

**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**

**SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL**

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

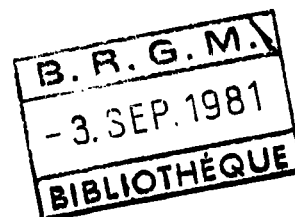
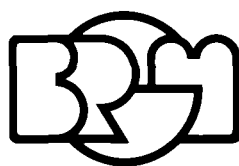
**CONFIDENTIEL**

# **LES POMPES A CHALEUR A MOTEUR THERMIQUE**

## **ADAPTATION A LA GÉOTHERMIE PROGRAMME DE CALCUL SIMPLIFIÉ**

par

A. CLOT - A. DESPLAN - J.C. FOUCHER - F. PIQUEMAL



**Département géothermie**

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

**80 SGN 605 GTH**

**Septembre 1980**

## S O M M A I R E

	<u>Page</u>
I - BREF RAPPEL SUR LES POMPES A CHALEUR	1
II - POMPES A CHALEUR A MOTEUR THERMIQUE	5
II.1. - Principe de fonctionnement	5
II.2. - Intérêt de la PAC à moteur thermique	5
II.2.1. - Rendement énergétique global	5
II.2.2. - Avantages techniques	7
III - INSTALLATION GEOTHERMIQUE FONCTIONNANT AVEC UNE PAC THERMIQUE	8
III.1. - Schéma d'une installation géothermique avec PAC thermique	8
III.2. - Equations de base des calculs - rappels	9
III.3. - Approche méthodologique	10
III.3.1. - Calculs pour les températures extérieures supérieures à la température de transition	11
III.3.2. - Calculs pour les températures extérieures inférieures à la température de transition	11
III.4. - Quelques règles générales d'approche avant calculs	14
IV - DESCRIPTION ET UTILISATION DES PROGRAMMES	15
IV.1. - Programme n° 1	15
IV.2. - Programme n° 2	15
IV.3. - Mode d'emploi du programme n° 1	15
IV.4. - Passage au programme n° 2	18
V - EXEMPLE D'APPLICATION	22
V.1. - Données de base	22
V.1.1. - Géologiques	22
V.1.2. - Météorologiques	23
V.2. - Approche	24
V.2.1. - Choix du débit géothermal DG	
V.3. - Bilan énergétique	24
V.4. - Bilan financier	30
V.5. - Conclusions	30

### BIBLIOGRAPHIE

## RESUME

-----

Ce travail réalisé sur fonds propres du B.R.G.M. a pour but d'exposer un programme de calcul permettant de déterminer rapidement la couverture des besoins en chauffage par la géothermie fonctionnant avec une pompe à chaleur à moteur thermique.

Après un bref rappel de notions générales sur les pompes à chaleur, nous avons exposé les hypothèses de base du programme et l'application sur un exemple concret. Ce programme simple, d'utilisation facile, peut, au stade d'un avant-projet sommaire, être utilisé pour situer l'intérêt du projet et permettre de décider s'il convient ou non d'engager plus en avant les études.

Ce programme ne tient pas compte d'une possibilité d'utilisation de l'eau géothermale en transfert direct.

## I - BREF RAPPEL SUR LES POMPES A CHALEUR

Nous nous contenterons de rappeler le principe, et les données de base (principe et aspect théorique) exposées dans le rapport 79 SGN 405 GTH.

### . Principe

Grâce à l'énergie mécanique on "pompe" des calories à une source à température modérée, pour les restituer à une température plus élevée au moyen d'un fluide de transfert. Un réfrigérateur est une pompe à chaleur (l'arrière d'un réfrigérateur dégage de la chaleur).

Dans la pompe à chaleur, le fluide frigorigène suit un cycle en 4 phases essentielles :

- . l'évaporation,
- . la compression,
- . la condensation,
- . la détente.

On évapore dans un premier temps un liquide à basse température dans un échangeur E : l'évaporateur, en lui fournissant une quantité de chaleur  $Q_1$ . Les liquides utilisés sont :

- . soit l'ammoniac pour les grosses installations comme celles de la Maison de la Radio,
- . soit des fréons (dérivés fluorés du méthane),
- . ou bien encore du butane,
- . ou de l'isobutane.

Le compresseur C aspire le gaz et le comprime en effectuant ainsi un travail  $W$ . Le gaz va s'échauffer et la température prise par ce gaz est celle à laquelle il aurait fallu le porter pour obtenir la pression sous laquelle il se trouve à volume constant, il sera d'autant plus chaud que le taux de compression sera élevé.

Le compresseur refoule ensuite ces vapeurs dans le condenseur K où elles se condensent. Cette condensation est faite en abandonnant la chaleur latente de vaporisation  $Q_2$ . Le liquide provenant de la condensation des vapeurs est renvoyé à l'évaporateur en passant par un organe de réglage (détendeur). Le liquide s'évapore à nouveau dans l'évaporateur E et le cycle recommence.

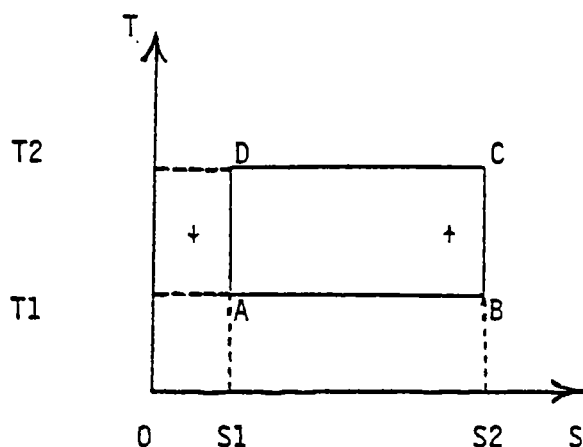
. Aspect théorique

Les états successifs d'un fluide frigorigène utilisé dans un système de réfrigération simple ou à inversion de cycle peuvent être représentés graphiquement sur différents diagrammes.

. Diagramme "Entropique" (ou diagramme T.S.)

L'entropie "S", c'est la quantité de chaleur reçue ou enlevée d'un fluide, sans modification de la température.

$$s = \int \frac{dQ}{T}$$



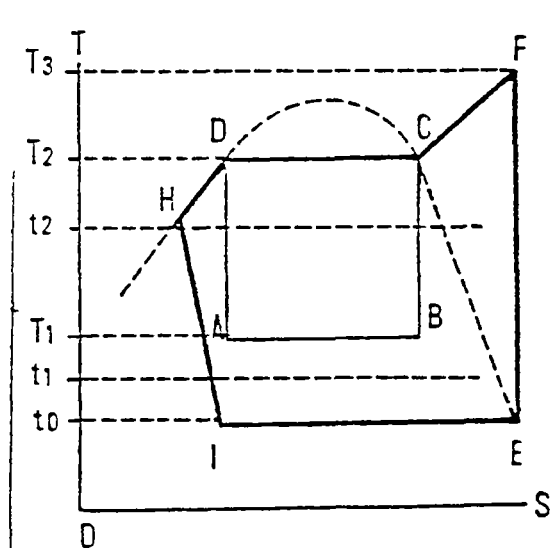
Sur ce diagramme, si la pompe à chaleur était parfaite et le fluide un gaz parfait, le cycle serait présenté par le rectangle A.B.C.D.

- AB : évaporation : absorption de la chaleur à la source froide
- BC : compression
- CD : condensation : cession de la chaleur à la source chaude
- DA : détente.

Un tel cycle s'appelle cycle de CARNOT ; ce cycle est d'une part réversible, et d'autre part c'est le plus économique que peut suivre une telle machine thermique.

