

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE

**Projet SPEOS**

**Echangeur de chaleur à lit fluidisé**

**S. Germano**

## TABLE DES MATIERES

1.	INTRODUCTION.....	1
2.	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
	AVANTAGES DU LIT FLUIDISE.....	6
	THEORIE DU LIT FLUIDISE.....	7
3.	CHOIX DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR.....	9
4.	PROTOTYPE PROPOSE.....	12
	A) DESCRIPTION.....	12
	B) BUT DU PROTOTYPE.....	13
	C) AMELIORATIONS PREVUES.....	13
5.	L'ECHANGEUR DE CHALEUR FINAL.....	14
6.	LE PLANNING.....	15
	NOMENCLATURE.....	16
	REFERENCES.....	17

## 1. INTRODUCTION

Dans le cadre du projet SPEOS, pour le stockage d'énergie thermique en nappe d'eau souterraine, des problèmes d'entartrage au niveau des échangeurs sont apparus. Diverses solutions ont été testées pour y remédier, telles que l'injection d'acide chlorhydrique (HCl) ou l'utilisation d'échangeurs à plaques avec circulation de billes. Toutefois aucune des solutions ne s'est avérée satisfaisante. Le Laboratoire d'Energétique Industrielle (LENI) a été mandaté pour développer une solution de type mécanique. L'étude bibliographique a montré que l'utilisation d'échangeurs à lit fluidisé représentait une des meilleures solutions pour prévenir l'entartrage et pour augmenter les coefficients de transfert de chaleur.

Le LENI a donc réuni et analysé les lois de conception d'un échangeur prêt à satisfaire les besoins de sites similaires à SPEOS. L'analyse préliminaire montre que la réalisation d'un échangeur de 1MW est possible avec un encombrement adapté au local actuel de SPEOS.

Les paramètres les plus importants vont être testés sur un prototype de petites dimensions, à parois transparentes, en cours de construction. La conception et la construction de l'échangeur de 1MW est prévue en parallèle pour une installation en automne 89.

## 2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Pour éliminer les problèmes d'entartrage dans les échangeurs de chaleur, 2 voies sont principalement explorées : la voie chimique et la voie mécanique. Dans le cadre de notre étude, nous ne nous occuperons que de la solution mécanique.

Il faut d'abord considérer deux types d'échangeurs :

- les échangeurs à plaques (fig.1)
- les échangeurs à tubes (fig.2)

