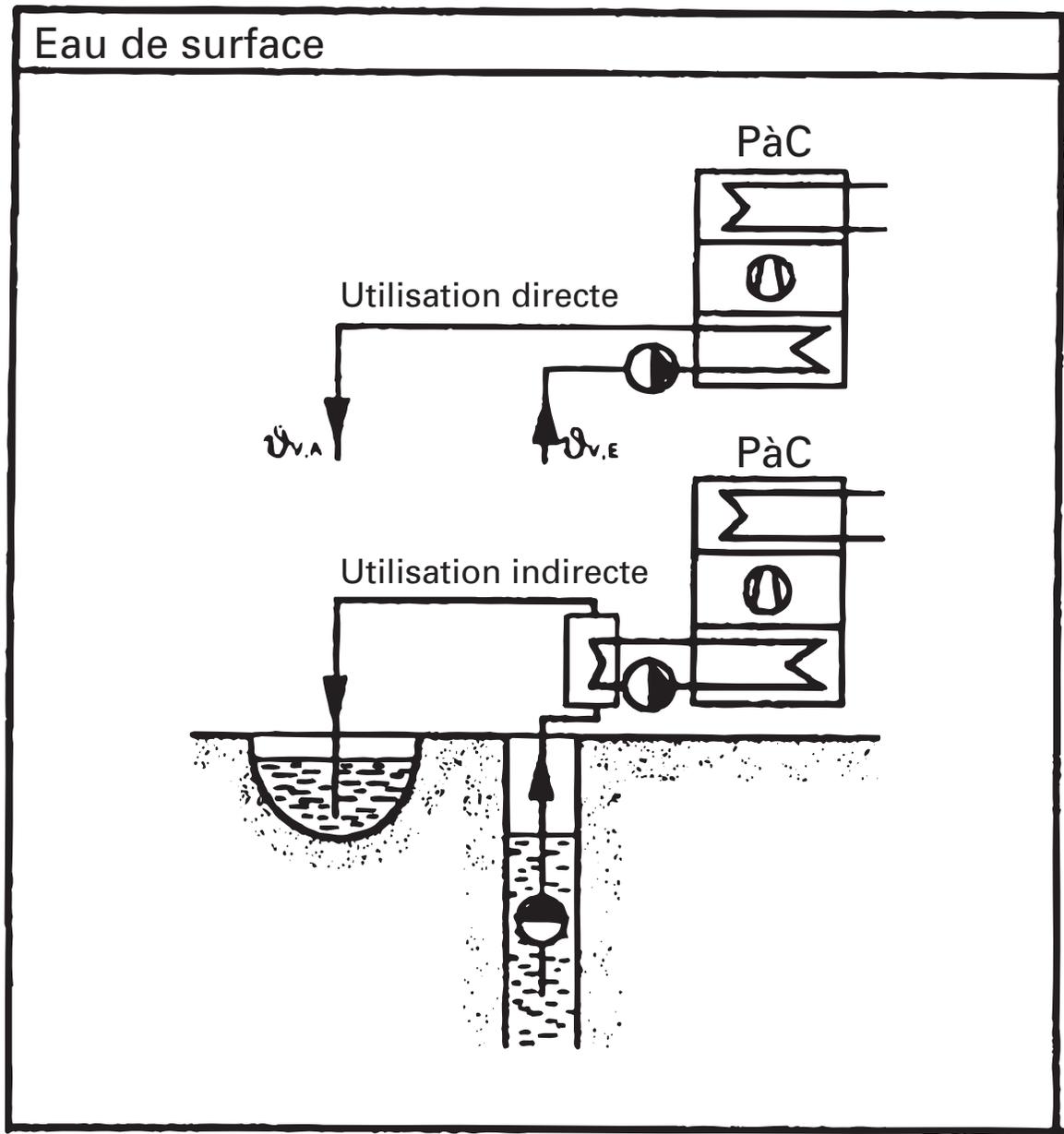


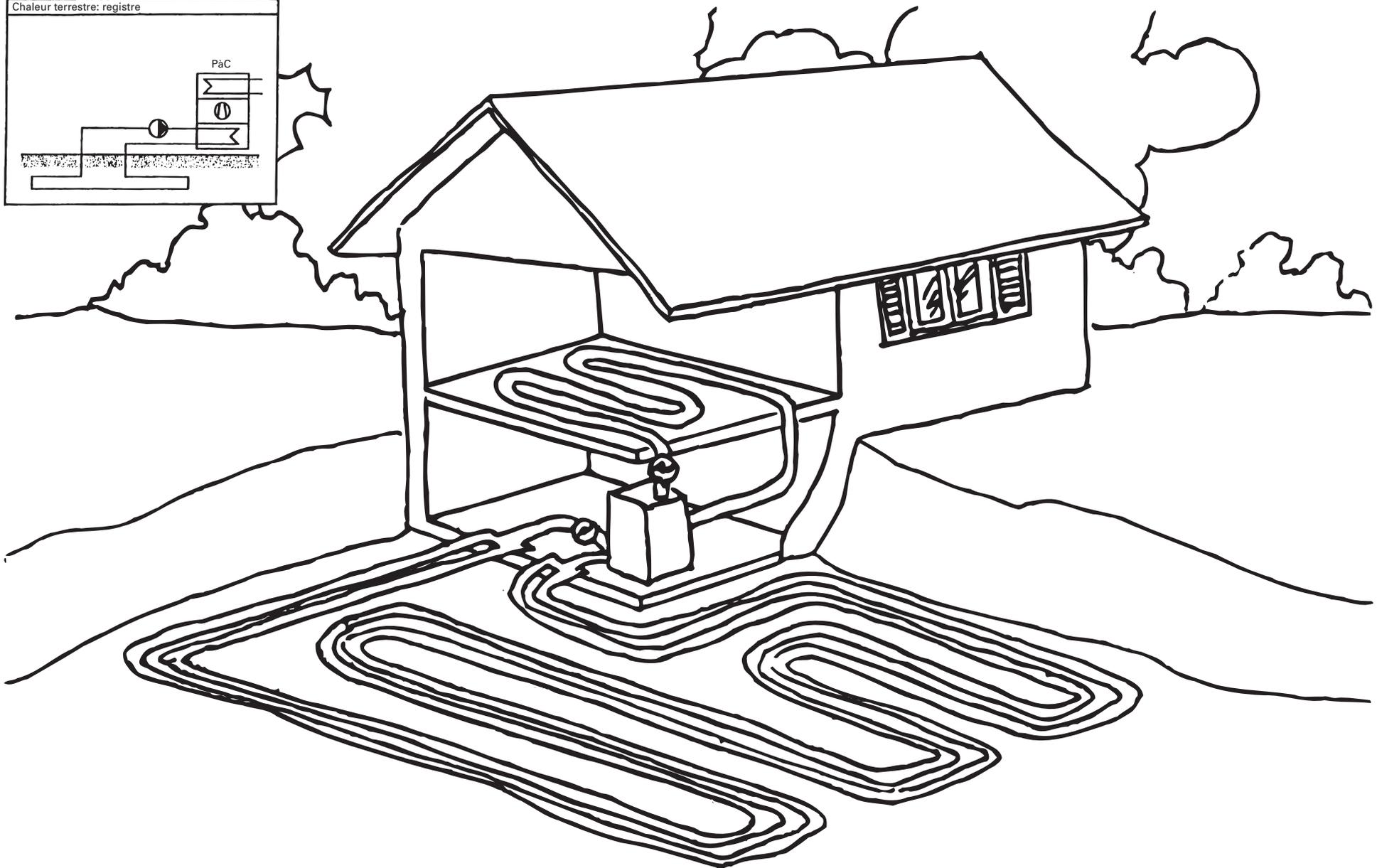