. Diagramme réel de fonctionnement

La représentation en "diagramme entropique" du cycle suivi par un fluide frigorigène (par exemple le fréon 12) est :

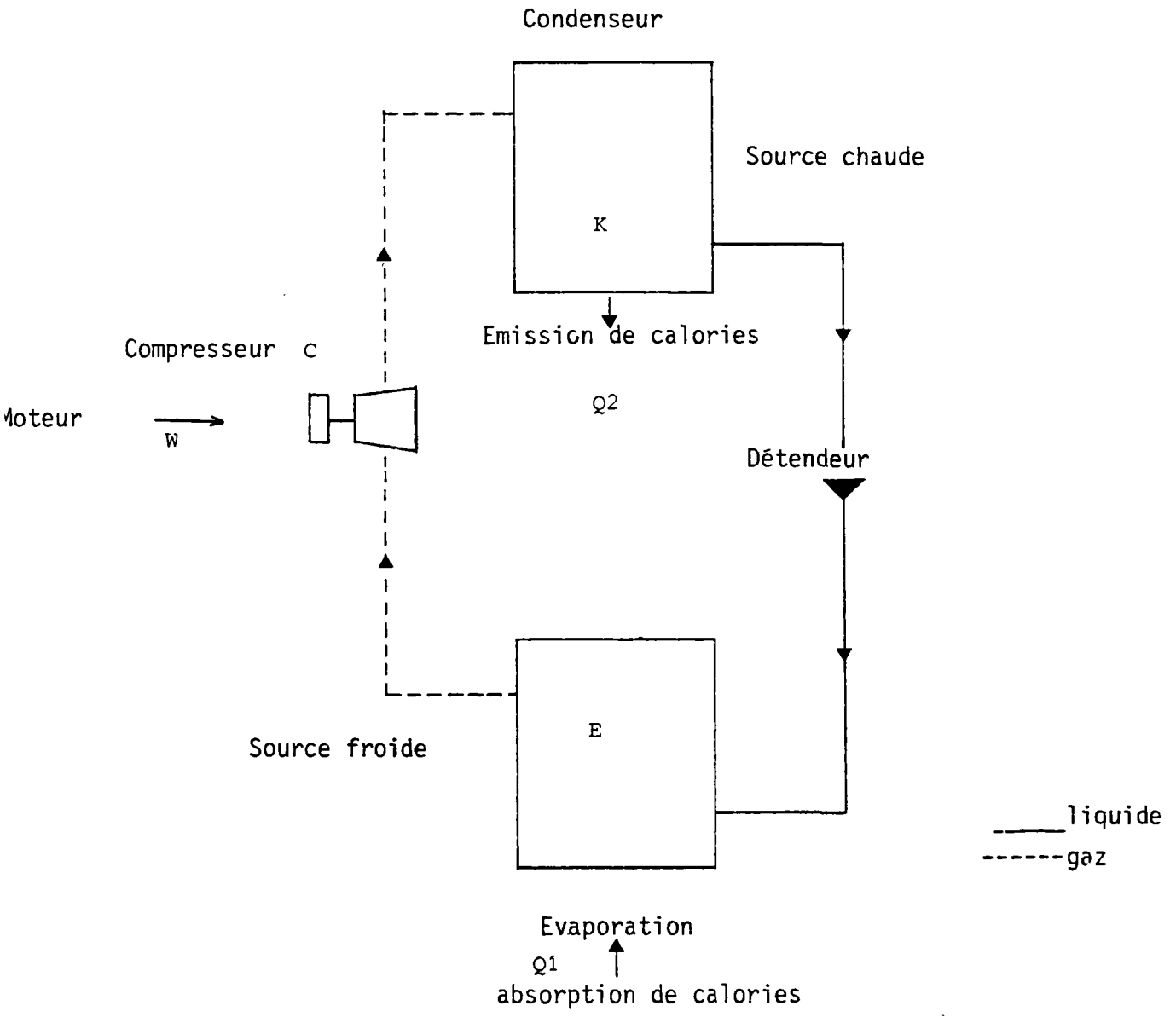


Le cycle de CARNOT correspondant est figuré par le rectangle A B C D compris entre les températures  $T_1$  et  $T_2$ . La courbe de saturation liquide-vapeur passe par les points C et D, et elle a la forme d'une courbe en cloche.

Le cycle réel décrit par le fluide dans la pompe à chaleur comporte :

- . une phase d'évaporation et d'aspiration IE dans l'évaporateur à la température  $t_0$ , inférieure aux températures  $t_1$  et  $T_1$ , de sortie et d'entrée de la source froide dans l'évaporateur. L'aspiration se faisant en vapeur sèche, son point figuratif est en E sur la courbe de saturation. (Une certaine différence de température est nécessaire dans l'évaporateur comme dans le condenseur entre la température du fluide de transfert et la source pour que les échanges de chaleur puissent se produire sans que l'on soit conduit à surdimensionner les appareils. C'est une cause importante de réduction du coefficient d'amplification par rapport au coefficient théorique de CARNOT).
- . Une phase de compression EF, pratiquement adiabatique, donc à entropie constante au cours de laquelle le fluide de transfert passe à l'état vapeur de  $t_0$  à  $T_3$  supérieure à  $T_2$ .
- . Une phase de condensation FCDE assez différente d'une isotherme, à partir du moment où le fluide, refoulé par le compresseur, traverse le condenseur, qui est parcouru en sens inverse par la "source chaude" évoluant entre  $t_2$  et  $T_2$ . Cette phase est représentée sensiblement par FCDE : suivant FC, le fluide à l'état de vapeur sèche cède de la chaleur ; de C en D, cette cession se poursuit à l'état de mélange liquide-vapeur ; suivant DE, un refroidissement final intervient en phase liquide jusqu'à une température intermédiaire entre  $T_2$  et  $t_2$ .
- . Une phase de détente imparfaitement adiabatique HI avec absorption de chaleur, donc une augmentation d'entropie à travers le robinet détenteur de la machine. Cette détente produit un brouillard liquide vapeur qui se condense à la température  $t_0$  en absorbant de la chaleur. Le fluide se trouve ainsi revenu à son état initial prêt à suivre un nouveau cycle de transformation.

Le travail fourni à la machine pour effectuer le cycle est égal à l'aire EFCDEI, aire qui apparaît beaucoup plus importante que celle du cycle de CARNOT ABCD.



SCHEMA 1 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE POMPE A CHALEUR

## II - LES POMPES A CHALEUR A MOTEUR THERMIQUE

### II.1. Principe de fonctionnement

Il est identique à celui des pompes à chaleur électriques, à la seule différence que le moteur qui entraîne le compresseur est un moteur thermique.

L'utilisation de ce type de moteur permet la récupération de l'énergie dissipée (chaleurs fatales) au niveau du système de refroidissement du moteur, des gaz d'échappement, et même du local de la pompe à chaleur.

Des échangeurs placés au niveau de ces parties du moteur sont directement couplés au circuit de chauffage (schéma 2).

### II.2. Intérêt de la pompe à chaleur à moteur thermique

#### II.2.1. Rendement énergétique global

- . Le rendement d'un moteur thermique est de l'ordre de 30 %, soit :

$$P_m = 0,3 P$$

avec :  $P_m$  = puissance motrice  
 $P$  = puissance chimique du combustible.