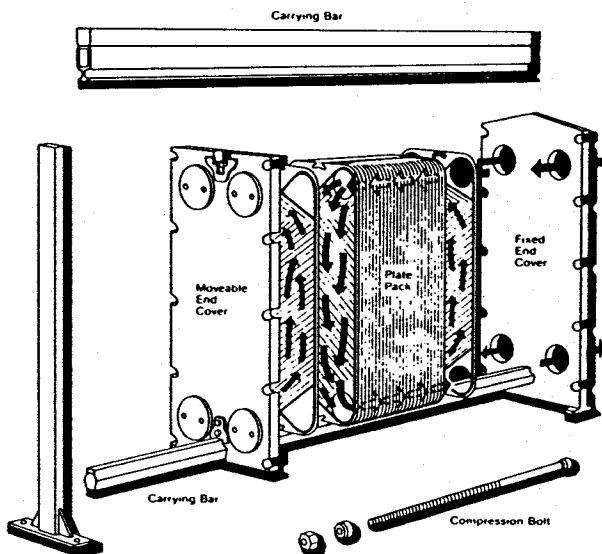


Fig.1 Echangeur à plaques

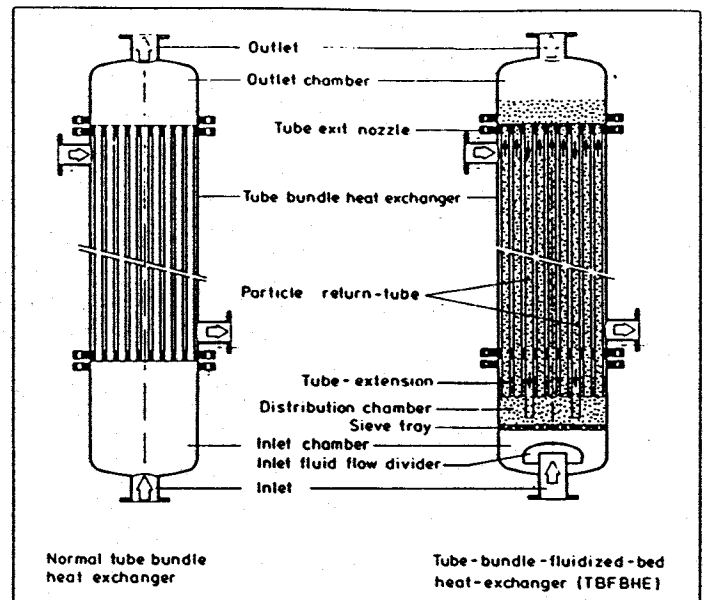


Fig.2 Echangeur à tubes

Les échangeurs à plaques comportent plusieurs avantages par rapport aux échangeurs à tubes :

- moins coûteux
- meilleur échange de chaleur
- facilement nettoyables dans des conditions de dépôts à faible adhésion et des taux de déposition modérés.

Dans le cas d'une utilisation dans le complexe de SPEOS, de tels échangeurs (à plaques ou à tubes) ne sont pas adaptés si l'on n'utilise pas des artifices pour empêcher le calcaire de déposer.

Des essais avec des échangeurs à plaques ont montré que ceux-ci se colmataient après seulement 2-3 jours de fonctionnement, d'où la nécessité de les démonter et de les nettoyer beaucoup trop souvent.

Pour remédier à ces problèmes de dépôts de calcaire, plusieurs solutions sont envisageables ou ont été essayées :

- par vibrations ;
- par circulation de billes ;
- par l'utilisation de matériaux plastiques ;
- par un système de brosses ;
- par lit fluidisé (horizontal ou vertical).

Les deux premières solutions ont été appliquées, dans le cadre de SPEOS, à des échangeurs à plaques.

La première solution consiste à faire vibrer les plaques de l'échangeur pour en détacher les dépôts de calcaire. Les résultats obtenus n'ont pas été satisfaisants, car le calcaire restait accroché aux plaques.

La deuxième solution consiste à faire circuler des billes de polystyrène dans l'échangeur que l'on récupère ensuite à la sortie de celui-ci. Ces billes, par l'effet d'homogénéisation, de grattage et de chocs sur les parois, devraient empêcher le calcaire de se déposer. Le système fonctionne pendant quelques heures, mais l'échangeur finit par se colmater, soit à cause des billes qui se cassent et se bloquent entre les plaques, soit à cause de l'entartrage qui prend naissance dans les zones mortes. Il est vrai que la conception de canaux évitant presque les zones mortes est déjà complexe pour des fluides simples, qu'elle devient un défi pour un écoulement à multi-composants solide-liquide.

L'utilisation de matériaux plastiques pour les tubes dans l'échangeur est relativement difficile, voire peu économique, les températures étant trop élevées sur le site de SPEOS (jusqu'à 110°C).

Le système à brosses est un système de nettoyage automatique [3], les brosses se déplaçant à l'intérieur des tubes (fig.3). Mais pour une utilisation avec du calcaire, les brosses risquent de ne pas être suffisamment abrasives pour éliminer les dépôts.

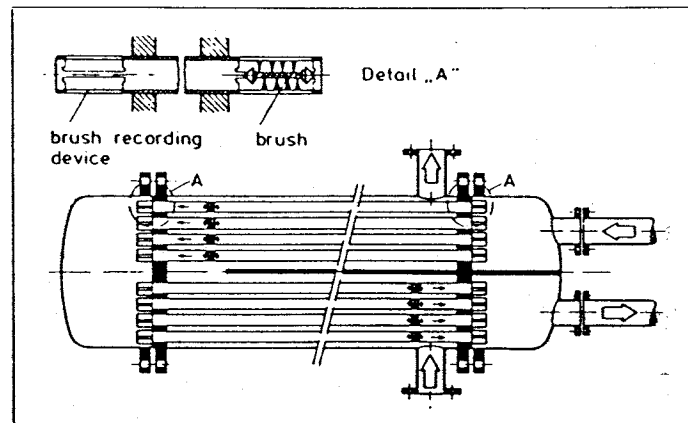


Fig.3 MAN : système de nettoyage des tubes par brosses en plastique

En conclusion, la solution d'un échangeur à tubes à lit fluidisé semble offrir le maximum d'avantages et de garanties pour un fonctionnement satisfaisant du SPEOS Dorigny, cette technique étant employée dans les échangeurs de chaleur qui utilisent l'énergie géothermale avec des fluides géothermiques à haut potentiel d'entartrage et où l'on désire supprimer les dépôts de tartre des surfaces d'échange [1,7].

