

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GM 482

Ecole Supérieure Polytechnique
Centre de THIES

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

Titre : Conception et étude technique d'une cuisinière solaire
fonctionnant avec un fluide thermique couplé à un stockage à deux
phases

Auteur : Eugène H.G. BAKHOUM

Directeur : Docteur Banda NDOYE

Année : 2007

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail : les professeurs qui m'ont donné toutes les connaissances nécessaires tout le long de ma formation. Plus particulièrement mon directeur de projet le docteur Banda Ndoye qui m'a grandement aidé dans mon travail.

Je voudrais enfin remercier la direction de l'école et le département de génie électromécanique pour leur grande contribution à la réussite de ma formation.

SOMMAIRE

Le but de ce travail est de concevoir et d'étudier une cuisinière solaire thermique munie d'un système de stockage de chaleur et d'un système de commande et de régulation.

Au cours de notre étude, nous avons retenu par confrontation des vingt solutions proposées, une solution qui répond aux critères d'évaluation qui ont été fixés. Ensuite, nous avons procédé à une étude détaillée de cette solution qui a consisté à faire les dessins de définition et le dimensionnement des capteurs. Par la méthode des différences finies, nous avons également étudié le comportement de la paraffine et du réfrigérant au cours d'un cycle de fonctionnement de la cuisinière.

La solution retenue permet d'obtenir des niveaux de température variant de 100 à 200°C. Elle a également une autonomie permettant la cuisson du dîner et du petit déjeuner (1h et 15mn respectivement). Un petit capteur plan est utilisé pour fournir de la chaleur au réfrigérant et un capteur photovoltaïque en appoint assure le fonctionnement du compresseur et la recharge de la batterie d'accumulation.

Tout en présentant une gamme de températures, cette cuisinière permet de cuisiner à l'abri du soleil et la nuit. Mais du fait de l'utilisation d'un compresseur, elle produit du bruit.

Mots clés : cuisinière – solaire

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux	v
Liste des figures	vi
INTRODUCTION.....	- 1 -
Chapitre 1 :.....	- 3 -
ETUDE THEORIQUE.....	- 3 -
1.1. Transfert de chaleur	- 4 -
1.1.1. La conduction	- 4 -
1.1.2. La convection	- 4 -
1.1.3. Le rayonnement	- 5 -
1.1.4. Rayonnement solaire.....	- 6 -
1.2. Les capteurs	- 8 -
1.2.1. Les capteurs à concentration	- 8 -
1.2.2. Les tubes sous vide	- 8 -
1.2.3. Les capteurs plans.....	- 8 -
1.3. Le stockage à deux phases	- 9 -
1.4. La pompe à chaleur	- 11 -
1.4.1. Généralités.....	- 11 -
1.4.2. Coefficient de performance COP	- 13 -
1.4.3. Le phénomène de transfert thermique.....	- 13 -
1.4.4. Les différents types de pompes à chaleur.....	- 14 -
1.5. Les cuisinières solaires.....	- 14 -
1.5.1. Généralités.....	- 14 -
1.5.2. Avantages et inconvénients des différents types de cuisinières	- 15 -
Chapitre 2 :.....	- 17 -
DESIGN DE LA CUISINIERE.....	- 17 -
2.1. Formulation du problème.....	- 19 -
2.1.1. Analyse des besoins	- 19 -
2.1.2. Résumé des besoins sous forme d'objectifs	- 19 -
2.1.3. Inventaire des données et des restrictions relatives au projet	- 19 -
2.1.3.1. Données.....	- 19 -
2.1.3.2. Restrictions	- 23 -
2.1.4. Détermination et pondération des critères d'évaluation	- 23 -
2.1.4.1. Détermination des critères	- 23 -
2.1.4.2. Pondération des critères.....	- 23 -
2.1.4.3. Détail des critères et de la pondération	- 24 -
2.1.4.4. Elaboration d'un barème en vue de la prise de décision.....	- 24 -
2.2. Recherche de solutions	- 25 -
2.2.1. Production d'idées	- 25 -
2.2.1.1. Les plaques	- 25 -

2.2.1.2. Le matériau de stockage	- 26 -
2.2.1.3. La forme de la cuisinière	- 26 -
2.2.1.4. Le capteur solaire	- 26 -
2.2.2. Recherche de solution	- 27 -
2.3. Etude de praticabilité.....	- 27 -
2.4. Etude préliminaire et prise de décision	- 28 -
2.4.1. Etude préliminaire	- 28 -
2.4.2. Prise de décision	- 63 -
Chapitre 3 :	- 64 -
RAFFINEMENT DE LA SOLUTION ET DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS	
DE CAPTATION.....	- 64 -
3.1. Raffinement de la solution	- 65 -
3.1.1. Etude du comportement du fluide durant le cycle	- 65 -
3.1.1.1. La détente.....	- 65 -
3.1.1.2. L'évaporation	- 65 -
3.1.1.3. La compression	- 65 -
3.1.1.4. La condensation	- 65 -
3.1.2. Coefficient de performance de la machine	- 65 -
3.1.3. Etude du comportement de la paraffine dans le temps.....	- 66 -
3.1.4. Dessin de la cuisinière sur solidwoks	- 67 -
3.2. Dimensionnement des capteurs	- 69 -
3.2.1. Dimensionnement du capteur plan	- 69 -
3.2.2. Le dimensionnement du panneau solaire et de la batterie d'accumulation.....	- 69 -
3.2.2.1. La consommation journalière	- 69 -
3.2.2.2. Dimensionnement du panneau solaire	- 69 -
3.2.2.3. Dimensionnement de la batterie d'accumulation	- 70 -
CONCLUSION.....	- 71 -
Annexes	- 72 -
Annexe A.....	- 73 -
Annexe B.....	- 74 -
Annexe C.....	- 94 -
Références	- 98 -

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Matériaux de stockage à chaleur latente de fusion	- 10 -
Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des cuisinières solaires	- 16 -
Tableau 2.1 : Comparaison des quelques matériaux isolants d'usage courant.....	- 22 -
Tableau 2.2 : Pondération des critères.....	- 23 -
Tableau 2.3 : Détail et pondération des critères.....	- 24 -
Tableau 2.4 : Barème pour la prise de décision	- 24 -
Tableau 2.5 : Caractéristiques de la solution n°6.....	- 29 -
Tableau 2.6 : Caractéristiques de la solution n°3.....	- 30 -
Tableau 2.7 : Caractéristiques de la solution n°4.....	- 31 -
Tableau 2.8 : Caractéristiques de la solution n°1	- 32 -
Tableau 2.9 : Caractéristiques de la solution n°8.....	- 33 -
Tableau 2.10 : Caractéristiques de la solution n°9.....	- 34 -
Tableau 2.11 : Caractéristiques de la solution n°11	- 35 -
Tableau 2.12 : Caractéristiques de la solution n°13	- 36 -
Tableau 2.13 : Caractéristiques de la solution n°14	- 37 -
Tableau 2.14 : Caractéristiques de la solution n°16	- 38 -
Tableau 2.15 : Caractéristiques de la solution n°18	- 39 -
Tableau 2.16 : Caractéristiques de la solution n°19	- 40 -
Tableau 2.17 : Tableau récapitulatif des coûts de fabrication	- 63 -
Tableau A.1 : Classification des défauts	- 73 -
Tableau C.1 : Récapitulation de l'étude de praticabilité	- 94 -
Tableau C.2 : Matrice de prise de décision	- 97 -

Liste des figures

Figure 1.1: Distribution de vitesse et de température pour une convection forcée sur une plaque chaude.....	- 5 -
Figure 1.2: Distributions de vitesse et de température pour une convection libre sur une plaque inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontal.....	- 5 -
Figure 1.3 : Rayonnement solaire sur un plan horizontal.....	- 7 -
Figure 1.4 : Schéma de principe d'un moteur thermique.....	- 12 -
Figure 1.5 : Schéma de principe d'une machine frigorifique (pompe à chaleur).....	- 12 -
Photo 1.1 : Type boîte.....	- 15 -
Photo 1.2 : Type concentrateur.....	- 15 -
Photo 1.3 : Type à panneaux collecteurs.....	- 15 -
Figure 2.1: Croquis de la solution n°6.....	- 29 -
Figure 2.2: Croquis de la solution n°3.....	- 30 -
Figure 2.3 : Croquis de la solution n°4.....	- 31 -
Figure 2.4 : Croquis de la solution n°1.....	- 32 -
Figure 2.5 : Croquis de la solution n°8.....	- 33 -
Figure 2.6 : Croquis de la solution n°9.....	- 34 -
Figure 2.7 : Croquis de la solution n°11.....	- 35 -
Figure 2.8 : Croquis de la solution n°13.....	- 36 -
Figure 2.9 : Croquis de la solution n°14.....	- 37 -
Figure 2.10 : Croquis de la solution n°16.....	- 38 -
Figure 2.11 : Croquis de la solution n°18.....	- 39 -
Figure 2.12 : Croquis de la solution n°19.....	- 40 -
Figure 3.1: Discrétisation de la paraffine.....	- 66 -
Figure 3.2 : Vue d'ensemble de la cuisinière.....	- 68 -
Figure B.1 : Schéma de la solution n°1.....	- 74 -
Figure B.2 : Schéma de la solution n°2.....	- 75 -
Figure B.3 : Schéma de la solution n°3.....	- 76 -
Figure B.4 : Schéma de la solution n°4.....	- 77 -
Figure B.5 : Schéma de la solution n°5.....	- 78 -
Figure B.6 : Schéma de la solution n°6.....	- 79 -
Figure B.7 : Schéma de la solution n°7.....	- 80 -
Figure B.8 : Schéma de la solution n°8.....	- 81 -
Figure B.9 : Schéma de la solution n°9.....	- 82 -
Figure B.10 : Schéma de la solution n°10.....	- 83 -
Figure B.11 : Schéma de la solution n°11.....	- 84 -
Figure B.12 : Schéma de la solution n°12.....	- 85 -
Figure B.13 : Schéma de la solution n°13.....	- 86 -
Figure B.14 : Schéma de la solution n°14.....	- 87 -
Figure B.15 : Schéma de la solution n°15.....	- 88 -
Figure B.16 : Schéma de la solution n°16.....	- 89 -
Figure B.17 : Schéma de la solution n°17.....	- 90 -
Figure B.18 : Schéma de la solution n°18.....	- 91 -
Figure B.19 : Schéma de la solution n°19.....	- 92 -
Figure B.20 : Schéma de la solution n°20.....	- 93 -

INTRODUCTION

L'augmentation incessante des prix du carburant et du gaz d'origine pétrolière, la lutte contre la déforestation et le souci de la protection de l'environnement nous poussent aujourd'hui à chercher de nouvelles énergies. Ces nouvelles énergies doivent être renouvelables et non polluantes.

Ainsi, parmi ces énergies nous avons l'énergie solaire qui fait l'objet de nombreux sujets de recherche à cause de sa disponibilité en grande quantité partout dans le monde. Mais la variation de son intensité dans le temps rend son utilisation difficile.

Les cuisinières solaires thermiques sont une alternative pleine d'avenir pour la cuisson des aliments. Cependant, les cuisinières actuelles présentent beaucoup de problèmes liés aux performances thermiques, au confort mais aussi à leur autonomie vis-à-vis du soleil.

En effet, pour atteindre de hautes températures permettant de cuire tout aliment, l'utilisation de capteurs avec systèmes de poursuite du soleil est nécessaire. En effet, les capteurs à orientation fixe ne permettent pas d'obtenir des niveaux de température pouvant assurer la cuisson des aliments. Comme elles doivent aussi être exposées au soleil pour pouvoir fonctionner, ces cuisinières ne sont pas fonctionnelles la nuit.

Pour faire face à cette situation, il faut concevoir une cuisinière qui permet la cuisson des aliments tout en utilisant un capteur à orientation fixe. Mais aussi, cette cuisinière devrait être munie d'un système de stockage de chaleur par chaleur latente de fusion pouvant assurer la cuisson pendant la nuit ou au moment où il n'y a pas de soleil.

Ce rapport porte sur l'étude et la conception d'une cuisinière solaire thermique munie d'un système de stockage à chaleur latente de fusion. Il porte également sur la conception d'un système de commande de la cuisinière.

Nous nous appuyerons sur la méthodologie de design pour dégager une solution satisfaisante.