- . D'autre part, si l'on exprime par  $x$  le rapport de la puissance calorifique récupérable  $P_{cal}$  sur les chaleurs fatales, à la puissance motrice  $P_m$ , on obtient :

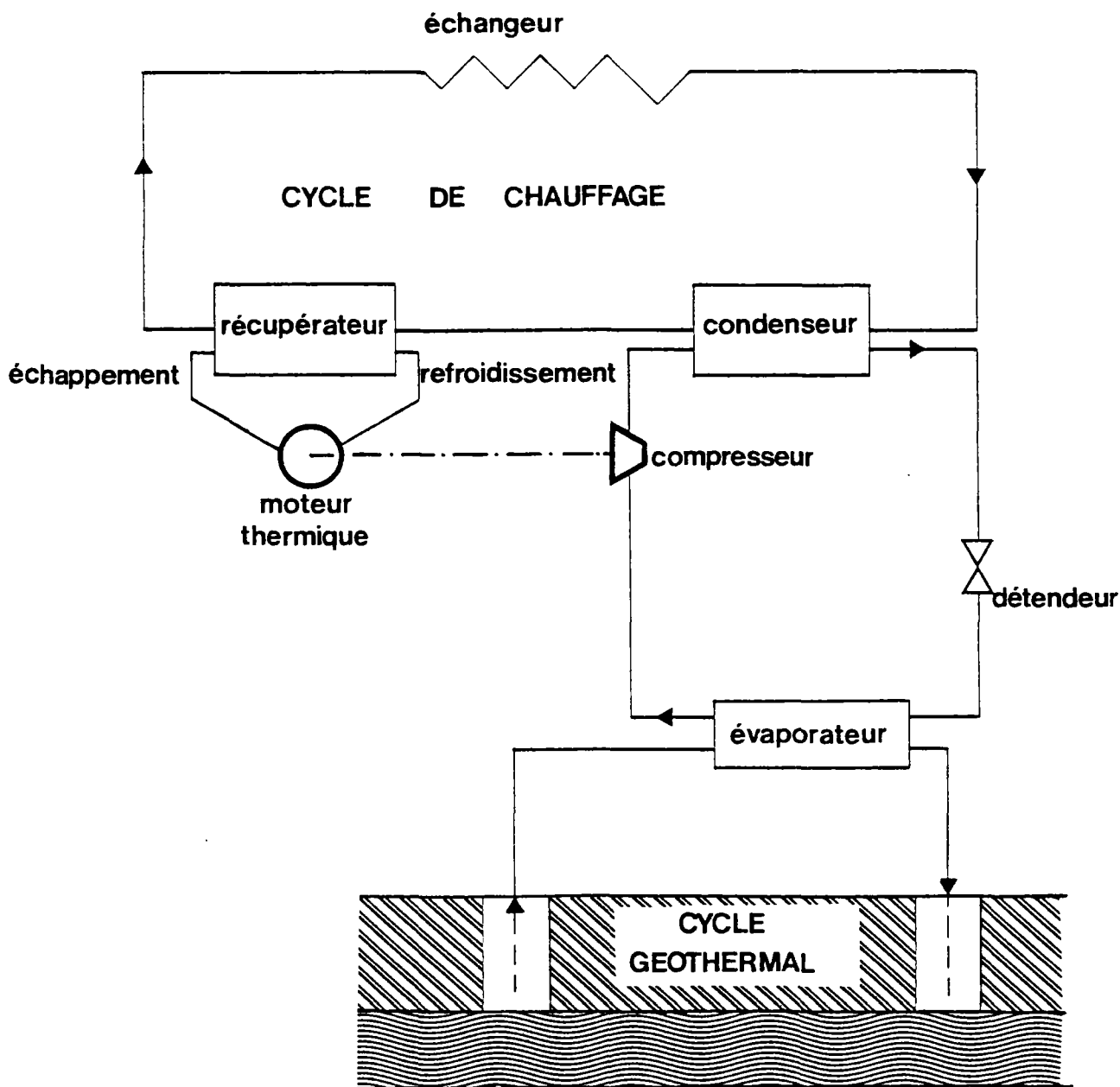
$$P_{cal} = x P_m.$$

La valeur moyenne de  $x$  utilisée dans les calculs ultérieurs est prise égale à  $5/3$  (communication "Renault"), soit :

$$P_{cal} = \frac{5}{3} P_m = 0,5 P.$$

Le coefficient de performance réel ( $COP_r$ ) étant le rapport de la puissance disponible au condenseur à la puissance mécanique fournie au compresseur de la pompe à chaleur, on obtient :

$$COP = \frac{P_{cond}}{P_m}$$



SCHEMA 2

BOUCLE GEOTHERMALE AVEC POMPE A CHALEUR A MOTEUR THERMIQUE

- . Ainsi, pour une pompe à chaleur (P.A.C.) thermique ayant un COP moyen de 4, pour 100 thermies "combustibles" fournies au moteur, on peut "récupérer" au total :

$$P_{\text{cond}} + P_{\text{cal}} = P_m \times \text{COP} + P_{\text{cal}} = P_m \left( 4 + \frac{5}{3} \right) = 100 \times 0,3 \left( 4 + \frac{5}{3} \right) =$$

170 thermies.

- . Dans le cas d'une P.A.C. électrique, en prenant comme rendement de centrale 33 % pour 100 thermies fournies à la centrale, avec le même COP de 4, on peut disposer au condenseur de :

$$(100 \times 0,33) \times 4 = \underline{132 \text{ thermies.}}$$

Rappelons que dans le cas d'un générateur classique (chaudière) ayant un rendement de 80 %, on dispose pour 100 thermies fournies au générateur de  $100 \times 0,8 = 80$  thermies, soit 2 fois moins que dans le cas de la P.A.C. thermique ci-dessus.

En schématisant et en ne considérant que le seul aspect énergétique :

- . la P.A.C. à moteur thermique est plus performante qu'un générateur classique dès lors que le COP est supérieur à 1 ;
- . la P.A.C. à moteur électrique doit avoir un COP supérieur à 2,4 pour être plus performante qu'un générateur classique.

### II.2.2. Avantages techniques

#### - Souplesse du moteur thermique

Il permet une plus grande modulation que le moteur électrique.

#### - Autonomie

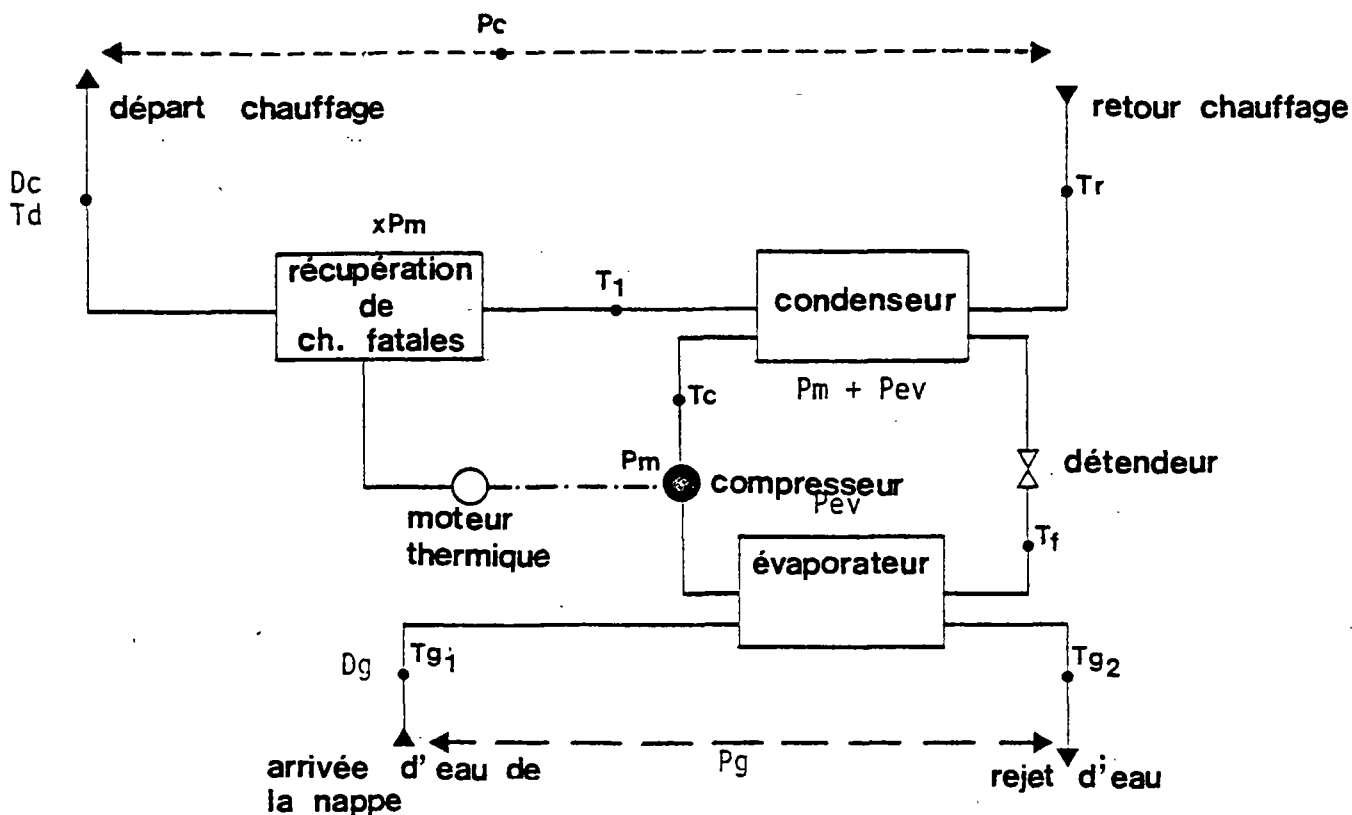
Le maître d'ouvrage d'une telle installation devient indépendant du réseau EDF, au moins pour le fonctionnement de ses P.A.C. (il peut même envisager de fonctionner en "énergie totale"... mais ce n'est pas le but de ce rapport).