Le principe de fonctionnement est le suivant : un lit constitué de particules de sable (ou d'un autre matériau) repose sur le fond de l'échangeur. Lorsqu'on fait circuler un fluide, celui-ci entraîne les particules qui se maintiennent en suspension autour d'une position d'équilibre, provoquant des turbulences. Les particules viennent frapper les tubes et provoquent un grattage de ceux-ci, empêchant le calcaire de se déposer.

Deux dispositions sont possibles : soit horizontale (fig.4), soit verticale (fig.5)

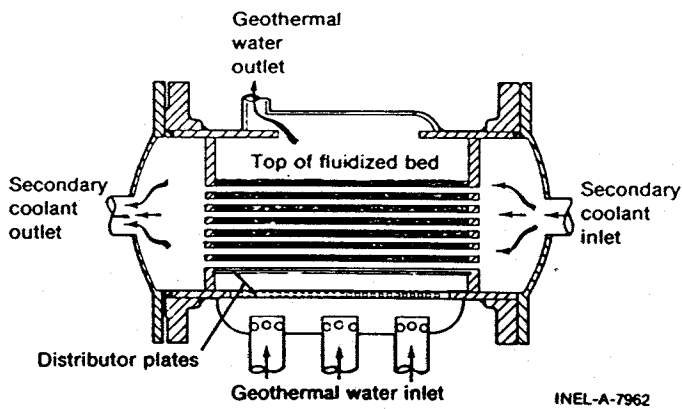


Fig.4 Echangeur Horizontal

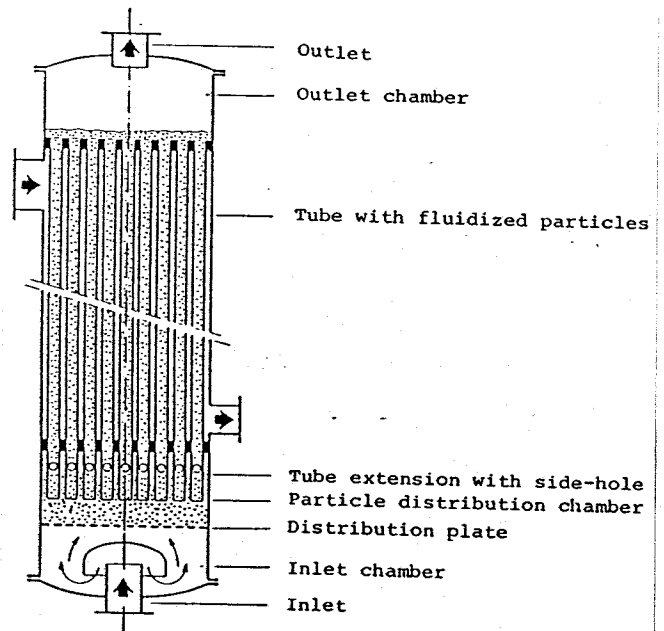


Fig.5 Echangeur vertical

Plusieurs configurations sont possibles, telles que :

- lit fluidisé à l'extérieur des tubes (fig.6)
- lit fluidisé à l'intérieur des tubes (fig.6)