Pour ce qui est de l'étude du comportement de la paraffine choisie provisoirement comme matériau de stockage, nous utiliserons la méthode des différences finies.

Ce mémoire comprend trois chapitres :

- **le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique**
- **le second chapitre traite du design de la cuisinière**
- **et le troisième est consacré au raffinement et au dimensionnement des éléments de captation.**

Chapitre 1 : **ETUDE THEORIQUE**

1.1. Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est un échange énergétique qui s'effectue généralement suivant trois modes que sont la conduction, la convection et le rayonnement.

1.1.1. La conduction

C'est l'écoulement de la chaleur des zones de hautes températures vers les zones de faibles températures. Cet écoulement est en régime permanent ou variable. S'il se fait suivant :

- un axe, on parle de conduction unidimensionnelle
- deux axes, bidimensionnelle
- trois axes, tridimensionnelle

Ce mode de transfert est régi par la loi de Fourier [1] qui stipule que le flux de chaleur en un point du corps est proportionnel au gradient de température en ce point

$$\vec{q} = \lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (1)$$

Dans le cas d'écoulement unidimensionnel et permanent [1], on a :

$$q = -KA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Où

q = flux de chaleur (W)

K = conductivité thermique du milieu ($\frac{W}{m.K}$)

A = surface de transfert (m²)

$\frac{dT}{dx}$ = distribution de température ($\frac{K}{m}$)

1.1.2. La convection

C'est l'échange de chaleur entre un fluide au contact d'un solide. Elle est soit naturelle ou forcée.

Dans le cas de la convection naturelle dit aussi libre, le fluide se déplace du fait des différences de densité causées par des gradients de températures (figure 1.2). Tandis que dans le cas de la convection forcée, le déplacement du fluide est provoqué par une action externe (figure 1.1).

Donc la chaleur transmise par convection dépend de la vitesse de déplacement du fluide. Le transfert de chaleur par convection est régi par la loi de Newton [1] donnée par :

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Où :

q_c = flux de chaleur par convection (W)

A = aire de la surface de transmission de chaleur m^2

T_s = température de la surface du solide K

T_∞ = température du fluide à une distance éloignée de la surface du Solide K

La difficulté dans l'évaluation de la chaleur transmise par convection réside dans la détermination du coefficient de transfert \bar{h}_c . Pour cela des méthodes de calcul ont été élaborées. Dans certains cas, il faut utiliser les méthodes empiriques combinées à l'analyse dimensionnelle et l'expérience pour déterminer \bar{h}_c .

Ainsi, nous ferons usage de tableaux et graphes pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur

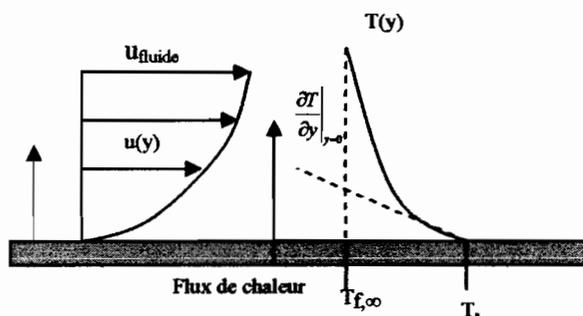


Figure 1.1

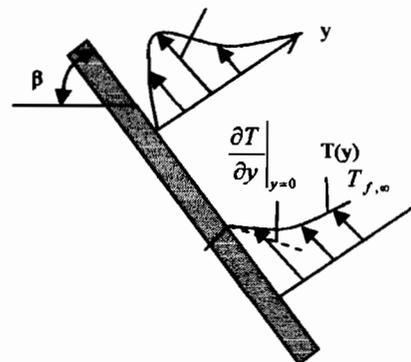


Figure 1.2

Figure 1.1: Distribution de vitesse et de température pour une convection forcée sur une plaque chaude

Figure 1.2: Distributions de vitesse et de température pour une convection libre sur une plaque inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontal

1.1.3. Le rayonnement

C'est l'échange de chaleur qui s'effectue entre deux corps qui ne sont pas en contact.

Dans ce mode de transfert de chaleur, l'énergie est transmise sous forme d'onde électromagnétique qui se déplace à la vitesse de la lumière:

La quantité d'énergie qui quitte une surface sous forme de chaleur par radiation dépend de la température et de la nature de la surface. Le flux de chaleur émis par un corps noir (radiateur parfait) à travers sa surface [1] est donnée par :

$$q_r = \sigma AT^4 \quad (4)$$

Où :

q = flux de chaleur W

A = surface du corps m^2

T = température de la surface du corps K

σ = constante de Stefan Boltzmann

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

Le transfert net d'énergie entre deux corps noirs 1 et 2 [4] est donné par :

$$\begin{aligned} q_{1 \leftrightarrow 2} &= A_1 F_{1 \rightarrow 2} \sigma T_1^4 - A_2 F_{2 \rightarrow 1} \sigma T_2^4 \\ &= A_1 F_{1 \rightarrow 2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \end{aligned} \quad (5)$$

Où :

$$A_1 F_{1 \rightarrow 2} = A_2 F_{2 \rightarrow 1}$$

Pour des corps gris, cette relation [4] devient :

$$(q_1)_{net} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{\rho}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1 \rightarrow 2}} + \frac{\rho}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (6)$$

Où :

ε = émissivité

ρ = réflexivité

A = surface du corps

F = facteur de forme

σ = constante de Stefan Boltzmann

T = température à la surface

1.1.4. Rayonnement solaire

Le soleil [4] est une petite étoile de notre galaxie qui produit de l'énergie par réaction de fusion. Ces radiations ont une puissance de $3.8 \cdot 10^{26}$ W, dont $1.7 \cdot 10^{17}$ W est reçu par la terre. Ainsi le flux d'énergie solaire par unité de temps reçu par unité de surface de la terre perpendiculaire aux radiations à une distance moyenne terre soleil de $1.495 \cdot 10^{11}$ m et en absence de l'atmosphère est appelé *constante solaire*. Elle vaut approximativement $1353 \frac{W}{m^2}$.

Le soleil rayonne approximativement comme un corps noir à 5762 K. 99% du rayonnement direct émis par le soleil se situent entre les longueurs d'onde de 0.1 μm et 4 μm . cependant, quand le rayonnement solaire passe à travers l'atmosphère, une partie de l'énergie arrive à la surface de la terre tandis que l'autre partie est absorbée par l'atmosphère. L'énergie solaire qui atteint la surface de la terre est composée du rayonnement direct du rayonnement diffus.

La somme de ces deux rayonnements est appelée le rayonnement global (ou total). Le rayonnement global reçu par une surface horizontale est appelé insolation. Du fait que la trajectoire de la terre est une ellipse dont le soleil occupe un des foyers, le rayonnement solaire incident varie avec le temps au cours de l'année. Ainsi pour chaque période de l'année, il est possible de représenter sur un graphe la puissance instantané reçue par la terre au cours d'une journée. Cette énergie est donnée [7] par :

$$G = I \sin \alpha + D \quad (7)$$

Où :

G : énergie globale reçue par la terre

I : rayonnement direct qui frappe la terre.

D : rayonnement diffus

α : Hauteur du soleil sur l'horizon

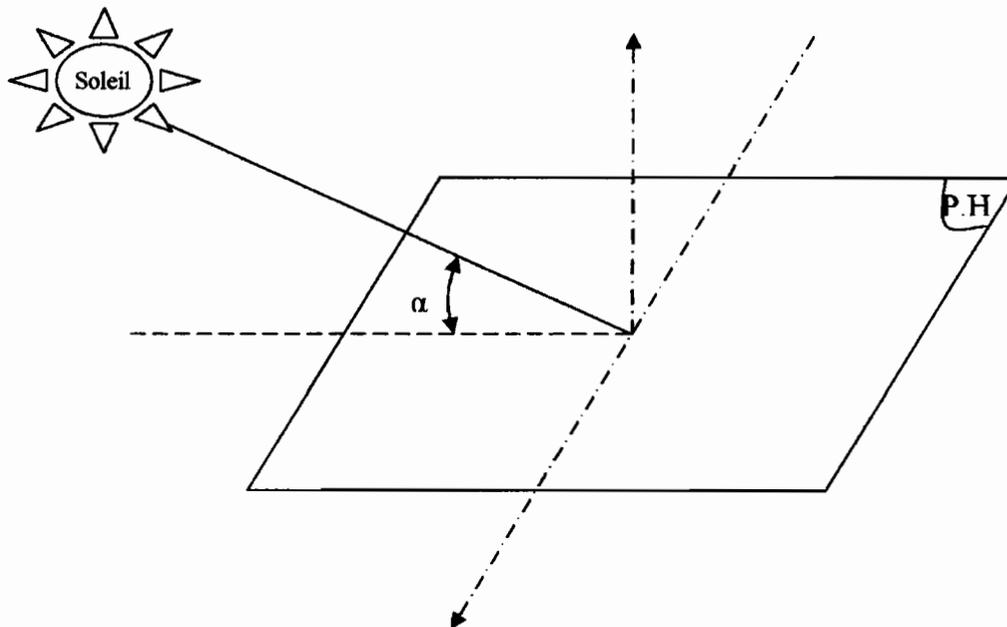


Figure 1.3 : Rayonnement solaire sur un plan horizontal

$$\sin \alpha = \sin L \sin \delta_s + \cos L \cos \delta_s \cosh_s \quad [4] \quad (8)$$

Où :

L : latitude du lieu

δ_s : Déclinaison solaire

h_s : Angle solaire qui est le déplacement angulaire du soleil par rapport à sa position à midi :

une heure correspondant à $\frac{\pi}{12}$ ou 15' d'angle.

L'énergie globale maximale est une caractéristique du site et du plan de captage.

1.2. Les capteurs

Le capteur solaire est un appareil qui transforme l'énergie solaire incident en une autre forme d'énergie. Dans le capteur solaire, l'énergie reçue par rayonnement du soleil est transmise à un fluide. Il existe différents types de capteurs :

1.2.1. Les capteurs à concentration

Pour obtenir de hautes températures, des capteurs dits à concentration sont utilisés. En effet, ces capteurs utilisent des systèmes réflecteurs ou réfracteurs pour augmenter l'intensité du rayonnement solaire sur la surface absorbante. Ils fonctionnent uniquement avec le rayonnement direct. Ce qui fait que leur rendement dépend de la clarté du ciel.

Cependant les capteurs à concentration les plus utilisés sont ceux utilisant des surfaces réfléchissantes paraboliques et cylindro-paraboliques. Ici l'absorbeur est placé au foyer du capteur.

Ainsi dans un capteur [6] cylindro-parabolique, les températures atteintes sont de l'ordre de 400°C tandis que dans les capteurs paraboliques les températures sont plus importantes environ 1500°C.

1.2.2. Les tubes sous vide

Ils utilisent le vide comme isolant thermique pour minimiser les pertes de chaleur. Ainsi, ils sont plus efficaces que les capteurs plans avec un rendement [6] de 50 à 70% et ils peuvent fournir une plus haute température allant jusqu'à 150°C. L'intensité de l'énergie solaire sur l'absorbeur peut être augmentée en ajoutant au capteur des réflecteurs en métal ou en verre. Ces réflecteurs peuvent augmenter de 4 : 1 le facteur de concentration sur l'absorbeur. Les capteurs sous vide peuvent être utilisés pour les mêmes applications que les capteurs plans avec une plus grande efficacité. Ils sont également utilisés avec les systèmes à absorption pour climatiser les édifices et permettre la réfrigération des aliments.

Les capteurs sous vide sont coûteux, environ trois fois le coût d'un capteur plan. Ils sont aussi plus fragiles, ce qui pourrait porter préjudice à leur avantage principal à la moindre fissure.

1.2.3. Les capteurs plans

Ils sont utilisés [6] pour le chauffage de l'eau ou de l'air. Ils utilisent comme absorbeur une plaque de métal ou de plastique à travers laquelle circule un caloporteur pouvant recueillir et transporter l'énergie thermique. Ces capteurs peuvent chauffer de l'eau jusqu'à des températures d'environ 60°C avec une efficacité variant de 40 à 50%. Ces systèmes sont utilisés pour fournir de l'eau chaude domestique, chauffer l'eau d'une piscine, réchauffer l'espace résidentiel ou commercial, chauffer l'air de ventilation des édifices commerciaux et

industriels dans les climats froids et fournir de l'eau chaude ou de la chaleur nécessaire pour des procédés à basse température utilisés dans les commerces ou en industrie. Grâce aujourd'hui à leur technologie avancée, leur coût de fabrication est relativement faible.