Il n'est ainsi plus soumis aux variations du coût de l'électricité en fonction des périodes d'utilisation et notamment pendant les heures de pointe. Le bilan financier de l'opération de Creil, notamment, a montré l'intérêt d'arrêter les P.A.C. électriques pendant les heures de pointes, les économies dues à la production d'énergie calorifique complémentaire, liée aux P.A.C., ne compensant pas le surcoût électrique pendant ces périodes.

III - INSTALLATION GEOTHERMIQUE FONCTIONNANT AVEC UNE P.A.C. THERMIQUE :

HYPOTHESES DE BASE

III.1. Schéma d'une installation géothermique avec P.A.C. thermique



Les paramètres utilisés sont :

- . Tg1 : Température de l'eau géothermale à la production (donnée connue)
- . Tg2 : Température de l'eau géothermale à la réinjection
- . Tf : Température du fluide frigorigène de la pompe à chaleur après le détendeur
- . Tc : Température du fluide frigorigène de la pompe à chaleur après le compresseur
- . Tr : Température de retour du chauffage (connu : cf régulation)
- . Td : Température de départ vers le chauffage (connu : cf régulation)
- . T1 : Température du fluide de chauffage à la sortie du condenseur
- . Dg : Débit d'eau géothermale (connu)
- . Dc : Débit du circuit de chauffage (connu)
- . Pg : Puissance géothermale :  $Dg (Tg1 - Tg2)$
- . Pm : Puissance motrice
- . Pc : Puissance de chauffe (fonction des conditions climatiques : connue)
- . Pev : Puissance disponible à l'évaporateur = Pg
- . x : Rapport de la puissance calorifique récupérable à la puissance mécanique du moteur :  $\frac{P_{cal}}{Pm}$

### III.2. Equations de base des calculs - rappels

- COP théorique :  $COP_{th} = \frac{\theta_c}{\theta_c - \theta_f}$

avec  $\theta_c$  : température absolue, d'entrée du fluide frigorigène dans le condenseur =  $T_c + 273^\circ C$ .

- COP réel :  $\frac{P_{con}}{Pm} = \frac{Dc(Td - Tr) - x Pm}{Pm}$  (1)

$$= \rho \frac{\theta_c}{\theta_c - \theta_f} = \rho \frac{T_c + 273}{T_c - T_f}$$

$$= \rho \frac{T_1 + \delta + 273}{T_1 - T_{g2} + 2 \delta} = \rho \frac{T_d - \frac{x P_m}{D_c} + \delta + 273}{T_d - x \frac{P_m}{D_c} - T_{g2} + 2 \delta}$$
 (2)

Avec  $\rho$  : rendement de la pompe à chaleur

$\delta$  : pincement sur l'évaporateur et le condenseur

$$(T_c = T_1 + \delta \quad ; \quad T_f = T_{g2} - \delta)$$

- Le principe de la conservation d'énergie permet d'écrire :

$$D_c (T_d - T_r) = D_g (T_{g1} - T_{g2}) + P_m (1 + x) \quad (3)$$

- On suppose connus :

- . les ressources géothermiques :  $T_{g1}$  et  $D_g$
- . les régulations en chauffage :  $T_d$  et  $T_r$  en fonction de la température extérieure  $T_{ex}$  (chacune définie par ses valeurs respectives pour la température de base et la température de non chauffe ;
- . le débit du réseau de chauffage, déterminé par le rapport de la puissance maximale appelée (pour la température de base) à la différence  $T_d - T_r$  (pour cette même température de base) ;
- . les valeurs de  $\rho$ ,  $\delta$  et  $x$ , dépendant en partie de l'installation mais que l'on peut en première approximation (c'est ce que l'on a fait dans l'exemple qui suit) prendre respectivement égaux à :

$$\rho = 0,65$$

$$\delta = 5^\circ\text{C}$$

$$x = 5/3$$

Ces valeurs peuvent être modifiées à la demande dans le programme.

Nous avons ainsi un système à 3 équations (1), (2), (3) avec 3 inconnues  $T_{g2}$ ,  $P_m$  et COP réel, pouvant être résolu.

### III.3. Approche méthodologique

On peut utiliser le programme en essayant de fournir la totalité des besoins à partir du système géothermie + pompe à chaleur. Cependant, cela conduit (en négligeant de toute façon les éventuelles impossibilités techniques -température de rejet trop basse, débit géothermal limité-), à augmenter très fortement la puissance, donc le coût de la P.A.C. par rapport à une solution -plus intéressante économiquement- qui permettrait de fournir une grande partie des besoins (70 à 80%) tout en limitant la puissance de la pompe à chaleur (30 à 40 % de la puissance maximale appelée disponible au condenseur).

Ces ratios (70 à 80 % d'un côté pour les besoins, 30 à 40 % de l'autre pour la puissance) dépendent essentiellement de la courbe monotone des températures moyennes journalières qui montre que la fréquence d'apparition des températures extérieures les plus basses -correspondant aux puissances appelées les plus élevées- est faible (quelques heures dans l'année).

Cela conduit ainsi à définir la température de transition ou valeur de la température extérieure au-dessus de laquelle le système géothermie + P.A.C. fournit tous les besoins et en-dessous de laquelle il n'en fournit qu'une partie.

### III.3.1. Calculs pour les températures extérieures supérieures à la température de transition

L'utilisation du programme (décrit plus loin) permet de calculer pour chaque température extérieure les conditions de fonctionnement de la P.A.C., à savoir :

- . température de rejet Tg2
- . COP réel
- . Pm.

On peut alors calculer l'énergie fournie par le système (= à l'énergie appelée =  $\sum P_{ci} \times h_i$ ) et l'énergie consommée par le moteur de la pompe à chaleur :