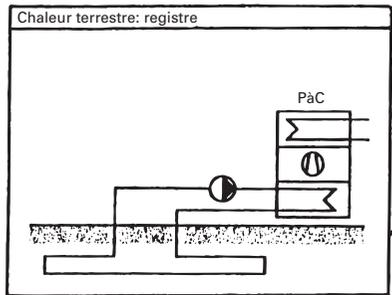


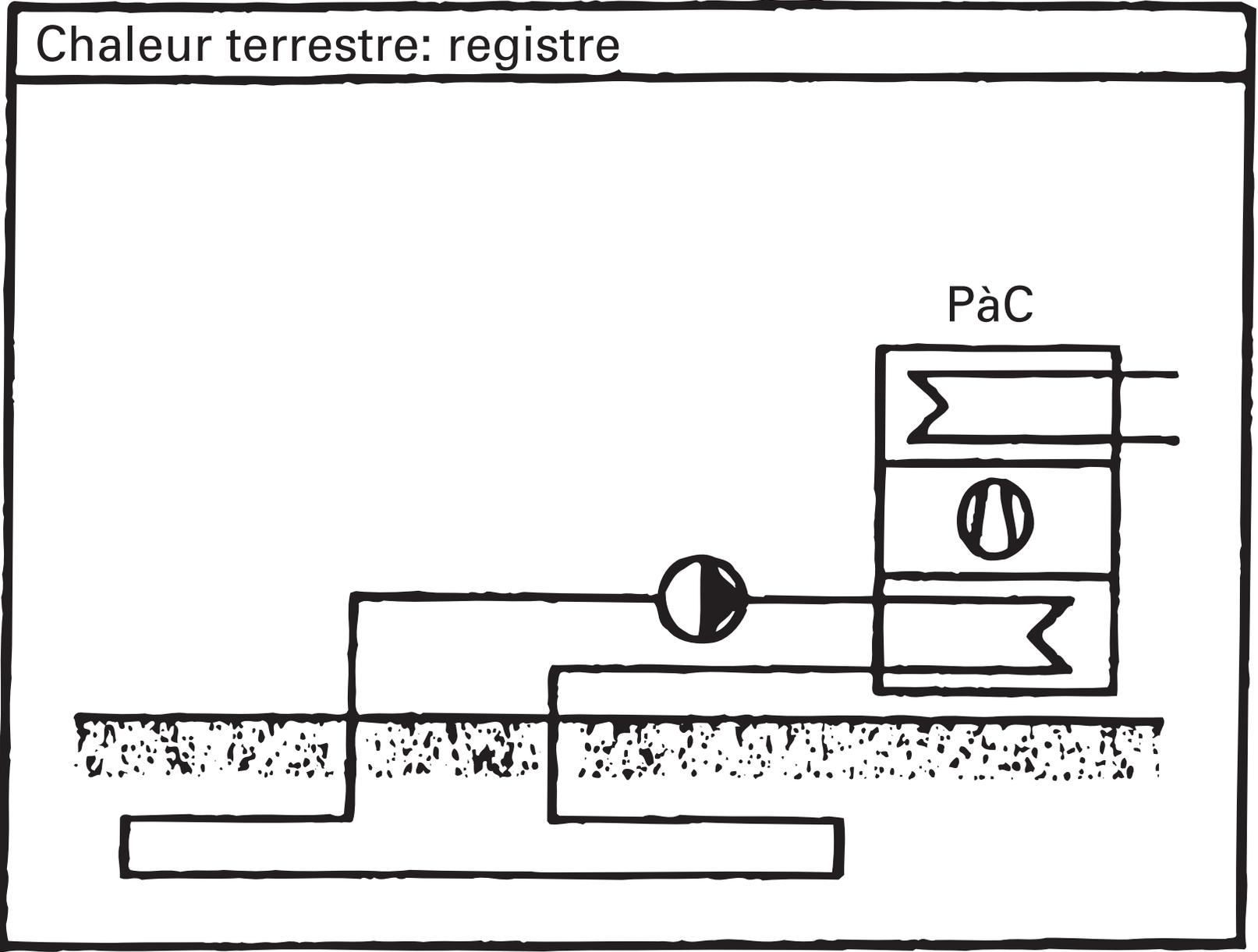