1.3. Le stockage à deux phases

Aujourd'hui, le stockage de l'énergie fait l'objet d'importants travaux de recherche [5]. En effet, il existe trois formes de stockage de la chaleur qui sont le stockage chimique, le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente.

Dans notre étude, nous mettrons l'accent sur le stockage par chaleur latente. En effet, la chaleur latente est la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un corps d'une phase à une autre. Durant cette phase de transition, la température reste constante.

Le stockage par chaleur latente est effectué principalement suivant une configuration parallélépipédique ou cylindrique.

Dans la configuration parallélépipédique, le matériau est dans un récipient parallélépipédique tandis que dans la configuration cylindrique il est confiné dans un cylindre.

La conduction et la convection naturelle sont les modes de transfert de chaleur que l'on retrouve dans les problèmes de changement de phases. Ces modes de transfert sont combinés à un mouvement de la surface d'échange. La convection naturelle est négligée si la température initiale est proche de la température de fusion.

C'est ainsi que pour formuler ces types de problèmes, deux méthodes ont été proposées :

- la méthode enthalpie où une seule équation est proposée pour les deux phases en négligeant la convection naturelle. Cette équation est donnée par

$$\rho C_p \frac{dh}{dt} = \nabla(\lambda \nabla T) \quad (9)$$

- la méthode des phases séparées selon laquelle chaque phase est traitée séparément, la température étant la seule variable. Ainsi, nous obtenons les équations suivantes par application de la conservation de masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie :

- dans la phase solide

$$\nabla(\lambda_s \nabla T_s) = \rho_s C_s \frac{\delta T_s}{\delta t} \quad (10)$$

- dans la phase liquide

$$\frac{\delta T_L}{\delta t} + \vec{v} \nabla T_L = \alpha_L \Delta T_L \quad (11)$$

- à l'interface

$$\rho_s L \vec{v}_f \vec{n} = \lambda_s \vec{\nabla} T_s \vec{n} - \lambda_L \vec{\nabla} T_L \vec{n} \quad (12)$$

Pour pouvoir stocker efficacement de la chaleur, on a besoin d'un matériau vérifiant certains critères qui sont d'ordre :

- thermodynamique :

Dans ce cas le matériau doit avoir :

- une température de fusion dans la gamme (0-120)
- une chaleur latente élevée
- une fusion congruente
- une faible variation de volume pendant la phase de transition.

- Cinétique :

Le matériau ne doit quasiment pas montrer un phénomène de surfusion. Il doit aussi se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques après être fondu.

- Chimique :

Il doit présenter :

- Une stabilité chimique
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur soit viable
- Aucune corrosion avec les matériaux de constructions.

Il ne doit également pas être toxique, inflammable et explosif.

- Economique :

Le matériau doit être :

- Disponible en grande quantité
- A bon marché

Nous proposons dans le tableau suivant une liste de quelques matériaux de stockage à chaleur latente de fusion.

Tableau 1.1 : Matériaux de stockage à chaleur latente de fusion

Matériau de stockage	Température de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (KJ/kg)	Conductivité thermique (W/m. K)	Densité (kg/m ³)
Paraffine C14	4,5	165		
Paraffine C15-C16	8	153		
Poly glycol E400	8	99,6	0,187 (38,8°C) 0,185 (69,9°C)	

Dimethyl-sufovide DMS	16,5	85,7		
Paraffine C16-C18	20-22	152		
Poly glycol E600	22	127,2	0,189 (38,6°C) 0,187 (67°C)	
Paraffine C13-C24	22-24	189	0,21 (solide)	
1-dodecanol	26	200		
Paraffine C18	28	244	0,148 (40°C) 0,15 (solide) 0,358 (25°C)	
1-tetradecanol	38	205		
Paraffine C16-C28	42-44	189	0,21 (solide)	
Paraffine C20-C33	48-50	189	0,21 (solide)	
Paraffine C22-C45	58-60	189	0,21 (solide)	
Paraffine wax	64	173,6	0,167 (63,5°C) 0,346 (33,6°C)	
Poly glycol E6000	66	190		
Paraffine C21-C50	66-68	189	0,21 (solide)	
Biphenyl	71	119,2		
Propionamide	79	168,2		
Naphtalène	80	147,7	0,132 (83,8°C) 0,341 (49,9°C)	
Erythritol	118	339,8	0,326 (140°C) 0,733 (20°C)	
HDPE	100-150	200		
Trans-1,4-polybutadiene	145	145		

1.4. La pompe à chaleur

1.4.1. Généralités

Les machines sont des dispositifs qui permettent de convertir les différentes formes d'énergie (de pression, potentielle, cinétique, thermique, mécanique) entre elles. Les dispositifs permettant la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique et la conversion inverse constituent la famille des machines thermiques.

On distingue ainsi, parmi les machines thermiques, les machines réceptrices (moteurs thermiques) et les machines thermiques génératrices (de froid ou de chaleur).

- ✓ D'une manière générale, le terme **moteur thermique** désigne toute machine thermique transformant de la **chaleur en travail**, quels que soient, leur mode de fonctionnement et la nature du fluide utilisé pour cette transformation.

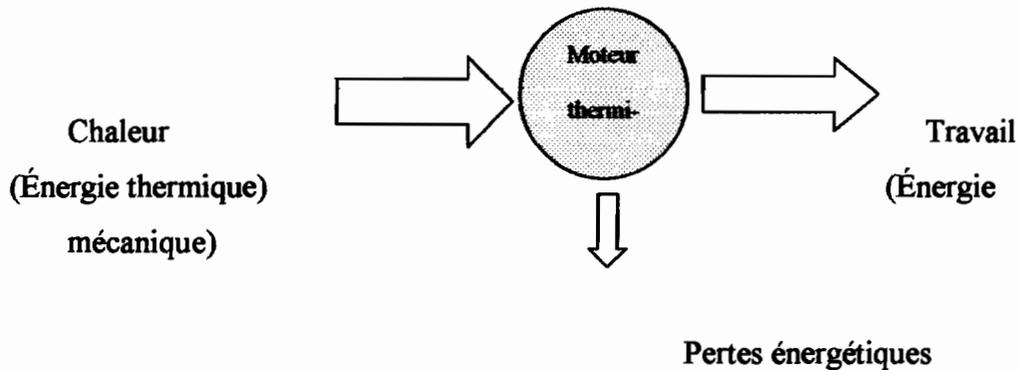


Figure 1.4 : Schéma de principe d'un moteur thermique

- ✓ Parmi les machines génératrices, on trouve les installations de production de froid (appelées machines frigorifiques), ou de chaleur (les pompes à chaleur), ainsi que, dans une certaine mesure, les compresseurs.

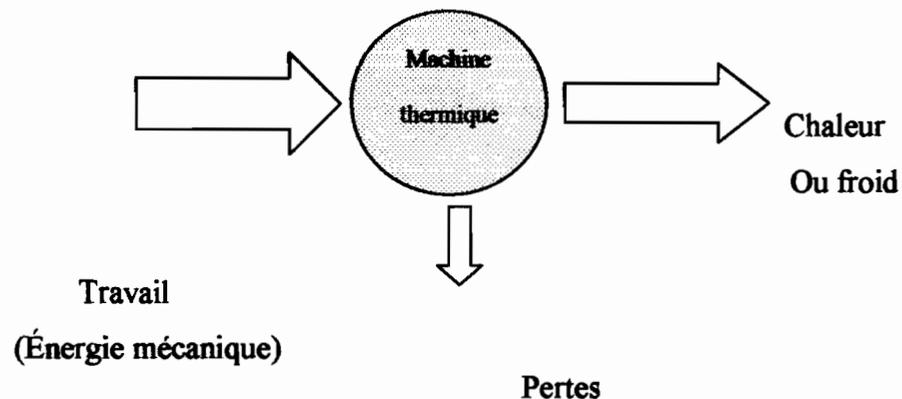


Figure 1.5 : Schéma de principe d'une machine frigorifique (pompe à chaleur)

D'un point de vue thermodynamique, les machines frigorifiques (réfrigérateurs) et les pompes à chaleur sont des machines thermiques qui travaillent à l'envers : ils consomment bien du travail mais pour prélever de la chaleur d'une source froide pour la restituer à une source chaude.

- ✓ Lorsque le but recherché est de produire du froid (extraction de chaleur à un corps, ou à un milieu, pour le refroidir ou le maintenir à une température

inférieure à l'ambiance) alors la machine thermique utilisée est une machine frigorifique

- ✓ Si, au contraire, le but recherché est la production de chaleur (à partir de chaleur gratuite récupérée à une température plus basse) pour chauffer un milieu, ou le maintenir à une température suffisamment haute, alors la machine thermique devient une pompe à chaleur.

Dans certains cas spécifiques, on peut utiliser à la fois le froid produit à la source froide et la chaleur rejetée au « puits chaud ». Un tel système est alors généralement appelé thermofrigopompe.

1.4.2. Coefficient de performance COP

Pour caractériser l'efficacité d'une pompe à chaleur on introduit le coefficient de performance [3] (COP) par la relation :

$$\text{COP} = (\text{chaleur fournie}) / \text{énergie apportée au système}$$

Le COP est très utile pour évaluer la rentabilité d'une pompe à chaleur. Il indique dans quelle mesure la puissance calorifique produite est supérieure à la puissance d'entraînement du compresseur.

1.4.3. Le phénomène de transfert thermique

Pour extraire de la chaleur d'un milieu « froid » (la source froide) vers un milieu chaud (le local à chauffer) on utilise comme vecteur un fluide frigorigène. Ainsi donc, pour extraire de la chaleur d'une source froide on fera subir au fluide frigorigène, en « contact » avec cette source, un phénomène endothermique (qui consomme de la chaleur). De la même manière que pour extraire la chaleur stockée par le fluide frigorigène afin de la restituer à la source chaude on utilisera un phénomène exothermique (qui dégage de la chaleur). Dans la majeure partie des cas, on fait ainsi décrire une série de transformations qui ramène, périodiquement, le frigorigène dans son état initial. Le cycle de fonctionnement ainsi décrit est appelé cycle frigorifique.

La grande majorité des pompes à chaleur (et des machines frigorifiques) utilise le phénomène de vaporisation d'un liquide pour extraire des calories d'une source froide (milieu extérieur). La restitution de calories au milieu à chauffer s'opère alors en utilisant le phénomène de condensation d'une vapeur.

1.4.4. Les différents types de pompes à chaleur

La manière dont les vapeurs issues de l'évaporateur sont aspirées permet de distinguer plusieurs types de pompes à chaleur :

- ✓ Les PAC à compression mécanique : les vapeurs sont extraites par un compresseur mécanique (entraîné par un moteur électrique ou thermique). Leur simplicité de fabrication en fait le modèle le plus répandu. Ces PAC entrent dans la catégorie des machines au moins ditherme.
- ✓ Les PAC à compression thermique de vapeur pour lesquels la compression mécanique est remplacée par une compression thermique. Parmi ceux-ci on peut citer les PAC à absorption et les PAC à adsorption. La compression du fluide frigorigène est réalisée par voie électrochimique en utilisant des mélanges binaires (formés à partir d'un fluide frigorigène et d'un absorbant) ou un solide adsorbant : les vapeurs dégagées par le fluide frigorigène sont dissoutes dans l'absorbant (par un liquide absorbant présentant une forte affinité pour ce frigorigène) ou dans l'adsorbant (par un solide adsorbant c'est à dire que la sorption se fait sur la surface du solide et non dans sa masse). Le fluide frigorigène est alors de nouveau refoulé de la solution par un apport de chaleur supplémentaire. Ces PAC mettent donc en œuvre au moins une troisième source de chaleur : ils seront donc nécessairement au moins trithermes.

1.5. Les cuisinières solaires

1.5.1. Généralités

Il existe beaucoup de modèles de cuisinières solaires. On peut les classer en trois catégories :

- Les cuisinières de type boîte
- Les cuisinières à concentrateur
- Les cuisinières à panneaux collecteurs plats

Les cuisinières en forme de boîte (figure 1.6) sont constituées d'un caisson muni de réflecteurs externes, dont le nombre varie de 1 à 4, permettant de réfléchir les rayons solaires dans le caisson. Ces réflecteurs peuvent être plats ou légèrement concaves.