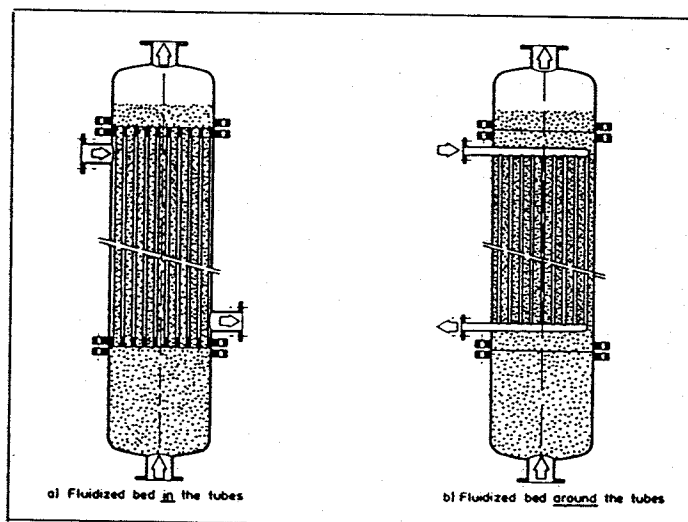


Fig.6 Echangeur avec lit fluidisé à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes

Les modifications à apporter à un échangeur conventionnel pour l'utilisation d'un lit fluidisé sont relativement minimales (fig.7). Ce sont essentiellement : un élargissement des chambres d'entrée et de sortie, un allongement des tubes et un système qui empêche les particules de retomber dans les conduites.

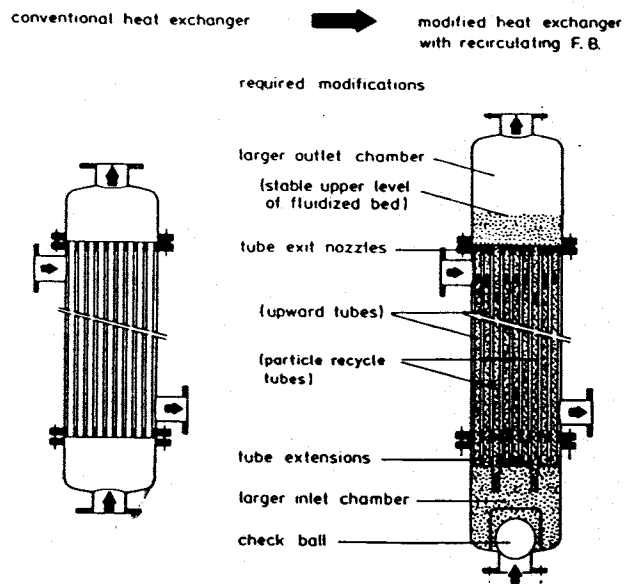


Fig.7 Modifications minimales à apporter sur le dessin d'un échangeur existant pour le convertir en un échangeur à lit fluidisé

### AVANTAGES DU LIT FLUIDISE

Le coefficient de transfert de chaleur est augmenté à cause du brassage des particules qui créent des turbulences et qui détruisent la couche limite, on diminue ainsi la résistance thermique (la C.L. passant d'un état laminaire à turbulent). [2]

Les dépôts de calcaire ne se font plus sur les tubes, mais sur les particules ou sur les parties de paroi non touchées par le lit fluidisé [5], les particules deviennent ainsi des sites privilégiés de nucléation pour le calcaire.

Le grattage des particules sur les parois a un effet nettoyant, on arrive même dans certains cas à éliminer une couche de calcaire déjà existante (pour autant qu'elle soit faible).

La corrosion des tubes due à ce grattage est très faible : pour un tube de 6457 gr, la corrosion est de 1 gr après 1000 h de fonctionnement, pour des particules en



métal de 4 mm de diamètre [3,4]. Les échangeurs verticaux offrent de meilleures performances que les échangeurs horizontaux, bien qu'ils soient plus encombrants (l'écoulement et le coefficient de transfert-chaaleur sont plus homogènes autour des tubes) [4]. La taille de ces échangeurs est réduite d'environ 50 % par rapport à des échangeurs conventionnels [5].

A l'intérieur du lit fluidisé, le gradient de température dans la direction radiale (pour un échangeur vertical) est très faible, on parle même de lit fluidisé isotherme [6]. On supprime également les pointes de température locales (points chauds).

Notons encore que les coefficients de transfert-chaaleur sont fonction de la vitesse du fluide, de la taille des particules et du pourcentage en volume des particules dans le fluide.