$$\sum \left( \frac{P_{mi} \times h_i}{0,3} \right).$$

### III.3.2. Calculs pour les températures extérieures inférieures à la température de transition

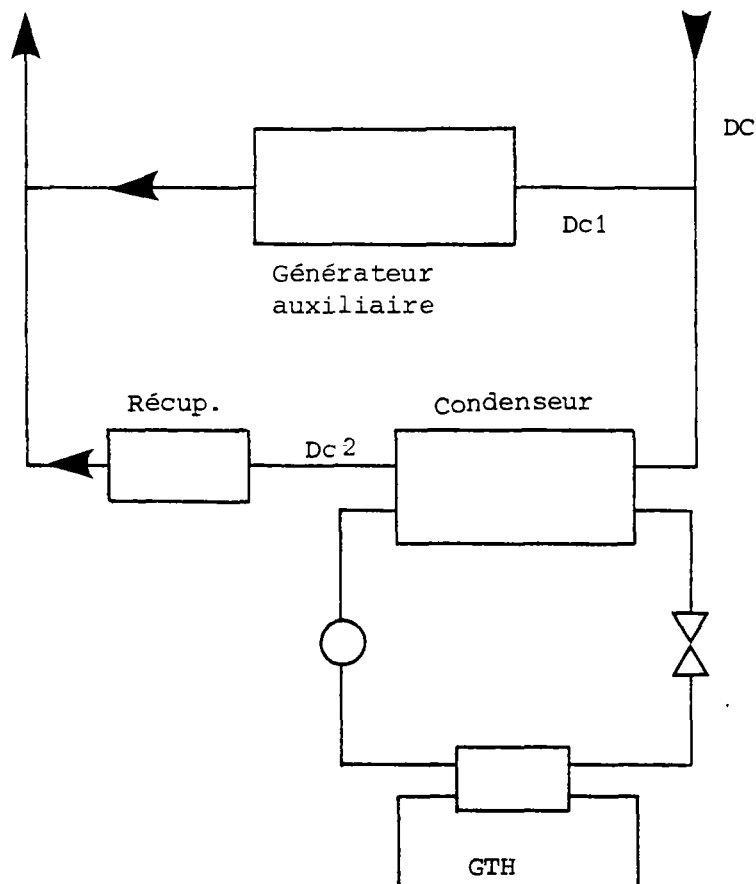
Le système P.A.C. + récupération ne fournit plus qu'une partie de l'énergie appelée. Deux hypothèses sont alors possibles pour les calculs :

- . travailler à puissance P.A.C. + récupération constante et égale à celle correspondant à la température de transition ;
- . travailler à puissance motrice Pm constante (et égale à celle observée pour la température de transition).

On constatera dans l'exemple exposé plus loin que les besoins fournis sont légèrement supérieurs dans l'hypothèse 1 mais que cela conduit à largement augmenter les investissements P.A.C. En effet, la P.A.C. travaillant moins bien, la diminution du COP liée à l'augmentation des températures du chauffage conduit à augmenter la puissance motrice Pm de la P.A.C. et donc l'investissement. Globalement, les besoins supplémentaires ne compensent pas le surcoût d'investissement.

III.3.21. Calculs à puissance P.A.C. + récupération constante

Pour pouvoir continuer à utiliser le même programme qu'en III.3.1., on suppose qu'on a le schéma suivant où une partie du débit total de chauffage  $D_c$  alimente la P.A.C. ( $D_{c2}$ ), l'autre partie alimentant un générateur auxiliaire qui fournit l'appoint. Le système P.A.C. + récupération ne fournit plus alors qu'une partie du débit nécessaire ( $D_{c2}$ ) mais à la température voulue.

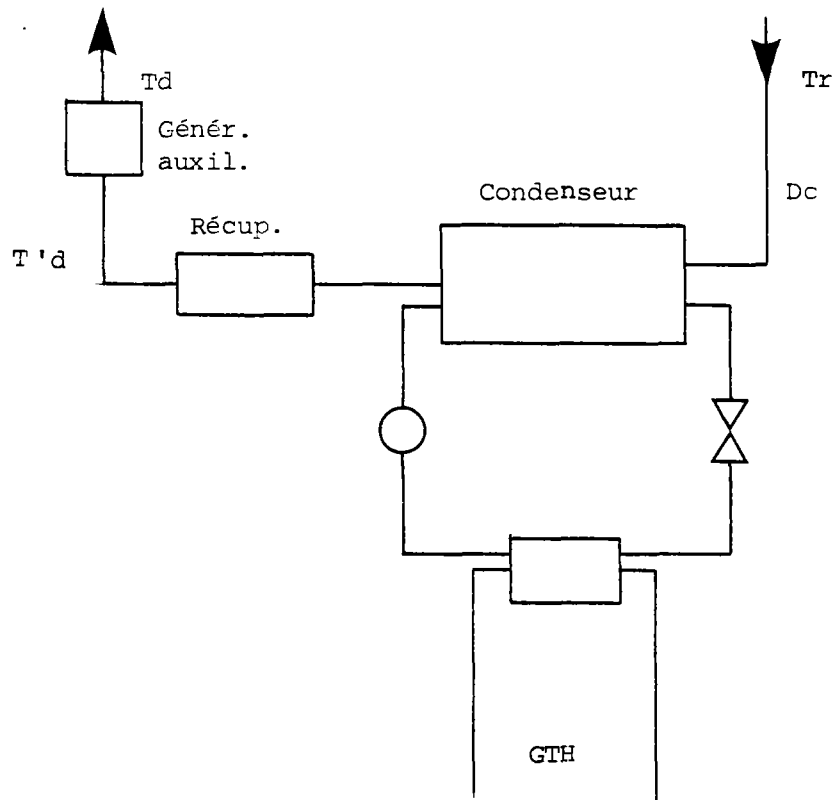


Les paramètres inconnus sont les mêmes qu'en III.3.1. ; cependant, il faut calculer pour chaque température extérieure le débit  $D_{c2}$  à prendre en compte (fait par le programme) :

$$\frac{\text{Puissance P.A.C. + Récupération constante}}{T_{di} - T_{ri}}$$

III.5.22 . Calculs à puissance motrice constante

Cette régulation correspond au schéma suivant :



La totalité du débit  $D_c$  passe par le condenseur. Le programme se trouve modifié comme suit :

- $P_m$  n'est plus une inconnue : valeur égale à celle calculée pour la température de transition ;
- la température à la sortie de l'échangeur de récupération, appelons-la  $T'd$ , devient une inconnue du système.

### III.4. Quelques règles générales d'approche avant calculs

Nous avons considéré dans les paragraphes précédents le débit géothermal comme une donnée du système. C'est inexact puisqu'il s'accompagne généralement d'une puissance de pompage nécessaire pour obtenir ce débit (systématiquement dans le cas d'un doublet). On peut en fait jouer plus ou moins sur ce débit (l'augmenter par exemple, en augmentant la puissance de pompage, ou le diminuer suivant l'intérêt du système : il peut ainsi être plus intéressant d'essayer d'abaisser les températures de rejet, au détriment d'un COP plus faible, pour diminuer le débit géothermique s'il est obtenu avec une puissance de pompage élevée, ou inversement.

On peut donc proposer, à ce stade, les règles suivantes :

- . limiter de toute façon la puissance maximale (P.A.C. + récupération), correspondant à la température de transition, à la moitié de la puissance maximale appelée. Ceci correspond (pour un COP moyen de 4,5) à une puissance à l'évaporateur inférieure à  $0,3 P_{\max}$

$$P_{ev} \leq 0,3 P_{\max}$$

- . limiter de toute façon les frais de consommation électrique de pompage du réseau géothermique au maximum à 10 % du coût de l'énergie totale consommée par le chauffage (avant utilisation de la géothermie et de pompes à chaleur). Faire un calcul sur 4000 heures. Par exemple si les dépenses en énergie primaire du réseau de chauffage sur lequel porte l'étude se montent annuellement à 2 MF, on limitera dans les calculs le débit de façon à ne pas avoir plus de 200000 F de frais de pompage, soit sur 4000 heures avec 0,25 F/kWh 200 kW

Les caractéristiques d'exploitation (débit / puissance) du forage devraient permettre de déterminer le débit maximum (cf. graphique  $P = f(Q)$ , § V.1.1.).

- . limiter la température minimale de rejet à 5°C.
- . quand les puissances de pompage sont faibles(ou nulles, débit artésien, puits unique), essayer de privilégier le COP (augmentation de la température de rejet, compensée par augmentation du débit). La température de rejet est cependant à limiter pour éviter les "pollutions thermiques".

#### IV - DESCRIPTION ET UTILISATION DES PROGRAMMES

Ces programmes ont été écrits pour être utilisés sur une calculatrice TEXAS INSTRUMENT 59.

Les limites de capacité de mémoire ont imposé de faire deux programmes différents, pour les deux types de modulation possibles.

##### IV.1. Programme n° 1

Il est utilisable quelle que soit la température extérieure ; lorsque  $T_{ex} < T_{temp. \text{ de transition}}$ , le programme n° 1 poursuit les calculs selon le schéma exposé en III.3.2.1 c'est-à-dire : puissance fournie (PAC + Récup.) constante.