Par contre, les cuisinières de type concentrateur (figure 1.7) sont constituées en général, d'un capteur à concentration parabolique sur lequel est aménagé un support au niveau du foyer

pour positionner la marmite. Ce type de cuisinières permet de cuire des aliments qu'on ne peut pas cuire avec le type précédent.

Quant aux cuisinières de type à panneaux collecteurs plats, les rayons solaires sont réfléchis directement sur la marmite.

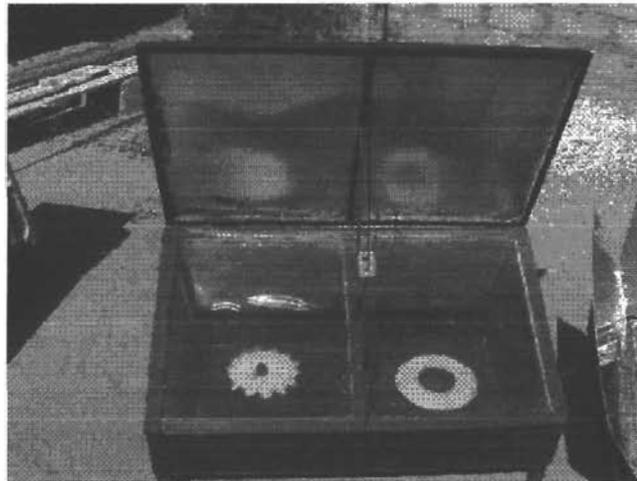


Photo 1.1 : Type boîte



Photo 1.2 : Type concentrateur

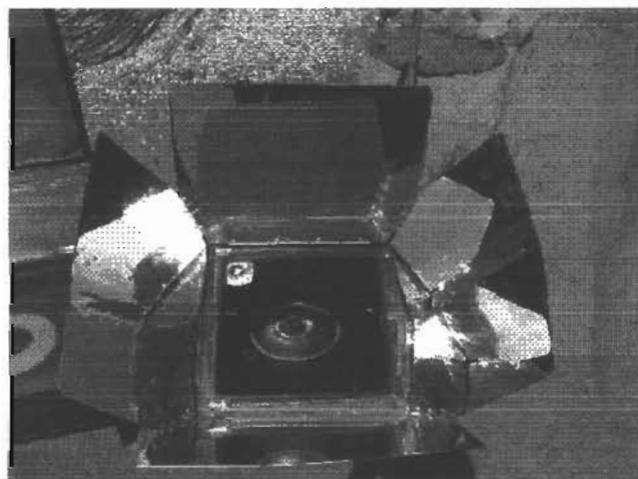


Photo 1.3 : Type à panneaux collecteurs

1.5.2. Avantages et inconvénients des différents types de cuisinières

Dans le tableau suivant nous présentons les avantages et les inconvénients des différents types de cuisinières évoquées plus haut.

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des cuisinières solaires

type	avantages	Inconvénients
Boîte ou caisson	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'intervention de l'opérateur • Durée de maintien des aliments à chaud plus longue • Pas d'éblouissement • Stable • Pas de risques de brûlure • Pas coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> • Températures pas élevées • Retard à chauffer • Accès aux marmites difficiles • Inefficace sous un ciel couvert • Opérateur et cuisinière exposés au soleil
concentrateur	<ul style="list-style-type: none"> • Hautes températures 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessité d'un rayonnement direct • Suivi du soleil toutes les 15 ou 30 minutes • Ne fonctionne pas sous un ciel couvert • Pas stable sous les vents • Risques de brûlures • Eblouissement de l'utilisateur • Utilisateur et cuisinière au soleil
Panneaux collecteurs plats	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation facile • Possibilité de fonctionner sous ciel couvert • Pas de poursuite du soleil • Maintien de la chaleur longue • Pas d'éblouissement • Stable • Pas de brûlure 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus cher que les autres • Encombrant • Utilisateur et cuisinière au soleil

Chapitre 2 :
DESIGN DE LA CUISINIERE

Afin d'obtenir une solution optimale, nous nous proposons de suivre une méthodologie de design. Celle-ci se divise en quatre parties qui sont :

- la formulation du problème
- la recherche de solutions
- l'étude de praticabilité
- et l'étude préliminaire et de prise de décision

2.1. Formulation du problème

La formulation du problème consiste à analyser les besoins du client afin de se fixer des objectifs, inventorier les données et restrictions relatives au projet, déterminer et pondérer des critères d'évaluation et enfin élaborer un barème en vue de la prise de décision.

2.1.1. Analyse des besoins

L'analyse des besoins passe par une identification des défauts ou lacunes des systèmes existants. Ces défauts sont classés en quatre catégories (voir annexe A tableau A.1):

- **l'autonomie** : les cuisinières actuelles dépendent beaucoup des aléas climatiques. En effet, la clarté du ciel et le temps d'ensoleillement ont une grande influence sur leur fonctionnement.
- **Performance thermique** : les températures obtenues par certaines cuisinières sont trop basses pour assurer la cuisson de tout aliment.
- **Confort et ergonomie** : faire la cuisine avec ces cuisinières est très pénible du fait que l'opérateur est exposé au soleil et aux éblouissements provoqués par les miroirs.
- **Exécution des manœuvres de commande** : les cuisinières solaires actuelles n'ont aucun système de commande et de régulation. En effet, il n'existe aucune maîtrise sur les niveaux de température et de puissances obtenus.

2.1.2. Résumé des besoins sous forme d'objectifs

Pour résoudre notre problème nous allons :

- **Concevoir** un système de stockage de la chaleur afin de permettre une utilisation nocturne de la cuisinière
- **Concevoir** une cuisinière qui sera installée et utilisée dans une cuisine et qui permet de cuisiner tous les repas quotidiens comme le font les matériels électroménagers traditionnels
- **Concevoir** un système de commande de l'appareil

2.1.3. Inventaire des données et des restrictions relatives au projet

2.1.3.1. Données

- **Le profil de charge de la cuisinière**

Nous proposons en Afrique, particulièrement au Sénégal, trois plats quotidiens que sont :

- **Le petit déjeuner** qui constitue généralement à chauffer de l'eau à une température de l'ordre de 100°C pour une durée de 10mn. La quantité d'eau chauffée pour une famille moyenne est de l'ordre de 2l.
- **Le déjeuner** : est un plat de résistance constitué de riz (ou pâte), de viande (ou poisson) et de légumes.

La cuisson d'un déjeuner dépend du fluide utilisé pour cuire les aliments et dure environ 1H30mn pour une famille composée de cinq membres. Ces fluides sont essentiellement l'eau ou une huile végétale (arachide ou olive). Durant la cuisson avec les huiles, les températures atteintes ne dépassent pas une température limite au-delà de laquelle la constitution de l'huile est détériorée. La température conseillée pour une cuisson avec l'huile (arachide ou olive) est de 180°C et pour l'eau, elle est un peu au dessus de 100°C.

- **Le dîner** : il a la même constitution que le déjeuner mais plus léger d'où une durée de cuisson plus faible de l'ordre de 1h.

Les horaires de préparation de ces repas sont pour :

- Le petit-déjeuner à 7h
- Le déjeuner à 11h
- Et le dîner à 19h

Les quantités de fluides utilisés pour préparer un repas de cinq personnes sont en moyenne:

- Huile 1/4l
- Eau 2l

Les capacités calorifiques des fluides sont :

- Huile : 2kJ/kg.K
- Eau : 4,18kJ/kg.K

Masse volumique :

- Huile : 0,9kg/l
- Eau : 1kg/l

Nous remarquons que la durée de cuisson dépend non seulement de la température mais aussi de la quantité d'aliment à cuire et de leur constitution. Nous constatons également que le profil de charge peut varier d'un foyer à un autre. Pour une famille aisée on a avant le déjeuner et le dîner des entrées, de même pour les restaurants et pour une famille modeste on aura que les trois repas.

- **L'ensoleillement à Thies**

- Les marmites utilisées pour la cuisson sont les mêmes que celles utilisées pour les autres cuisinières.
- C'est un appareil utilisé par une ménagère dont le niveau d'alphabétisation est moyen
- Le matériau de stockage de la chaleur doit permettre la cuisson nocturne
- Le stockage est à changement de phase
- La température au niveau de la plaque chauffante est de l'ordre de 100°C à 200°C
- La cuisinière doit avoir une autonomie qui permet de faire la cuisine du soir et le petit déjeuner (elle varie entre 3h et 5h)
- Si nécessaire l'appoint énergétique doit permettre la cuisson du matin juste avant le lever du soleil ou à tout moment de la nuit. Il doit être une ressource énergétique propre et renouvelable
- Plusieurs modèles sont envisageables par rapport au critère du coût
- Nous proposons une liste de caloporteur
- Nous présentons un tableau comparatif de quelques matériaux d'isolation pour des qualités d'utilisation courante (voir tableau 2.1)
- Quelques matériaux de stockage à changement de phase sont présentés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.1 : Comparaison des quelques matériaux isolants d'usage courant

	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique		T.maximale d'utilisation	résistance				Présentations courantes
		(W/m. °C)	(kcal/h. m. °C)		Humidité	Feu	Rongeurs	chimique	
Laine de verre	20 à 70	0.041	0.035	Supérieur à 150°C	x nécessite pare vapeur	Xxx	xxx	xxx	- feutre souple - panneaux rigides plans (meilleure résistance à l'humidité) - coquilles cylindriques pour tuyauteries - matelas de feutre cousu sur carton ou grillage - remarque : les feutres, panneaux et coquilles peuvent être nus ou collés sur un pare vapeur (kraft bitumé, aluminisé...)
Laine de roche	80 à 150	0.041	0.035	Supérieur à 150°C	x nécessite pare vapeur	xxx	xxx	xxx	Voir laine de verre (sauf bourrelets) Remarques : 1/ résiste mieux à l'écrasement que la laine de verre 2/ la laine de roche est généralement utilisée pour des températures plus élevées
Polystyrène expansé obtenu par moulage	15 à 25	0.042 à 0.039	0.036 à 0.034	85°C	x nécessite pare vapeur	x	x	x solvants agressifs	- panneaux rigides - coquilles pour canalisations - segments pour réservoirs - perles et copeaux
Polystyrène expansé thermo comprimé	18 à 30	0.038 à 0.036	0.033 à 0.031	85°C	xxx	x	x	x solvants agressifs	Voir polystyrène obtenu par moulage Remarque : bonne résistance à l'écrasement
Mousse de polyuréthane	30 à 35	0.029	0.025	Généralement un peu supérieur à 100°C	xxx	x mais ne propage pas la flamme	xxx	xx	- panneaux rigides - plaques souples - manchons souples pour tuyauteries Remarque : certaines qualités sont variables selon les marques.
Mousse de polyuréthane en bombe	25	0.027	0.023	100°C ou plus	xxx	x mais ne propage pas la flamme	xxx	xx	Une bombe de 1kg donne un volume de 40 litres Remarque : n'adhère pas sur les silicones, le téflon, le polyéthylène
Liège expansé pur	210	0.043	0.037	Supérieur à 100°C	xxx	x	xx	xx	

xxx bon
xx moyen
x mauvais

- Différents caloporteurs/frigoporteurs :
 - o Eau
 - o Ethylène glycol eau (MEG) NEUTRAGEL
 - o Propylène glycol eau (MPG) FRIGEL
 - o Alcool éthylique eau
 - o Sels anorganiques eau
 - Chlorure de calcium
 - o Sels organiques eau TEMPER
 - o Bétaine eau THERMERA

2.1.3.2. Restrictions

- L'appareil ne doit fonctionner qu'avec une source d'énergie solaire
- Les dimensions maximales ne doivent pas dépasser 50cm de largeur x 50cm de profondeur x 100cm de hauteur
- La batterie de stockage doit être munie d'un système de vidange pour l'entretien
- Le respect de l'environnement

2.1.4. Détermination et pondération des critères d'évaluation

2.1.4.1. Détermination des critères

Les critères d'évaluation retenus pour notre projet sont :

- le coût
- l'autonomie
- la performance énergétique (puissance et niveau de température)
- le confort et l'ergonomie

2.1.4.2. Pondération des critères

Nous présentons les pondérations des critères dans le tableau suivant :

Tableau 2.2 : Pondération des critères

Critères d'évaluation	Pondération	
	Poids relatif	ou pourcentage
Coût	15	12%
Autonomie	60	48%
Performance énergétique (Puissance et Température)	25	20%
Confort et ergonomie	25	20%
Total	125	100%