### THEORIE DU LIT FLUIDISE

Les paramètres importants qui permettent de définir la taille d'un échangeur sont les vitesses minimum et maximum de fluidisation et le coefficient de transfert de chaleur (pour un débit donné).

La vitesse minimum de fluidisation est celle pour laquelle on a équivalence entre la perte de charge dans le lit multiplié par la section de passage et le poids du lit diminué de la poussée d'Archimède, soit :

$$\Delta p A = A H (1 - \epsilon) (\rho_p - \rho_l) g$$

En exprimant la perte de charge et en faisant apparaître les nombres de Reynolds et d'Archimède, on obtient la relation :

$$Ar \leq \frac{3}{4 \epsilon} \left[ 2.3 Re^2 + 225 (1 - \epsilon) Re \right]$$

La valeur typique pour la porosité  $\epsilon$  au début de la fluidisation est d'environ 0.4, ce qui donne une vitesse minimum de fluidisation de 1 cm/s pour des particules de 0.5 mm de diamètre.

La vitesse maximum de fluidisation est celle à partir de laquelle les particules sont entraînées par le fluide, i.e. lorsque la force de traînée sur les particules devient plus grande que le poids de la particule diminué de la poussée d'Archimède, soit :

$$c_w \frac{\rho_f C^2}{2} \pi \left( \frac{D_p}{2} \right)^2 = (\rho_p - \rho_f) \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D_p}{2} \right)^3 g$$

avec 
$$c_w = \frac{24}{Re} (1 + 0.14 Re^{0.7})$$

Après transformation de cette équation, on obtient :

$$18 Re (1 + 0.14 Re^{0.7}) \leq Ar \quad \text{pour } 0.1 < Re < 1000$$

Pour des particules de 0.5 mm de diamètre et une porosité  $\epsilon$  de 0.9, on obtient une vitesse maximum de fluidisation de 10 cm/s.

L'équation de transfert de chaleur à la forme générale suivante :

$$Nu_p = Z Pr_l^a Re_p^b \left( \frac{D_p}{D_h} \right)^c \epsilon^d (1 - \epsilon)^e$$

Le facteur Z et les exposants a, b, c, d, e varient d'un auteur à l'autre.

Les valeurs utilisées pour nos calculs sont les suivantes [7] :

$$Nu_p = 6.87 Pr_l^{0.0114} Re_p^{0.5436} \left( \frac{D_p}{D_h} \right)^{0.5441} \epsilon^0 (1 - \epsilon)^{0.1973}$$

Pour des particules de 0.5 mm de diamètre et une porosité  $\epsilon$  de 0.9, on obtient un coefficient de transfert de chaleur  $\alpha$  d'environ 10'000 [W / m<sup>2</sup> / K]. Cette valeur est 4 à 8 fois supérieur à celles des échangeurs traditionnels [2]. Il sera nécessaire d'augmenter le coefficient de transfert de chaleur à l'intérieur des tubes si l'on veut profiter de ce gain, en utilisant des turbulateurs à l'intérieur des tubes comme par exemple des petites hélices.

### 3. CHOIX DE L'ECHANGEUR DE CHALEUR

Données pratiques concernant l'échangeur:

- l'eau du circuit primaire provient de l'usine d'épuration des eaux (STEP)
- l'eau du circuit secondaire provient de la nappe souterraine et contient du calcaire
- température d'entrée au primaire :  $T = 110 \pm 140$  °C
- température de sortie au primaire :  $T = 50 \pm 60$  °C
- température d'entrée au secondaire :  $T = 30 \pm 50$  °C
- température de sortie au secondaire :  $T = 70 \pm 80$  °C
- pression du circuit primaire :  $P = 15$  bar
- pression du circuit secondaire :  $P = \text{env. } 1$  bar

Pour l'élaboration d'un prototype d'échangeur de chaleur à lit fluidisé, deux solutions se présentaient pour le chauffage du circuit secondaire :

- par fluide caloporteur (eau)
- par corps de chauffe électriques (fig.8)