##### IV.2. Programme n° 2

Il n'est utilisable que pour  $T_{ex} < T_{temp. \text{ de transition}}$ . Ce programme fonctionne pour  $P_m$  constant.

##### IV.3. Mode d'emploi du programme n° 1

(voir tableau page suivante).

SEQUENCE	PROCEDURE	INTRODUIRE	APPUYER	AFFICHAGE	
				Calculatrice	Imprimante
1	Effacer les mémoires et les registres		2nd CP 2nd CMS	0	
2	Agencer la répartition nécessaire....	2	2nd OP 17 CLR	799 - 19 0	
3	Lecture carte 1 côté 1.....		CLR	1 0	
	Lecture carte 1 côté 2.....		CLR	2 0	
	Lecture carte 2 côté 3.....		CLR	3 0	
	Lecture carte 2 côté 4.....		CLR	4 0	
4 (facultative)	Introduction des données (en cas de modification)				
	Coefficient $\rho$ . par ex. 0,65.....	Valeur de $\rho$	GTO $x^2$ R/S		Valeur X
	Coefficient $x$ . par ex. 5/3.....	Valeur de $x$	GTO $\sqrt{x}$ R/S		Valeur Y
	Coefficient $\delta$ . par ex. 5°.....	Valeur de $\delta$	GTO $\frac{1}{x}$ R/S		Valeur Z
5	Température départ de base.....	TDB	2nd A	T D B	Valeur TDB
	Température retour de base.....	TRB	2nd B	T RB-TDB	Valeur TRB
	Puissance de base (Puiss. Maximum)...	PB	2nd C	PB	Valeur PB
	Température de non chauffe.....	TNC	2nd D	TNC	Valeur TNC
	Température de base (T. minimum).....	TB	2nd E	- (TNC - TB)	Valeur TB
	Puissance P.A.C.....	PPAC	A	PPAC	
	Température de production.....	TG1	B	TG1	Valeur TG1
	Débit géothermal.....	DG	C	DG	Valeur DG
	Température extérieure.....	TEX	D		Valeur TEX
					Valeur PA
				Valeur PPAC	
				Valeur PF	
				Valeur TD	
				Valeur DC	
				Valeur DC	
6	Démarrage calcul		E		Valeur PM
					Valeur COP
				TG2	Valeur TG2

Les valeurs couramment utilisées sont :

$\rho$  : 0,65  
x : 5/3  
 $\delta$  : 5°C

Elles sont automatiquement prises en compte dès l'introduction des cartes magnétiques. On peut donc passer directement à la séquence 5.

Néanmoins, il est possible de modifier ces valeurs en suivant les instructions données.

### REMARQUES

Complément sur les symboles utilisés :

PA : Puissance appelée  
PPAC : Puissance de la pompe à chaleur  
PF : Puissance fournie  
TD : Température de départ  
TR : Température de retour  
DC : Débit du circuit de chauffage  
PM : Puissance mécanique du moteur  
COP : Coefficient de performance de la pompe à chaleur  
TG2 : Température de rejet de l'eau géothermale.

Unités :

Les puissances sont exprimées en thermies/heure, ou en kW (mais homogénéité à respecter)  
Les débits sont exprimés en mètre cube/heure.  
Les températures sont exprimées en degré Celsius.

Changement de données :

Il est possible à tout moment (sauf pendant l'exécution du programme) de changer une ou plusieurs données. Les données peuvent être introduites dans n'importe quel ordre, sauf :

- . TDB sera toujours introduit avant TRB.
- . TNC sera toujours introduit avant TB.
- . TEX sera toujours introduit en dernier.

Si TRB ou TB sont introduits en second lieu, les tests de validité seront effectués avec les anciennes valeurs de TDB ou TNC (ou tout simplement avec  $\emptyset$  si aucune valeur n'a préalablement été introduite). L'introduction de TEX déclenche une partie des calculs ; il est donc indispensable d'avoir introduit tous les autres paramètres avant TEX.

Utilisation normale du programme :

La séquence 5 (sauf TEX) étant introduite, il n'est plus nécessaire d'y revenir.

Pour chaque nouvelle valeur de TEX, il suffira de réintroduire cette valeur et d'effectuer ensuite la séquence 6. On obtiendra ainsi les conditions de fonctionnement (avec les mêmes données) en fonction de la température extérieure.

Tests de validité :

L'inscription "PDS" (pas de solution) apparaîtra :

. lors d'une mauvaise introduction de données :

TDB < TRB

TNC < TB

TNC < TEX

. Si au cours du programme :

. le discriminant de l'équation du second degré est négatif,

.  $TG2 > TG1$ .

Il est recommandé après la lecture des cartes magnétiques de vérifier si elles sont bien enregistrées dans la calculatrice. Pour cela, il suffit de faire l'exemple proposé et de vérifier les résultats.

#### IV.4. Passage au programme n° 2

Les données nécessaires à ce programme sont, entre autre :

. température de transition TTR

. puissance mécanique PM à TTR.

C'est grâce au programme n° 1 que ces valeurs sont déterminées.

SEQUENCE	PROCEDURE	INTRODUIRE	APPUYER	AFFICHAGE	
				Calculatrice	Imprimante
5 Bis	Calcul de la température de transition		GTO 769 R/S	DC	Valeur TTR Valeur PA Valeur PPAC Valeur PF Valeur TD Valeur TR Valeur DC
6	Démarrage calcul		E	TG2	Valeur PM Valeur COP Valeur TG2

SEQUENCE	PROCEDURE	INTRODUIRE	APPUYER	AFFICHAGE	
				Calculatrice	Imprimante
1	Effacer les mémoires et les registres.....		2nd CMS 2nd CP	0 0	
2	Agencer la répartition nécessaire.....	2	2nd OP 17 CLR	799 - 19 0	
3	Lecture carte 1 côté 1.....		CLR	1 0	
	Lecture carte 1 côté 2.....		CLR	2 0	
	Lecture carte 2 côté 3.....		CLR	3 0	
	Lecture carte 2 côté 4.....		CLR	4 0	
4 (facultative)	Introduction des données (en cas de modification)				
	Coefficient $\rho$ .....	$\rho$	GTO $x^2$ R/S		Valeur X
	Coefficient $x$ .....	$x$	GTO $\sqrt{x}$ R/S	$x$	Valeur Y
	Coefficient $\delta$ .....	$\delta$	GTO $\frac{1}{x}$ R/S		Valeur Z
5	Débit circuit de chauffage.....	DC	GTO $y^x$ R/S	DC	Valeur DC
	Température retour de base.....	TRB	2nd A	TAB	Valeur TRB
	Puissance de base (puissance maximum).....	PB	2nd B	PB	Valeur PB
	Température de base ( minimum).....	TB	2nd C	TB	Valeur TB
	Température de non chauffe.....	TNC	2nd D	TB - TNC	Valeur TNC
	Température de transition.....	TTR	2nd E	TTR	Valeur TTR
	Température extérieure.....	TEX	A	TR	Valeur TEX
	Puissance mécanique.....	PM	B	PV	Valeur PM
	Température de production.....	TG1	C	TG1	Valeur TG1
	Débit géothermal.....	DG	D	DG	Valeur DG
6	Démarrage programme.....	E			Valeur PA
					Valeur TR
					Valeur TD
					Valeur TG2
					Valeur PF
					Valeur COP

REMARQUES

TTR, DC, PM ont été déterminés par le programme n° 1  
 Les unités sont les mêmes que pour le programme n° 1  
 Introduire TB avant TNC  
 Pour chaque nouvelle valeur de TEX, réintroduire cette valeur en appuyant sur A, puis ensuite sur E.  
 Les valeurs de TRB, PB, TG, TNC, TG1 et DG seront évidemment identiques dans les deux programmes.

## REMARQUES

Changement de données :

Il est possible à tout moment (sauf pendant l'exécution du programme) de changer une ou plusieurs valeurs.