2.1.4.3.Détail des critères et de la pondération

Tableau 2.3 : Détail et pondération des critères

Critères d'évaluation détaillés	Pondération en pourcentage	
	Détaillée	Général
1. coût		12%
2. autonomie		48%
2.1. utilisation d'un matériau de stockage thermique	10%	
2.2. temps de fonctionnement avec l'énergie stockée	28%	
2.3. utilisation d'une ressource renouvelable d'appoint	20%	
3. Performance énergétique		20%
3.1. puissance thermique	10%	
3.2. température	10%	
4. confort et ergonomie		20%
4.1. facilité d'utilisation	10%	
4.2. nombre de boutons de manœuvre pour chaque plaque chauffante	10%	
Total		100%

2.1.4.4.Elaboration d'un barème en vue de la prise de décision

Tableau 2.4 : Barème pour la prise de décision

Critère	Pondération en pourcentage		Barème	
	Détaillée	Général	Repère quantitatif ou qualitatif	Résultat chiffré
1. coût		15%	<ul style="list-style-type: none"> • plus de 150000FCFA • 100000 à 150000FCFA • 75000 à 100000FCFA • 50000 à 75000FCFA • Moins de 50000FCFA 	<ul style="list-style-type: none"> 0% 40% 60% 80% 100%
2. autonomie		60%		
2.1. utilisation d'un			• avec	100%

matériau de stockage thermique	10%		<ul style="list-style-type: none"> • sans 	10%
2.2. temps de fonctionnement avec l'énergie stockée	28%		<ul style="list-style-type: none"> • plus de 5 h • entre 3 et 5h • mois de 3h 	100% 50% 10%
2.3. utilisation d'une ressource renouvelable d'appoint	20%		<ul style="list-style-type: none"> • avec source thermique solaire uniquement • avec source solaire photovoltaïque • avec autre source que solaire 	100% 50% 25%
3. Performance énergétique		20%		
3.1. puissance thermique	10%		<ul style="list-style-type: none"> • plus de 0.5kw • mois de 0.5kW 	100% 20%
3.2. température	10%		<ul style="list-style-type: none"> • plus de 200°C • entre 175°C et 200°C • entre 150°C et 175°C • moins de 150°C 	100% 80% 60% 20%
4. confort et ergonomie		25%		
4.1. facilité d'utilisation	15%		<ul style="list-style-type: none"> • bonne • moyenne • mauvaise 	100% 50% 5%
4.2. nombre de boutons de commande et de régulation de l'appareil	10%		<ul style="list-style-type: none"> • 1 bouton • 2 boutons • 3 boutons • Pas de boutons 	100% 60% 10% 0%

2.2. Recherche de solutions

Dans cette partie, nous allons produire une grande quantité d'idées afin de les combiner pour obtenir une solution assez performante.

2.2.1. Production d'idées

2.2.1.1. Les plaques

La cuisinière peut avoir une à quatre plaques chauffantes. Nous nous limiterons à une recherche de solutions relatives à une plaque; les résultats obtenus seront valables pour toutes les plaques de la cuisinière

La plaque chauffante est circulaire

- Avec un creux à l'intérieur pour recevoir la marmite
- Sans creux, plat

Le matériau constitutif de la plaque inoxydable est :

- en acier

2.2.1.2.Le matériau de stockage

- Le matériau de stockage d'énergie est entre la plaque chauffante et l'isolant thermique

- Le matériau de stockage d'énergie n'est pas en contact avec la plaque chauffante mais est confiné dans un récipient

- Cylindrique
- Parallélépipédique

- La chaleur du matériau de stockage d'énergie est directement utilisée à la température de fusion du matériau

- La chaleur du matériau de stockage d'énergie est utilisée par un circuit frigorifique pour relever la température disponible à une bonne température

- le matériau permettant de stocker l'énergie doit avoir une température de fusion qui permet des aliments durant toute la nuit

- le matériau a une température suffisante pour faire fonctionner l'unité de traitement thermique

2.2.1.3.La forme de la cuisinière

- La forme de la cuisinière peut être cylindrique ou parallélépipédique

2.2.1.4.Le capteur solaire

- Le capteur utilisé est

- Plan
- A concentration
- Tube sous vide

- Le capteur est relié à la cuisinière par des tuyaux calorifuges

- La cuisinière peut être séparée du capteur une fois chargée et déplacée selon la convenance de l'utilisateur

2.2.1.5.La commande

la cuisinière doit avoir :

- un indicateur de niveau de charge du système de stockage de chaleur
- un bouton de marche et d'arrêt
- un régulateur de température

2.2.1.6. Autres composants de la cuisinière

- dans l'unité de traitement thermique (appareil permettant de restituer la chaleur reçue à une température donnée, à une température plus élevée), les appareils (pompe, compresseur, etc.) sont alimentés de façon électrique ou thermique
- dans le cas thermique, on produit de la vapeur d'eau pour faire fonctionner les appareils
- dans le cas électrique, on utilisera des panneaux solaires avec une batterie rechargeable pour fournir de l'énergie ou des piles jetables
- on peut aussi dans l'unité de traitement thermique utiliser des appareils ne consommant pas de l'énergie
- utiliser un appareil de commande pour commander la marche avec la capteur ou sans(c à d avec la réserve)
- utiliser un serpentin au niveau de la plaque chauffante
- mettre directement le caloporteur du circuit de chauffage et la plaque chauffante en contact par l'intermédiaire d'une cavité

2.2.2. Recherche de solution

A l'issue de l'examen des idées proposées, nous avons retenu vingt solutions dont nous avons faites des croquis et description. Ces solutions seront étudiées plus en détail dans la partie étude de praticabilité. Après avoir effectué cette étude nous retiendrons quelques unes de ces solutions qui à leur tour seront examinées au niveau de l'étude préliminaire. Ainsi nous présenterons les croquis et descriptions des solutions en annexe (annexe B).

2.3. Etude de praticabilité

L'étude de praticabilité consiste à évaluer sommairement la possibilité de réalisation d'une ou de plusieurs solutions destinées à satisfaire un besoin. Le but est de déterminer rapidement, sans examen poussé, si une solution doit être rejetée ou retenue pour être approfondie. Pour y arriver, nous devons analyser chaque solution en fonction des quatre points suivants :

- Aspects physiques
- Aspects économiques
- Facteurs de temps
- Facteurs environnementaux

Ainsi, les solutions n°2, 7, 12 et 17 ont été rejetées pour leur inconvénient pour les ménages et pour leur coût à long terme tandis que les solutions n°5, 10, 15 et 20 l'ont été pour le délai de recherche trop court car ces dernières nécessiteraient des recherches très poussées. Les résultats de cette étude sont consignés dans le tableau joint en annexe (annexe C tableau C.1).

2.4. Etude préliminaire et prise de décision

2.4.1. Etude préliminaire

Nous allons déterminer, dans cette partie, dans quelle mesure les solutions retenues à l'issue de l'étude de praticabilité permettent de remplir les fonctions envisagées dans la formulation du problème. Nous mènerons cette étude suivant le plan qui suit :

PLAN DE L'ETUDE PRELIMINAIRE

- a) Elaboration des solutions
- b) Hypothèses communes aux solutions
- c) Evaluation de la capacité de stockage du matériau
- d) Evaluation de la masse du matériau de stockage
- e) Evaluation du volume du matériau de stockage
- f) Evaluation des dimensions de l'appareil
- g) Evaluation du coût de fabrication
- a) élaboration des solutions

Solution n°6 :

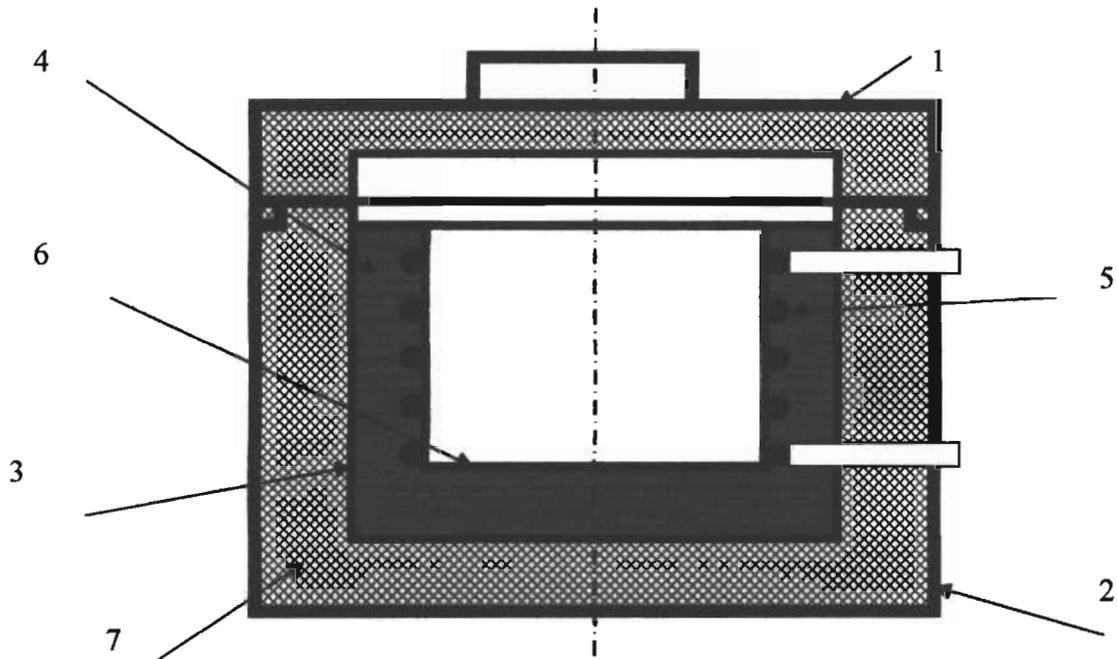


Figure 2.1: Croquis de la solution n°6

Tableau 2.5 : Caractéristiques de la solution n°6

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Couvercle	Tôle d'acier
2	Corps	Tôle d'acier
3	Récipient matériau de stockage	Tôle d'acier
4	Matériau de stockage	erythritol
5	Serpentin	Cuivre
6	Plaque chauffante	Acier inox, aluminium
7	Isolant	Laine de verre

Mode de fonctionnement :

Nous remarquons deux temps de fonctionnement de la cuisinière :

- *en présence de soleil*

Le caloporteur arrivant au niveau du serpentín cède une partie de sa chaleur à la plaque chauffante et l'autre partie au matériau de stockage jusqu'à sa fusion complète. Une fois le matériau de stockage fondu, la chaleur au niveau du serpentín est entièrement fournie à la plaque chauffante.

- *En absence de soleil*

Le matériau de stockage restitue la chaleur qu'il a emmagasinée à la plaque.

L'isolation et le couvercle empêchent la dissipation de la chaleur vers l'extérieur.

Solution n°3 :

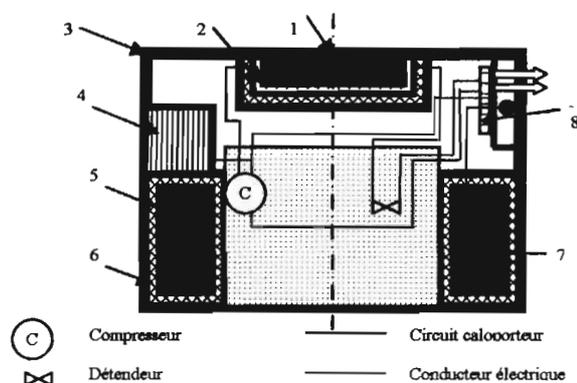


Figure 2.2: Croquis de la solution n°3

Tableau 2.6 : Caractéristiques de la solution n°3

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Plaque chauffante	Acier inox
2	Caloporteur	eau
3	Corps	Acier
4	Batterie rechargeable	-
5	Matériau de stockage	Paraffine wax
6	Isolant	Laine de verre
7	Serpentin	Cuivre
8	Commande	-

Mode de fonctionnement :

- *En présence de soleil*

Le fluide arrivant du capteur cède une partie de sa chaleur au matériau de stockage et une autre partie au niveau du caisson d'échange. Cette dernière est récupérée par l'échangeur du circuit secondaire qui permet d'élever la température au niveau de la plaque chauffante.