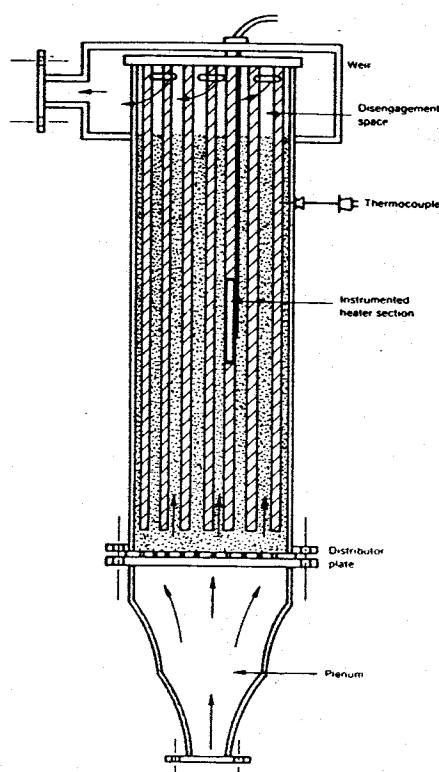


Fig.8 Echangeur avec corps de chauffe électriques

La deuxième solution a été rapidement éliminée car il fallait respecter les conditions de flux de chaleur à travers les tubes afin que les températures de surface correspondent plus ou moins aux valeurs réelles, ce qui n'était à priori pas évident car on ne sait pas exactement comment va se comporter l'échangeur et quels sont les coefficients de transfert de chaleur dans notre cas.

Une fois ce choix fait, il s'agissait de choisir la disposition de l'échangeur (horizontale ou verticale) ainsi que la forme des tubes.

- la disposition horizontale impose un échangeur à courant-croisé qui sera moins performant qu'un échangeur à contre-courant, mais permet d'avoir indifféremment des tubes traversant ou en forme de U, et une géométrie plus compacte. On pourrait n'avoir qu'une extrémité soumise à la haute pression du réseau de chauffage à distance.
- la disposition verticale impose un échangeur à contre-courant, par contre des tubes en forme de U ne sont pas très indiqués, car la partie montante des tubes (courant parallèle) est moins efficace que la partie descendante (contre-courant) et on crée une zone morte autour des coudes des tubes.  
Cette disposition permettrait de mettre l'échangeur dans le puits si nécessaire.

Une grille d'alimentation doit être disposée à la base de l'échangeur pour :

- avoir un écoulement homogène sur toute la section de passage de l'échangeur
- empêcher les particules du lit fluidisé de retomber dans les conduites lors des arrêts de fonctionnement.

Plusieurs variantes pour l'exécution de la grille sont possibles:

- une simple grille percée à intervalles réguliers. L'inconvénient de ce système est qu'on ne retient pas les particules, où alors il faut percer des trous minuscules, mais alors les pertes de charge deviennent importantes et les risques d'entartrage pourraient exister en fonctionnement discontinu
- une grille avec des tamis pour injecteurs de mazoût par exemple, mais ceux-ci risquent de se boucher à cause du calcaire

- une grille avec des buses ou des tubes coudés de petit diamètre qui dévient l'écoulement vers le bas et qui sont orientables sur  $360^{\circ}$  permet une alimentation homogène à la base du lit.

Il est envisageable d'avoir deux échangeurs en série:

- un pour les basses températures ( $50+60^{\circ}\text{C}$ ), qui serait éventuellement un échangeur traditionnel, car la précipitation du calcaire n'a lieu théoriquement qu'à partir de  $60^{\circ}\text{C}$
- et un pour les hautes températures ( $>60^{\circ}\text{C}$ ) qui serait un échangeur à lit fluidisé

On aurait ainsi 2 échangeurs de petite dimension dont le coût global serait sûrement supérieur à celui d'un seul gros échangeur, mais qui permettraient, en cas d'entartrage du second échangeur, de continuer à fonctionner avec le premier sans devoir arrêter toute l'installation.

## 4. PROTOTYPE PROPOSE

### A) DESCRIPTION

Cet échangeur est à tube, disposé verticalement et fonctionnant à contre-courant. L'eau à chauffer, provenant de la nappe souterraine, circule du bas vers le haut et à l'extérieur des tubes. L'eau à refroidir, provenant de la nappe souterraine, circule du haut vers le bas et à l'intérieur des tubes.