Les données peuvent être introduites dans n'importe quel ordre sauf :

. TB sera toujours introduit avant TNC.

Si TB est introduit en second lieu, le test de validité sera effectué soit avec  $\emptyset$  (si aucune valeur n'a préalablement été introduite) soit avec l'ancienne valeur de TNC.

Cohérence des données :

Les valeurs TTR, DC et PM sont obtenues grâce au programme n° 1.

Pour qu'une comparaison soit possible entre les deux programmes, il est indispensable de réintroduire les mêmes valeurs des paramètres.

Test de validité :

L'inscription PDS apparaîtra :

. lors d'une mauvaise introduction de données

TB > TNC

TTR < TEX

. si au cours du programme :

Le discriminant de l'équation du second degré est négatif ;

TD < TR

TG1 < TG2

Utilisation normale du programme :

Une fois tous les paramètres introduits, il suffit d'appuyer sur E pour démarrer le programme.

Pour chaque nouvelle valeur de TEX, réintroduire celle-ci puis appuyer ensuite sur E.

On obtient ainsi les conditions de fonctionnement (avec les mêmes données) en fonction de la température extérieure.

V - EXEMPLE D'APPLICATION

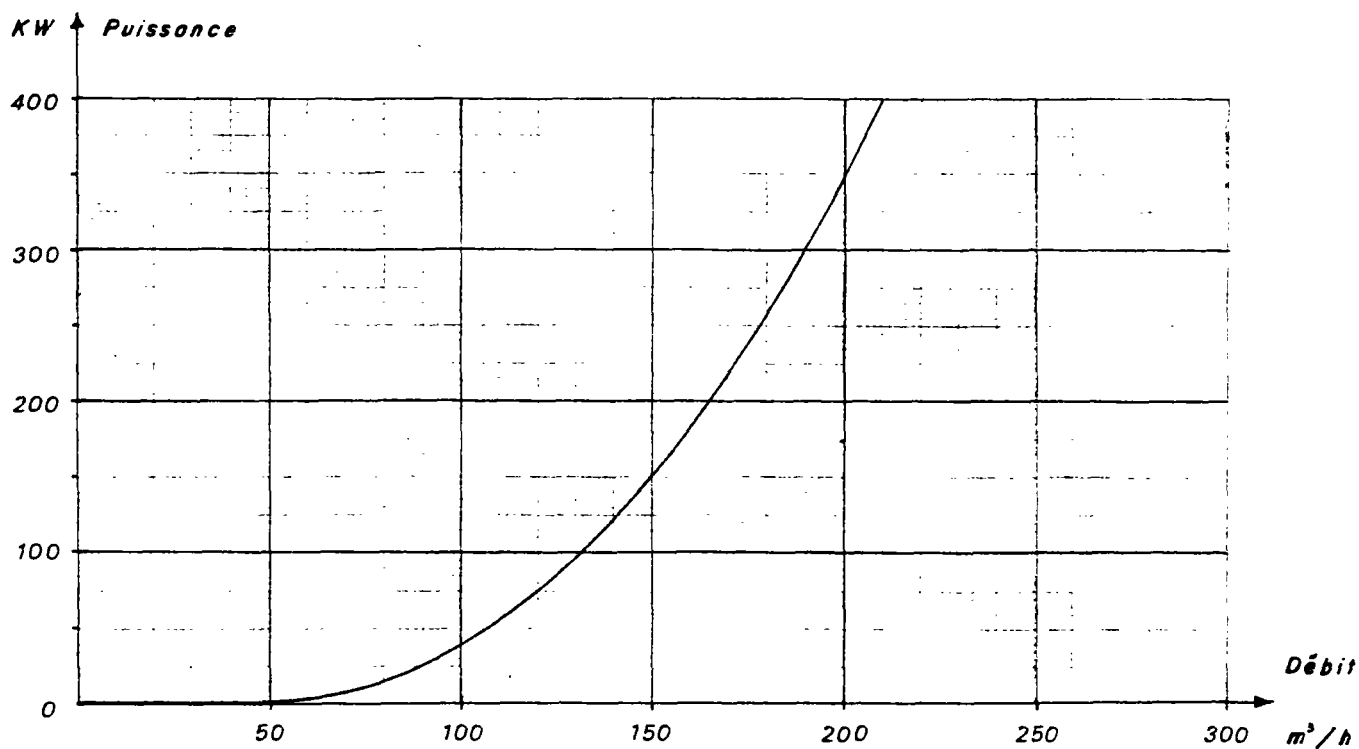
V.1. Données de base

V.1.1. Géologiques

L'étude porte sur l'exploitation d'un réservoir de caractéristiques suivantes :

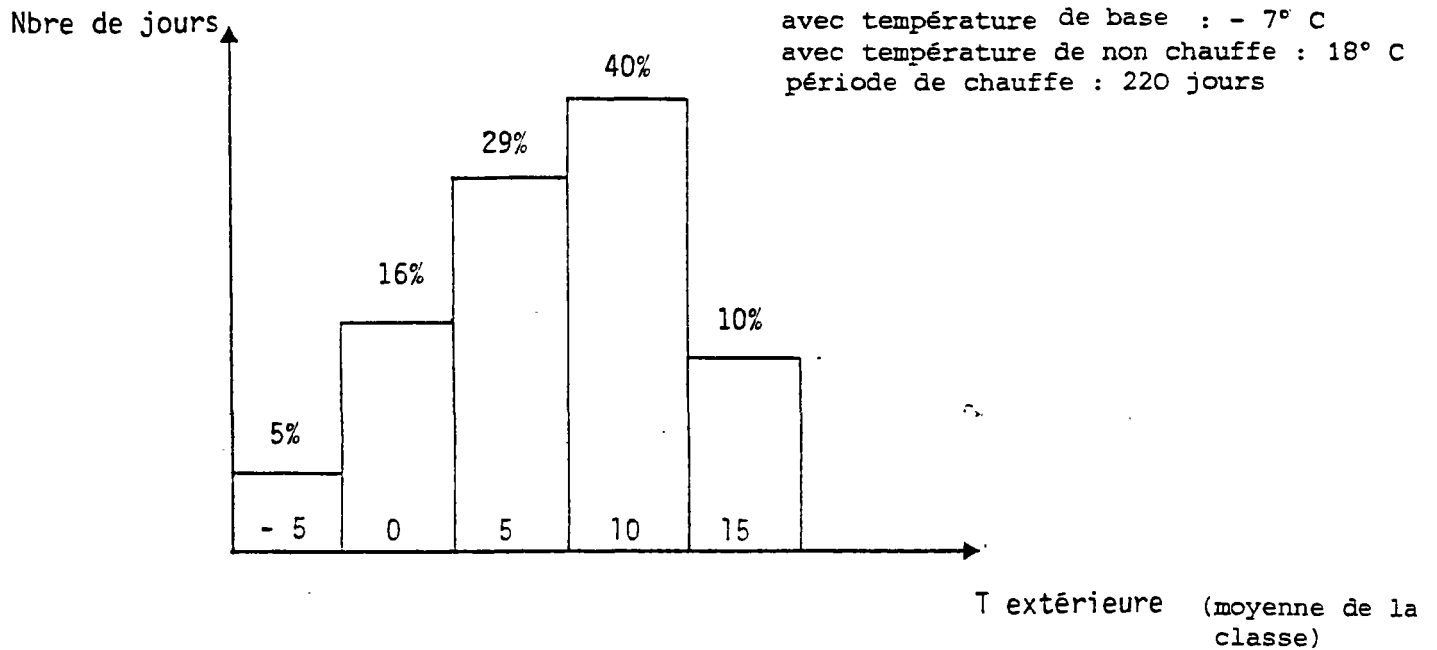
- . température : 32°C
- . débit (dépend des caractéristiques du réservoir : cf. graphique ci-dessous)

**PUITS DE PRODUCTION**



V.1.2. Météorologiques

L'histogramme des fréquences des températures moyennes pris en compte est le suivant (pour simplifier on a pris les moyennes de 5 en 5°C)



V.1.3. Besoins

La puissance maximale (pour -7°C) est 6 440 thermies/h.