- *En absence de soleil*

Le matériau de stockage restitue la chaleur emmagasinée au circuit secondaire par le moyen des échangeurs au niveau du caisson d'échange. Par ce circuit on a la température souhaitée. La circulation du fluide caloporteur dans le circuit primaire est assurée par la pompe P et dans le circuit secondaire par le compresseur. La batterie est chargée par le panneau solaire et alimente la pompe et le compresseur dont la marche et l'arrêt sont commandés par un interrupteur. Les circuits primaires venant du capteur et de la batterie de stockage de chaleur sont inversés par une commande (distributeur).

Solution n°4 :

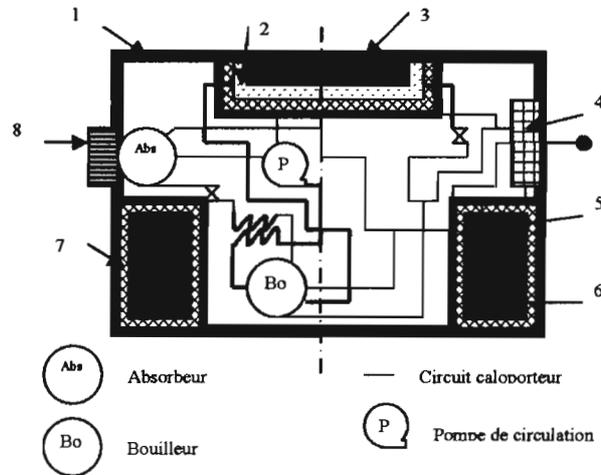


Figure 2.3 : Croquis de la solution n°4

Tableau 2.7 : Caractéristiques de la solution n°4

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Corps	Tôle d'acier
2	Caloporteur	
3	Plaque chauffante	Acier inox
4	Commande	-
5	Serpentin	Cuivre
6	Matériau de stockage	Paraffine wax
7	Isolant	Laine de verre
8	Ailettes	Aluminium

Mode de fonctionnement :

La chaleur transportée par le caloporteur est cédée au niveau de l'absorbeur et du caisson d'échange de chaleur. La chaleur cédée au bouilleur est utilisée pour évaporer le réfrigérant. Une fois évaporé, le réfrigérant vient se condenser au niveau de la plaque chauffante. Ensuite, il passe par le détendeur qui permet de rabaisser sa température afin de pouvoir récupérer la chaleur qui se trouve au niveau du caisson. A la sortie du caisson, il entre dans l'absorbeur où il sera absorbé par l'absorbant. Ce dernier est acheminé vers le bouilleur par l'intermédiaire de la pompe et le cycle recommence. Le jour, la chaleur produite par le capteur est en partie utilisée pour faire fonctionner le bouilleur, la pompe et le caisson et l'autre partie, est emmagasinée par l'intermédiaire du matériau de stockage. A la tombée de la nuit, l'appareil fonctionne avec l'énergie stockée. L'alternance des deux sources de chaleur est effectuée au moyen de la commande de même la marche ou l'arrêt de l'appareil.

Solution n°1 :

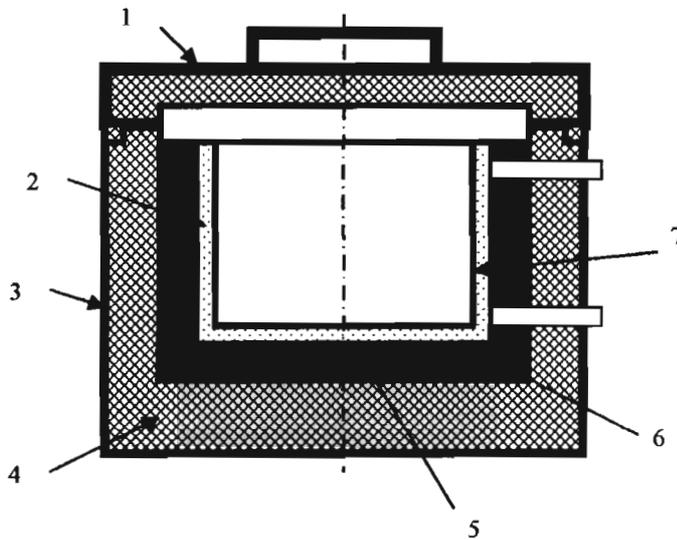


Figure 2.4 : Croquis de la solution n°1

Tableau 2.8 : Caractéristiques de la solution n°1

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Couvercle	Acier
2	Caloporteur	
3	Corps	Acier
4	Isolant	Laine de verre
5	Matériau de stockage	Erythritol
6	Contenant	Acier inox
7	Plaque chauffante	Acier inox

Mode de fonctionnement :

Ici le fonctionnement est identique à celui de la solution n°6, seul le serpentin a été remplacé par creux dans lequel circule le caloporteur.

Solution n°8 :

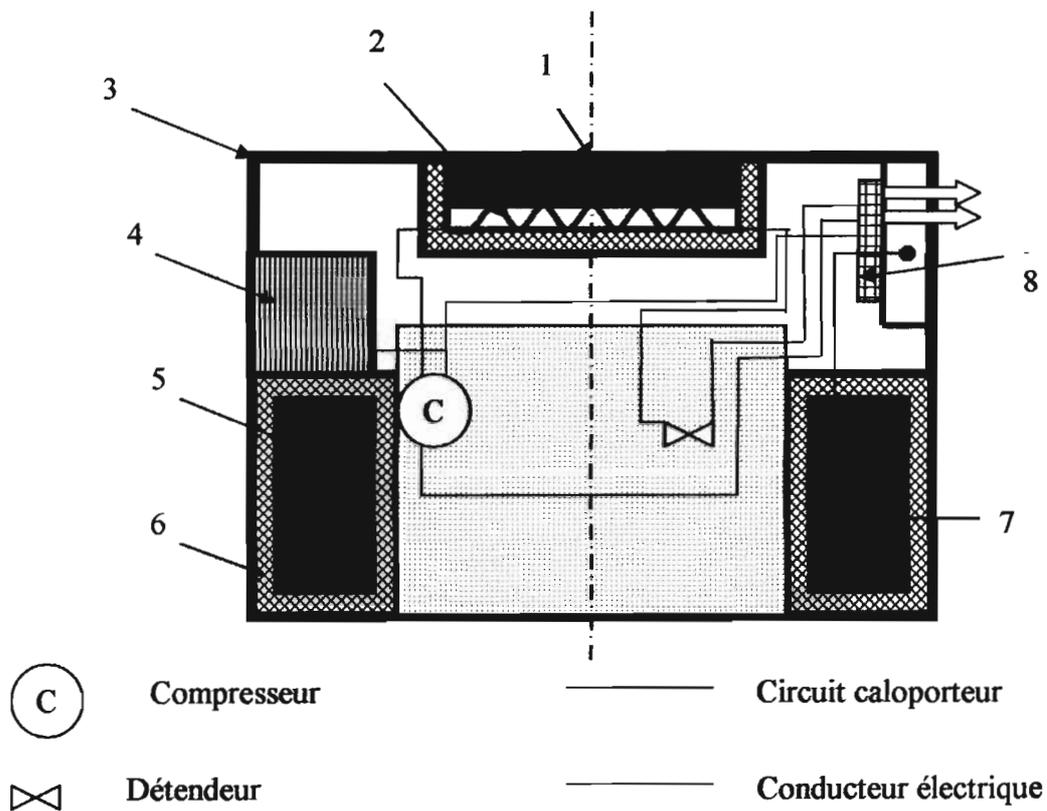


Figure 2.5 : Croquis de la solution n°8

Tableau 2.9 : Caractéristiques de la solution n°8

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Plaque chauffante	Acier inox
2	Serpentin	cuivre
3	Corps	Acier
4	Batterie rechargeable	-
5	Matériau de stockage	Paraffine wax
6	Isolant	Laine de verre
7	Serpentin	Cuivre
8	Commande	-

Mode de fonctionnement :

Elle fonctionne de la même manière que la cuisinière de la solution n°3. Seulement le creux est remplacé par un serpent.

Solution n°9 :

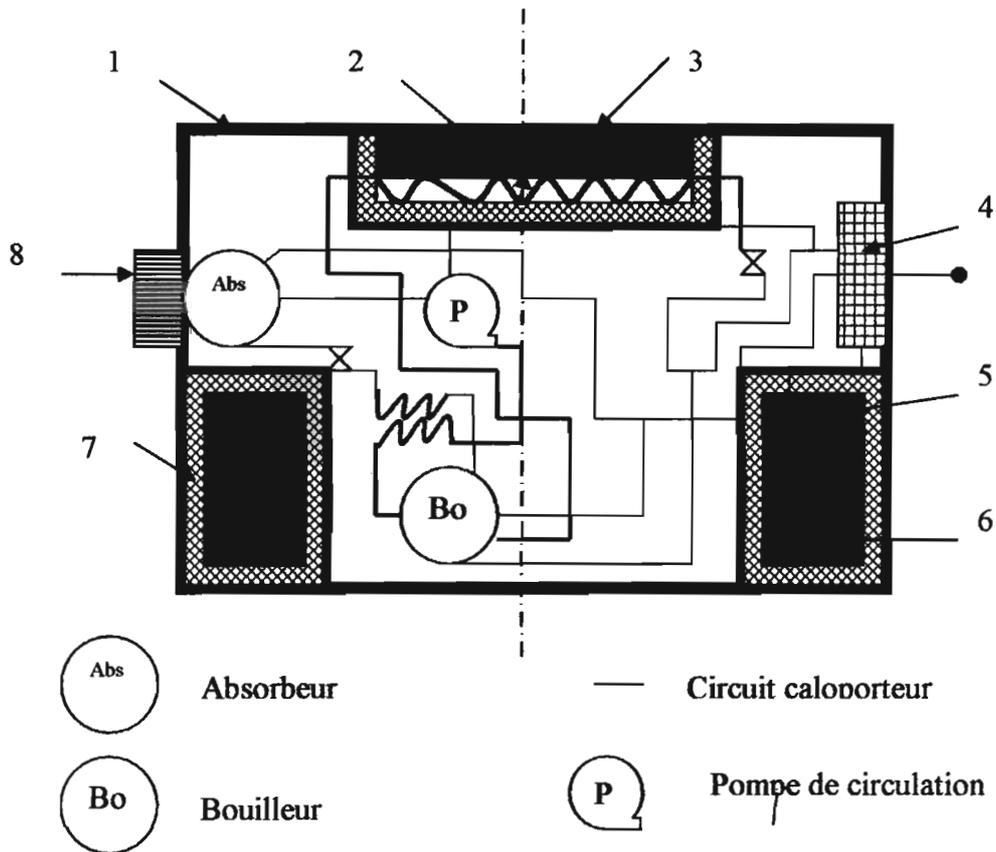


Figure 2.6 : Croquis de la solution n°9

Tableau 2.10 : Caractéristiques de la solution n°9

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Corps	Tôle d'acier
2	Serpentin	Cuivre
3	Plaque chauffante	Acier inox
4	Commande	-
5	Serpentin	Cuivre
6	Matériau de stockage	Paraffine wax
7	Isolant	Laine de verre
8	Ailettes	Aluminium

Mode de fonctionnement :

Identique à la solution n°4, nous avons mis un serpentín à la place du creux.