Les dimensions sont les suivantes: un diamètre intérieur de la virole de 100 mm et une hauteur de 1,50 m. Les tubes en acier inoxydable ont un diamètre extérieur de 12 mm et une épaisseur de paroi de 1 mm. La virole de l'échangeur est en verre permettant ainsi de voir ce qui se passe à l'intérieur, le lit fluidisé se trouvant à l'extérieur des tubes. Une plaque supportant des buses retient le sable afin que celui-ci ne s'infiltré pas dans les conduites lorsque l'échangeur n'est pas en fonction.

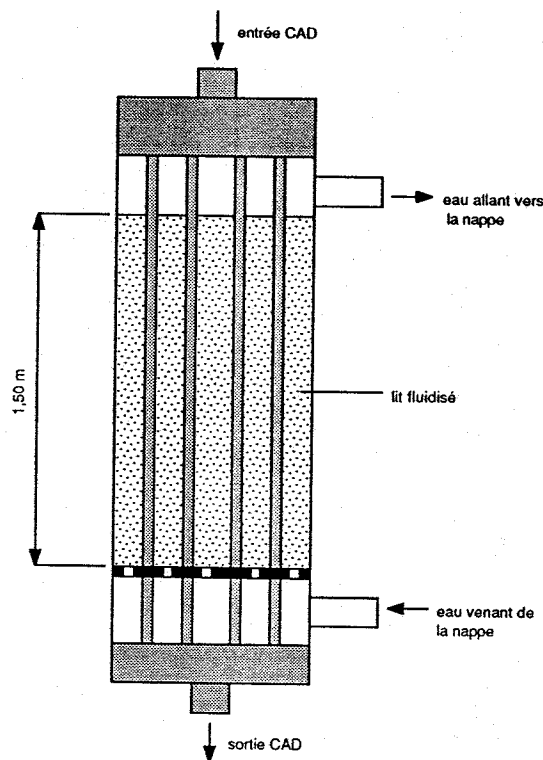


Fig.9 Croquis du prototype

## B) BUT DU PROTOTYPE

Le but de ce prototype est de vérifier les différents paramètres qui régissent le fonctionnement de l'échangeur afin d'en tirer le maximum d'informations possible pour définir les caractéristiques d'un échangeur de plus grande puissance (1MW).

Les paramètres à vérifier sont les suivants:

- 1) les paramètres de fluidisation, soit les vitesses d'écoulement minimum et maximum, la hauteur du lit fluidisé en fonction de la taille des particules
- 2) la taille des particules
- 3) la porosité  $\epsilon$  du lit fluidisé (% de particules, en volume)
- 4) les coefficients de transfert de chaleur ( + test de turbulateurs dans les tubes)
- 5) l'évolution des températures
- 6) les dépôts de calcaire

Les 5 premiers points seront d'abord étudiés dans le laboratoire du LENI où la température maximale de l'eau du circuit primaire ne dépassera pas les 80 °C et ne contient pratiquement pas de calcaire (eau du robinet), puis ils seront vérifiés sur le site de SPEOS où l'on étudiera également l'évolution des dépôts de calcaire.

## C) AMELIORATIONS PREVUES

Une chambre de tranquillisation sera nécessaire à la sortie du circuit secondaire, ceci pour trois raisons :

- récupérer les particules du lit fluidisé qui pourraient être entraînées hors de l'échangeur
- permettre au calcaire qui aura précipité dans l'échangeur et qui sera emporté par le courant, d'être récupéré afin qu'il n'aille pas se déposer dans les conduites
- prévenir le retard à la cristallisation (la précipitation n'est pas instantanée lors du déséquilibre chimique)

Un cône est prévu entre l'arrivée du circuit secondaire et la plaque supportant les buses afin d'avoir une diminution de la vitesse de l'eau plus progressive et une vitesse plus homogène dans la direction radiale. De plus, une vitesse de l'eau plus élevée à la base du cône permettrait de maintenir en suspension les particules dont le poids et la taille auront augmenté à cause des dépôts de calcaire.