Les besoins annuels sont de 15303 Kth soit environ 1.500 KF

Régulation :

- . température de départ (pour -7°C) : 70°C
- . température de retour (pour -7°C) : 50°C

## V.2. Approche

### V.2.1. Choix du débit géothermal DG

V.2.1.1 *La puissance évaporateur maximale sera limitée*

(cf. § III.4) à  $0,3 \times P. \text{ max}$  appelée soit  $0,3 \times 6440 = 1930 \text{ th/h}$

La température de rejet minimale sera de  $5^\circ$  (cf. § III.4) d'ou  $\Delta T \text{ max} = 32 - 5 = 27^\circ \text{C}$

soit  $D_G \frac{1930}{27} = 71 \text{ m}^3/\text{h}$

### V.2.1. *Puissance de pompage maximale*

Le coût de la consommation électrique (cf. § III.4) sera limité à 10 % du coût des besoins annuels soit :

$$1500 \text{ KF} \times 0,1 = 150 \text{ KF}$$

soit pour 4000 heures de fonctionnement à 0,25 F/kW une puissance maximale de

$$\frac{150000}{4000 \times 0,25} = 150 \text{ kW}$$

Il faudra donc :

$$D_G \quad 150 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{cf graphique } \S \text{ V.1.1.})$$

Dans l'exemple suivant il a été choisi un débit de 100 m<sup>3</sup>/h

### V.2.2. *Choix de la puissance de la PAC*

On la limitera (cf. § III.3.) à 40 % de la puissance maximale appelée soit environ 2500 th/h

## V.3. Bilan énergétique

- Tableau A

*Utilisation du programme 1 : la puissance fournie par la PAC reste constante en dessous de la température de transition TTR (8,3 °C cf. 5 bis du prog. n° 1*

- Tableau B

*Utilisation du programme 2 : résultats à puissance motrice constante en dessous de la température de transition.*

		T.EX (°C)	- 5° ± 2,5	0° ± 2,5°	+ 5° ± 2,5	+ 10° ± 2,5	+15°±2,5	TOTAL
Données météo :		1 Nb d'heures	264	840	1512	2112	552	5280
RESULTATS	2 - Puissance appelée PA (Th/h) (moyenne pour la tranche θ)		5925	4637	3349	2061	773	
	3 - Puissance fournie (Th/h)		2500	2500	2500	2061	773	
	4 - Puissance motrice (Th/h)		426	388	345	227	38	
	5 - Température de rejet (°C)		18,4	17,3	16,2	17,4	25,3	
	6 - Energie totale appelée (kth) $1 \times 2 \times 10^{-3}$		1564	3895	5064	4353	427	15303
BILAN	7 - Energie fournie par la PAC (kth) $1 \times 3 \times 10^{-3}$		660	2100	3780	4353	427	11320
	8 - Appoint nécessaire (Kth) 6 - 7		904	1795	1284	0	0	3983
	9 - Energie consommée par la PAC (Kth) $4 \times 1 \times \frac{10^{-3}}{0,3}$		375	1086	1739	1598	70	4868
	10 - Energie totale consommée Kth 8 + 9		1279	2881	3023	1598	70	8851

70.	TDB
50.	TRB
6440.	PB
18.	TNC
-7.	TB
32.	TG1
100.	DG
-5.	TEX
5924.8	PA
2500.	PPAC
2500.	PF
66.	TD
47.6	TR
135.6695652	DC
426.0405097	PM
4.201319928	COP
18.36108026	TG2

15.	TEX
772.8	PA
2500.	PPAC
772.8	PF
26.	TD
23.6	TR
322.	DC
37.82404033	PM
18.76478363	COP
25.28064108	TG2

0.	TEX
4636.8	PA
2500.	PPAC
2500.	PF
56.	TD
41.6	TR
173.6111111	DC
387.9213874	PM
4.777938042	COP
17.34457033	TG2

8.295031056	TTR
2500.	PA
2500.	PPAC
2500.	PF
39.40993789	TD
31.64596273	TR
322.	DC
312.800787	PM
6.325640591	COP
15.34135432	TG2

5.	TEX
3348.8	PA
2500.	PPAC
2500.	PF
46.	TD
35.6	TR
240.3846154	DC
344.6706074	PM
5.586635315	COP
16.1912162	TG2

10.	TEX
2060.8	PA
2500.	PPAC
2060.8	PF
36.	TD
29.6	TR
322.	DC
226.6955806	PM
7.423938427	COP
17.43731548	TG2

(puissance motrice constante)

Données météo :	T.EX (°C)	- 2	0° ± 2,5°	+ 5° ± 2,5	+ 10° ± 2,5	+15°-2,5	TOTAL
1 Nb d'heures		264	840	1512	2112	552	5280
Résultats							
1 Puissance appelée (Th/h)		5925	4637	3349	2061	773	
3 Puissance fournie (Th/h)		2085	2224	2383	2061	773	
4 Puissance motrice (Th/h)		313	313	313	227	38	
5 Température de rejet (°C)		19,5	18,1	16,5	17,4	25,3	
Bilan : 6 Energie totale appelée (Kth) $1 \times 2 \times 10^{-3}$		1564	3895	5064	4353	427	15303
7 Energie fournie par la PAC (Kth) $1 \times 3 \times 10^{-3}$		550	1868	3603	4353	427	10801
8 Appoint nécessaire 6 - 7		1014	2027	1461	0	0	4502
9 Energie consommée par la PAC (Kth) $4 \times 1 \times \frac{10^{-3}}{0,3}$		275	876	1578	1598	70	4397
10 Energie totale consommée Kth 8 + 9		1289	2903	3039	1598	70	8899

SORTIE LISTING

---

322.	DC
50.	TRB
6440.	PB
-7.	TB
18.	TMC
8.295	TTR
-5.	TEX
312.8	PM
32.	TG1
100.	DG
5924.8	PA
47.6	TR
54.07543952	TD
19.49041807	TG2
2085.091526	PF
4.99522696	CDP

0.	TEX
4636.8	PA
41.6	TR
48.50764302	TD
18.09672281	TG2
2224.261052	PF
5.444142323	CDP

5.	TEX
5.	TEX
3348.8	PA
35.6	TR
48.00167488	TD
16.50794021	TG2
2080.339312	PF
5.952704535	CDP

La limitation de la puissance motrice de la PAC fait apparaître 4 502 kth d'appoint nécessaire contre 3 983 kth seulement si la puissance fournie par la PAC était constante en deça de la température de transmission (soit + 519 kth).

Cependant l'énergie totale consommée n'est que très légèrement supérieure (8 899 contre 8 851 kth soit + 48 kth) grâce aux économies réalisées sur la consommation de la PAC (4 397 kth contre 4 868 kth soit - 471 kth).

#### V.4 - Bilan financier

- A puissance fournie constante, la puissance motrice maxi demandée à la PAC sera d'environ 500 kw

coût d'investissement (4000 F/kw) = 2 000 F kw

- A puissance motrice constante de 370 kw l'investissement serait de 1 480 kF.

Le surcoût de 520 kF constituerait une charge financière supplémentaire annuelle de : (emprunt à 10 % sur 15 ans).

$$520 \times \frac{0,1}{1-(1+0,1)^{-15}} = 68,3 \text{ kF}$$

#### V.5 - Conclusions

L'énergie supplémentaire consommée dans le cas de la limitation de la puissance motrice de la PAC à celle nécessaire à la température de transition, s'élève à 48 kth.

A 100 F/kth cela représente 4 800 F, ce qui est négligeable en regard des 68 300 F de charges financières supplémentaires correspondant à cette solution, (puissance fournie constante).

## BIBLIOGRAPHIE

- Rapport 79 SGN 405 GTH
- Projet de Chauffage par une source géothermique avec une pompe à chaleur à énergie totale - Renault Techniques Nouvelles -