Solution n°11 :

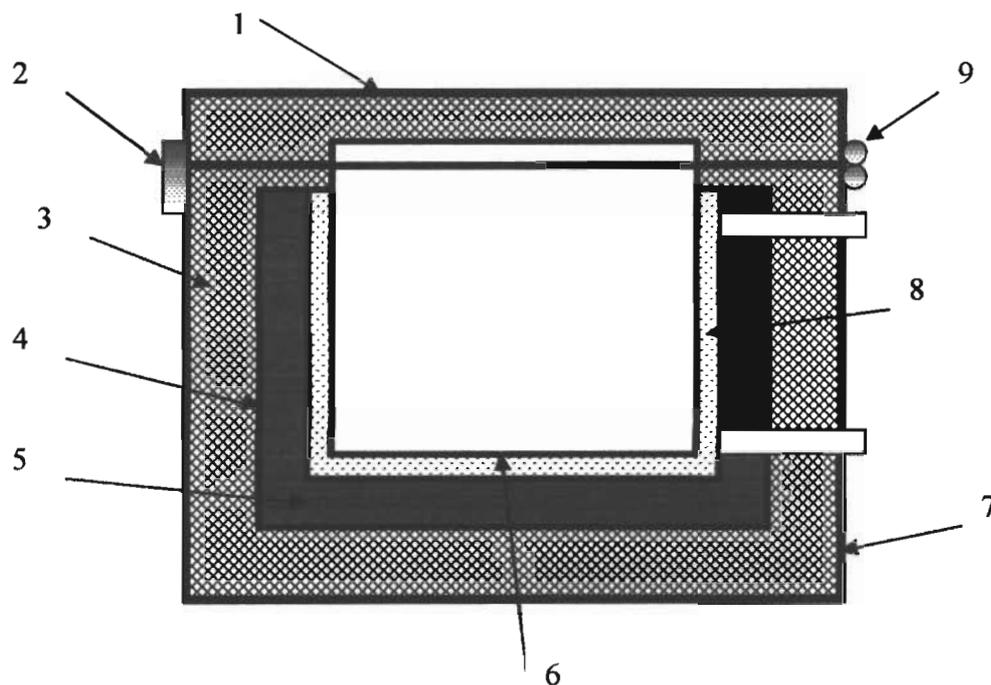


Figure 2.7 : Croquis de la solution n°11

Tableau 2.11 : Caractéristiques de la solution n°11

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Couvercle	Tôle d'acier
2	Poigné	Acier
3	Isolant	Laine de verre
4	Contenant	Tôle d'acier
5	Matériau de stockage	Erythritol
6	Plaque chauffante	Tôle d'acier inox
7	Corps	Tôle d'acier
8	Caloporteur	eau
9	Charnière	Acier

Mode de fonctionnement :

Même fonctionnement que la solution n°1 seule la forme de la cuisinière a changé en parallélépipède.

Solution n°13 :

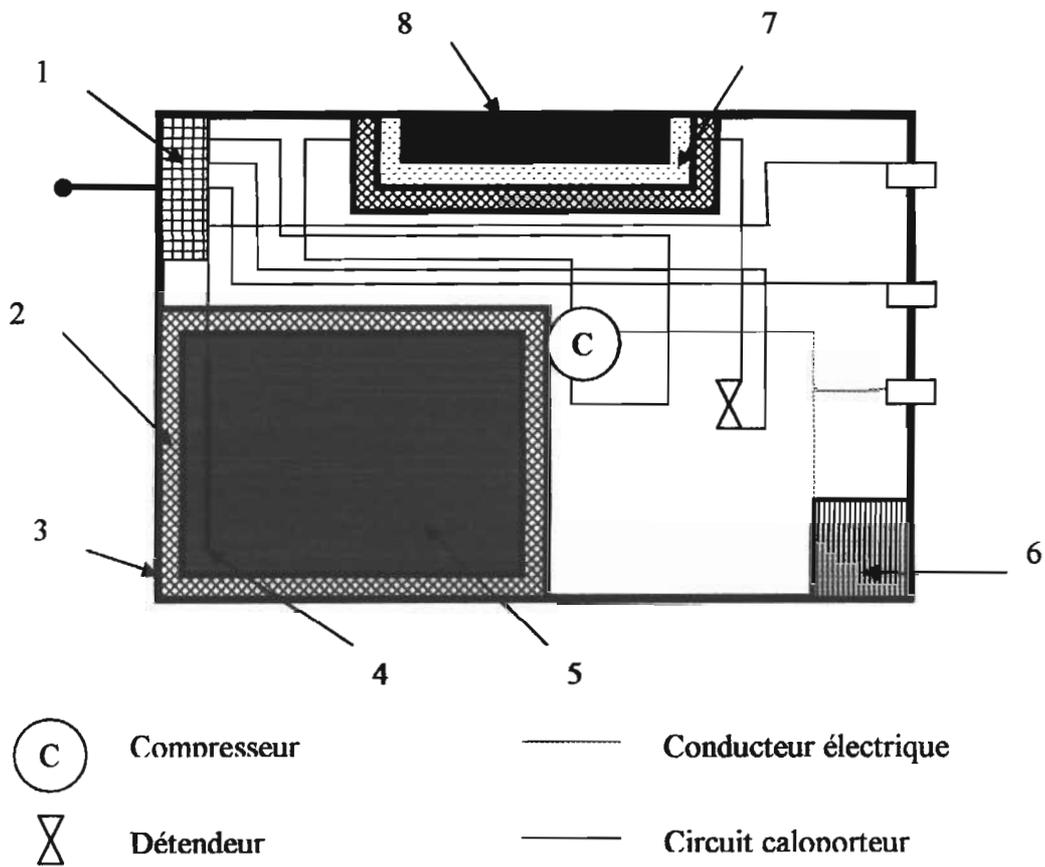


Figure 2.8 : Croquis de la solution n°13

Tableau 2.12 : Caractéristiques de la solution n°13

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Commande	-
2	Isolant	Laine de verre
3	Corps	Tôle d'acier
4	Serpentin	Cuivre
5	Matériau de stockage	Paraffine wax
6	Batterie chargeable	-
7	Caloporteur	
8	Plaque chauffante	Acier inox

Mode de fonctionnement :

Même que solution n°3 seule la forme de la cuisinière a été changé.

Solution n°14 :

Croquis :

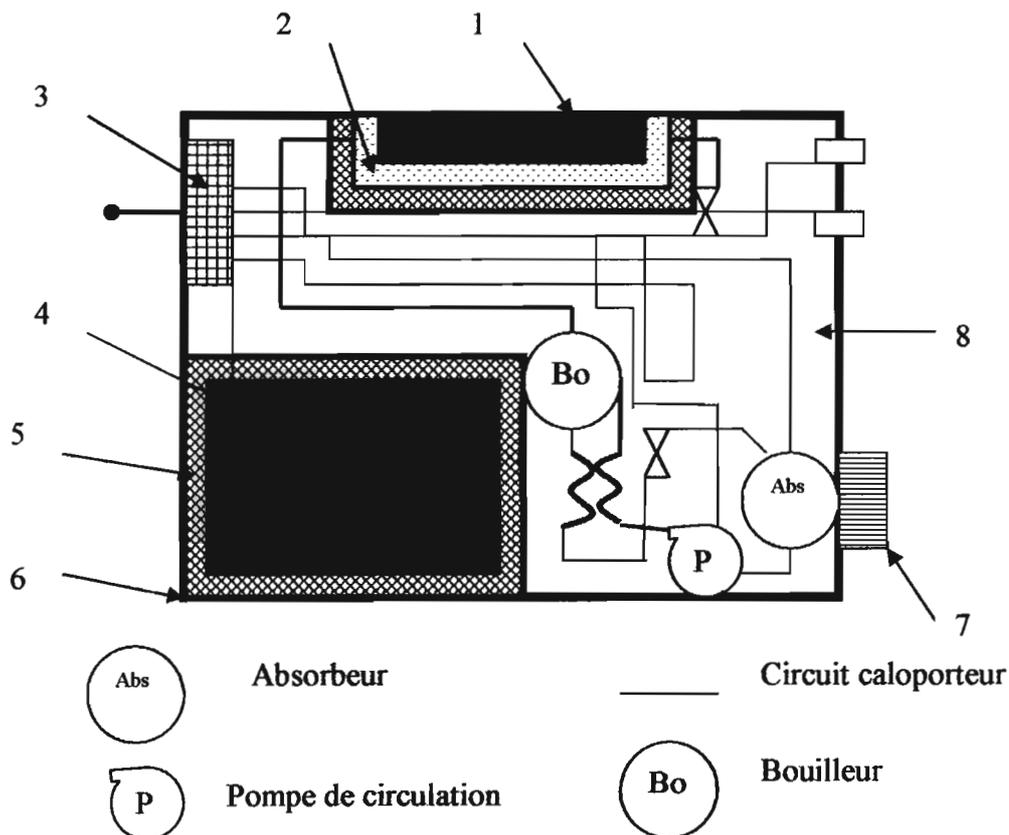


Figure 2.9 : Croquis de la solution n°14

Tableau 2.13 : Caractéristiques de la solution n°14

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Plaque chauffante	Acier inox
2	Caloporteur	
3	Commande	-
4	Serpentin	Cuivre
5	Isolant	Laine de verre
6	Corps	Tôle d'acier
7	Ailettes	Aluminium

Mode de fonctionnement :

Même fonctionnement que la solution n°4 seule la forme de la cuisinière a été changé.

Solution n°16 :

Croquis :

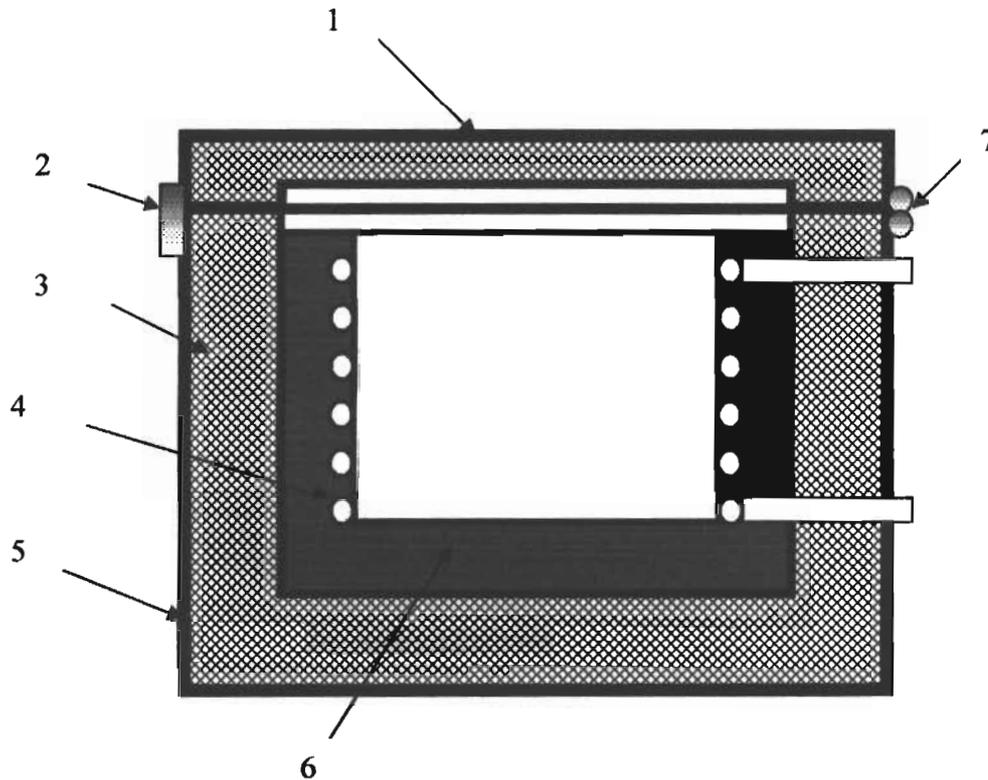


Figure 2.10 : Croquis de la solution n°16

Tableau 2.14 : Caractéristiques de la solution n°16

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Couvercle	Tôle d'acier
2	Poigné	Acier
3	Isolant	Laine de verre
4	Serpentin	Cuivre
5	Corps	Tôle d'acier
6	Matériau de stockage	Erythritol
7	Charnière	Acier

Mode de fonctionnement :

Même fonctionnement que la solution n°6 seule la forme de la cuisinière a été changé.