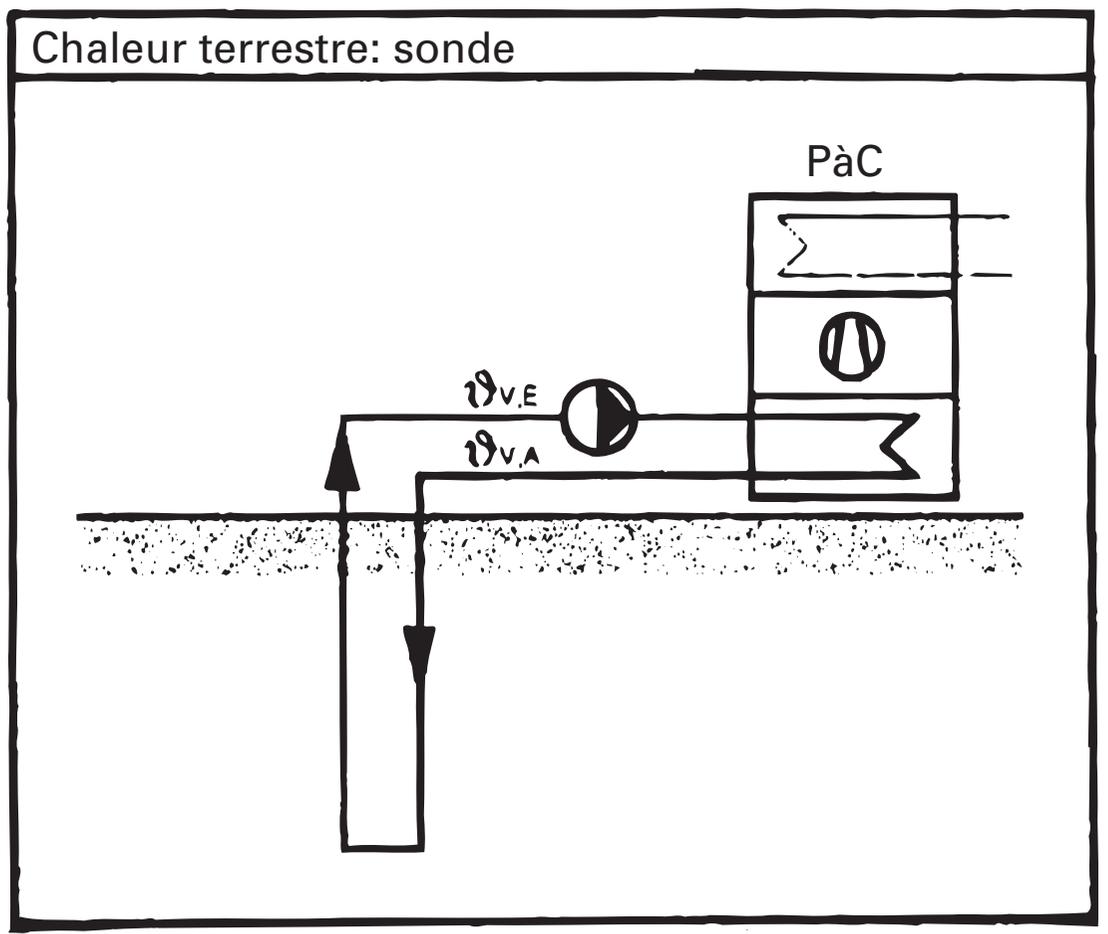
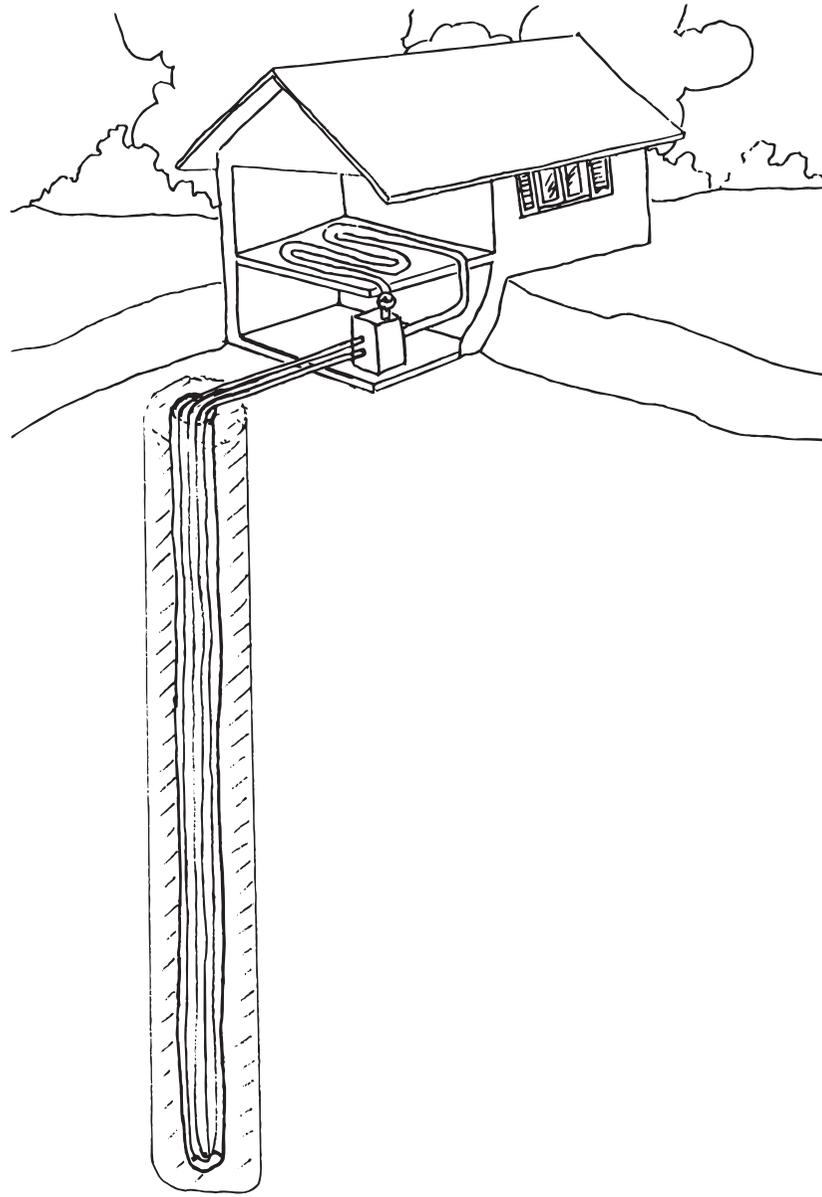












## Puissance nette

(énergie de dégivrage décomptée)