## 5. L'ECHANGEUR DE CHALEUR FINAL

Les calculs préliminaires donnent comme dimensions :

- une hauteur de 2,50÷3,00 m
- un diamètre de 280 mm
- environ 140 tubes d'un diamètre extérieur de <sup>12</sup>20 mm

Il devra pouvoir fonctionner en continu sans devoir être constamment démonté (ce qui ne sera pas évident vu ses dimensions). Pour cela un système de renouvellement des particules formant le lit fluidisé devra être prévu, ainsi qu'un système pour évacuer et récupérer les anciennes particules afin de les nettoyer (à l'acide HCl) ou de les éliminer.

Il faudra pouvoir faire face à d'éventuels problèmes de corrosion (pièces à changer) dus au grattage des particules sur les parois, bien que cette corrosion soit minimale d'après les renseignements tirés de la littérature.



## **6. LE PLANNING**

Il n'est pas définitif, mais il est là pour donner une idée sur la prévision de l'avancement des travaux.

- mai 89 : construction et mise au point du prototype de laboratoire
- juin-août 89 : mesures des différents paramètres en laboratoire et sur le site, et en parallèle, conception du prototype de 1MW
- sept. 89 : construction du prototype de 1MW

## NOMENCLATURE

A	surface de passage de l'échangeur [m]
C	vitesse du fluide [ $m \ s^{-1}$ ]
$c_p$	chaleur spécifique [ $J \ kg^{-1} \ K^{-1}$ ]
D	diamètre [m]
g	constante pour l'accélération terrestre [ $m \ s^{-2}$ ]
H	hauteur de l'échangeur [m]
$\Delta p$	pertes de charge dans le lit fluidisé [Pa]
V	volume [ $m^3$ ]

### *symbols grecs*

$\alpha$	coefficient de transfert de chaleur [ $W \ m^{-2} \ K^{-1}$ ]
$\epsilon$	porosité [-] $V_l / (V_l + V_s)$
$\lambda$	conductivité thermique [ $W \ m^{-1} \ K^{-1}$ ]
$\rho$	masse volumique [ $kg \ m^{-3}$ ]
$\mu$	viscosité dynamique [ $kg \ m^{-1} \ s^{-1}$ ]

### *nombres adimensionnels*

Ar	nombre d'Archimède [-]	$g (\rho_p - \rho_f) D_p^3 \rho_f / \mu_f^2$
Re	nombre de Reynolds [-]	$C \rho_f D_p / \mu_f$
Pr	nombre de Prandtl [-]	$c_{p_f} \mu_f / \lambda_f$
Nu	nombre de Nusselt [-]	$\alpha D_p / \lambda_l$

### *indices*

p	particules
f	fluide
l	liquide
s	solide

## REFERENCES

- [1] ASHRAE Handbook  
HVAC Systems and applications  
pp: 45.10-45.12, 1987
- [2] W. Dahm, J. Kollbach, R. Rautenbach  
Continuous cleaning of heat exchanger with recirculating fluidized bed  
Heat Transfer Eng., vol.8, No 4, pp: 26-32, 1987
- [3] R. Rautenbach and J. Kollbach  
New developments in fluidized bed heat transfer for preventing fouling  
Swiss Chem., vol.8, No 5, pp: 47-55, 1986
- [4] L.T. Cole and C.A. Allen  
Liquid-fluidized-bed heat exchanger flow distribution models  
Allied Chemical Corporation, Idaho Falls, Idaho  
13<sup>th</sup> IECEC Proceedings, vol.2, pp: 1129-1134, 1978
- [5] C.A. Allen, R.E. McAtee, E.S. Grimmer  
Liquid fluidized bed heat exchanger scale control and corrosion tests  
Allied Chemical Corporation  
13<sup>th</sup> IECEC Proceedings, vol.2, pp: 1109-1113, 1978
- [6] K. Muroyama, M. Fukuma and A. Yasunishi  
Wall to bed heat transfer in liquid-solid and gas-liquid-solid fluidized beds. Part  
I : Liquid-solid fluidized beds  
Can. J. Chem. Eng., vol.64, No 3, pp: 399-408, jun 1986
- [7] A. Garcia, J. Siqueiros, C. Heard, D. Barragan and A. Hinojosa  
Development in geothermal energy in Mexico - part nine : Heat transfer  
equation for determining convection in liquid-solid fluidised beds.  
Heat Recovery Systems, vol.6, No 6, pp. 483-490, 1986