Solution n°18 :

Croquis :

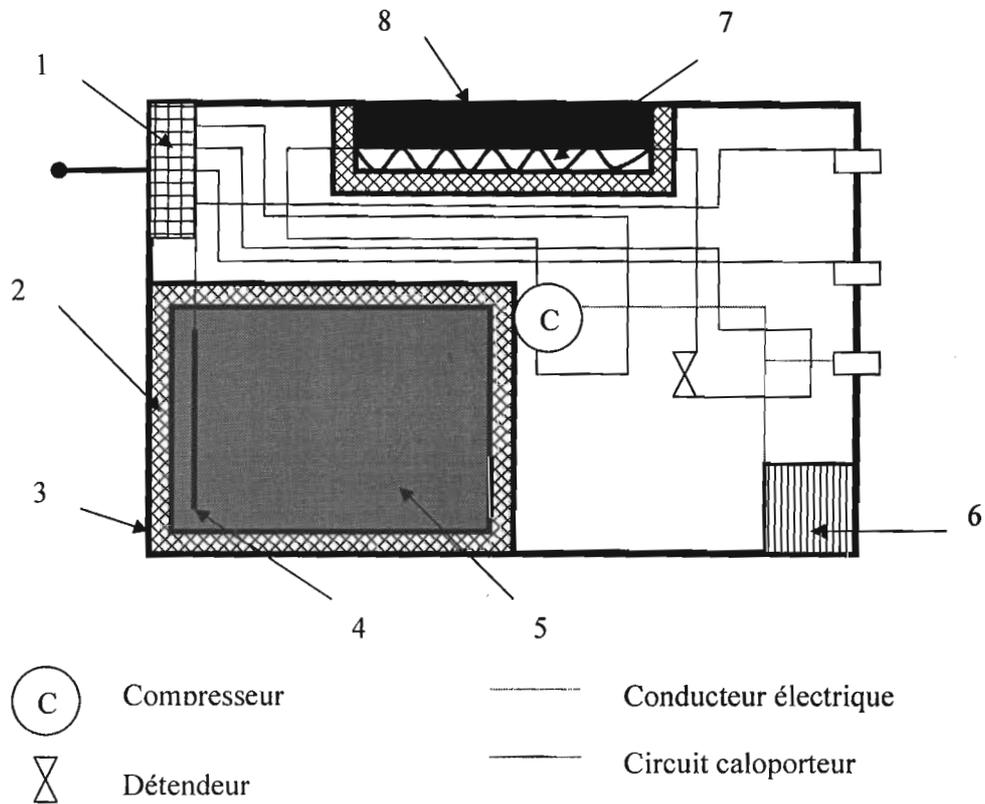


Figure 2.11 : Croquis de la solution n°18

Tableau 2.15 : Caractéristiques de la solution n°18

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Commande	-
2	Isolant	Laine de verre
3	Corps	Tôle d'acier
4	Serpentin	Cuivre
5	Matériau de stockage	Paraffine wax
6	Batterie rechargeable	-
7	Serpentin	Cuivre
8	Plaque chauffante	Acier inox

Mode de fonctionnement :

Même fonctionnement que la solution n°8 seule la forme de la cuisinière a été changé.

Solution n°19 :

Croquis :

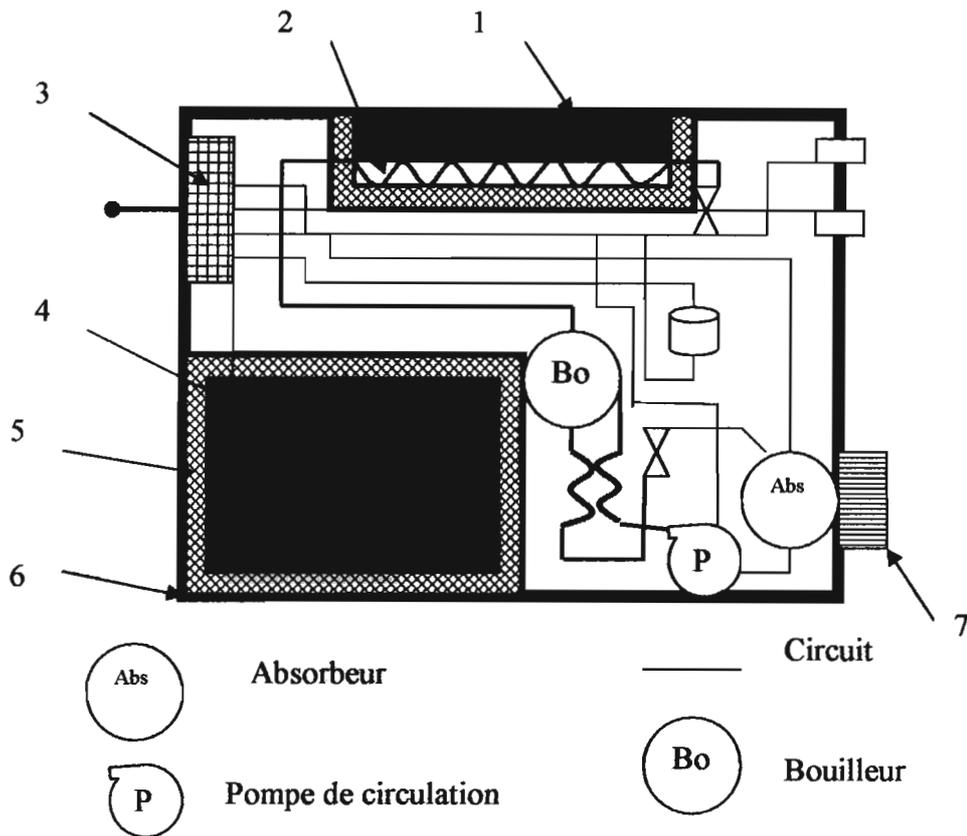


Figure 2.12 : Croquis de la solution n°19

Tableau 2.16 : Caractéristiques de la solution n°19

Pièce		Matériau
Numéro	Nom	
1	Plaque chauffante	Acier inox
2	Serpentin	Cuivre
3	Commande	-
4	Serpentin	Cuivre
5	Isolant	Laine de verre
6	Corps	Tôle d'acier
7	Ailettes	Aluminium

Mode de fonctionnement :

Même fonctionnement que la solution n°9 seule la forme de la cuisinière a été changée.

b) Hypothèses communes aux solutions

- Nous utiliserons des tôles de 1mm d'épaisseur car il n'y a pas de contraintes mécaniques appliquées aux cuisinières.
- Nous admettrons des pertes thermiques de 5% pour tout le système en 5 heures.

c) Evaluation de la capacité de stockage de chaleur

La capacité de stockage, pour les solutions n°1, 6, 11 et 16 est donnée [3] par :

$$Q_{st} = \left(\frac{2.67 - N_d}{2.67} \right) \times \beta \times P_m \quad (13)$$

Où :

P_m est la charge maximale

N_d = nombre d'heures pendant lequel l'énergie est consommée directement

β = coefficient d'exploitation journalière

Par conséquent on a :

$$N_d = 1h$$

$$P_m = 1,9kW$$

$$\beta = 2.67 h$$

$$Q_{st} = 0.78kWh$$

Pour les solutions n°3, 4, 8, 9, 13, 14, 18 et 19, la capacité de stockage est exprimée [3] par :

$$Q_{st} = \frac{\varepsilon \times (24 - N) \times n \times P_m}{N + \varepsilon \times (24 - N)} \quad (14)$$

Où :

N = nombre d'heures d'exploitation

ε = coefficient de réduction de puissance

n = équivalent journalier en heures de fonctionnement

Donc pour :

$$N = 2.67 \text{ heures}$$

$$\varepsilon = 0.82$$

$$n = 1.335 \text{ heures}$$

$$Q_{st} = 0.54kWh$$

d) Evaluation de la masse du matériau de stockage

La capacité de stockage est aussi exprimée pour une utilisation directe de la chaleur par :

$$Q_{st} = m_{st} L \Delta T \quad (15)$$

D'où on a :

$$m_{st} = \frac{Q_{st}}{L} \quad (16)$$

On a donc :

La masse de l'érythritol utilisé dans les solutions n°1, 6, 11 et 16 est donnée par :

$$m_{st} = 8.2kg$$

La masse de la paraffine wax utilisée dans les solutions n°3, 4, 8, 9, 13, 14, 18 et 19 est donnée par :

$$m_{st} = 11.20kg$$

e) *Evaluation du volume occupé par le matériau de stockage*

Le volume de stockage est donné par la relation suivante :

$$V_{st} = \frac{m_{st}}{\rho_{st}} \quad (17)$$

ρ_{st} = masse volumique du matériau à l'état liquide

Nous obtenons par conséquent :

- pour l'érythritol

$$\rho_{st} = 1300kg / m^3$$

$$\text{et } V_{st} = 0.006m^3$$

- pour la paraffine wax

$$\rho_{st} = 888.5kg / m^3$$

$$\text{Et } V_{st} = 0.013m^3$$

f) *choix du fluide frigorigènes*

Les fluides frigorigènes ont pour rôle d'assurer les transferts thermiques entre l'évaporateur et le condenseur. Pour cela ils doivent répondre à un certain nombre de critères :

- ✓ thermodynamiques (obtention du rendement optimal, températures d'évaporation et de condensation comprises entre le point triple et le point critique),
- ✓ de sécurité (toxicité, inflammabilité),
- ✓ techniques (action sur le milieu à refroidir, les matériaux constitutifs de la machine et les huiles de graissage),
- ✓ économiques et écologiques.

Ainsi, nous choisirons le R113 comme fluide frigorigène.

g) *Evaluation des dimensions de l'appareil*

Solution n°1 :

- Calcul de la plaque chauffante

Afin de préparer les repas pour le nombre de personne fixé, nous avons choisi les dimensions suivantes pour la plaque chauffante :

$$D = 300mm$$

$$h = 100mm$$

Où D est le diamètre de la pièce et h sa hauteur.

- Calcul de la pièce contenant le caloporteur

Pour déterminer les dimensions de cette pièce, nous partons des besoins en énergie nécessaire pour cuire les aliments de jour comme de nuit. Cette quantité de chaleur doit être apportée par le caloporteur élevé à une température de 125°C pendant une durée de 10 heures (durée d'ensoleillement). Ainsi

$$Q_j = \rho V C_p \Delta T \quad (18)$$

Où :

ρ = masse volumique du caloporteur

V = volume du caloporteur

C_p = capacité calorifique du caloporteur

ΔT = différence entre la température d'entrée et de sortie du caloporteur dans la cuisinière

$$\Delta T = (T_e - T_s)$$

T_e = température d'entrée du caloporteur

T_s = température de sortie du caloporteur

De cette relation, on tire le volume du caloporteur

$$V = \frac{Q_j}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T} \quad (19)$$

Application numérique :

Le caloporteur est de l'eau, donc

$$\rho = 1000kg / m^3$$

$$Q_j = 1.24kWh$$

$$C_p = 4.18kJ / kg \cdot ^\circ C$$

$$\Delta T = 30^\circ C$$

D'où :

$$V = \frac{1.24 \times 3600}{1000 \times 4.18 \times 30}$$

$$V = 0.036m^3$$

Soit

$$V = 36l$$

Nous en déduisons le débit volumique par la relation

$$\dot{m} = \frac{V}{\Delta t} \quad (20)$$

Δt = durée de circulation du fluide

Nous avons alors, pour $\Delta t = 10$ heures :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{36}{10} \\ \dot{m} &= 3.6l/h \end{aligned}$$

Ainsi nous prendrons pour volume occupé par le caloporteur 3.6 l

Connaissant le volume, nous en déduisons le diamètre D_1 et la hauteur h_1 de la pièce contenant le caloporteur.

Le volume est donné par :

$$V = \frac{\pi}{4} (D_1^2 \cdot h_1 - D^2 \cdot h) \quad (21)$$

D'où :

$$D_1 = \sqrt{\frac{1}{h_1} \left(\frac{4V}{\pi} + D^2 h \right)} \quad (22)$$

Pour obtenir D_1 et h_1 de telle sorte que $\frac{D_1 - D}{2} = h_1 - h$, nous procéderons à une itération.

Ainsi, nous aurons :

$$\begin{aligned} D_1 &= 338mm \\ h_1 &= 119mm \end{aligned}$$

- Calcul de la pièce contenant l'érythritol

Le volume d'érythritol étant calculé nous avons le diamètre qui est donné par

$$D_2 = \sqrt{\frac{1}{h_2} \left(\frac{4V_{st}}{\pi} + D_1^2 h_1 \right)} \quad (23)$$

D'où :

$$\begin{aligned} D_2 &= 388mm \\ h_2 &= 144mm \end{aligned}$$

- Calcul de l'isolant

Nous considérerons les pertes provenant de l'énergie stockée par l'érythritol. Si pour une durée de stockage de 9 heures, on a des pertes de chaleur de 5%, alors nous calculons le flux sortant à travers l'isolant par la relation :

- le flux à travers la partie cylindrique

$$q = \frac{5\% \cdot Q_{st}}{\Delta t} = \frac{T_i - T_0}{\frac{1}{\bar{h}_{c0} \cdot \pi D_0 h_2} + \frac{\ln(D_0/D_2)}{2\pi k h_2} + \frac{\ln(D_2/D_1)}{2\pi k' h_2}} \quad (24)$$

- le flux à travers la base

$$q = \frac{T_i - T_0}{\frac{1}{\bar{h}_{c0} \cdot \frac{\pi D_2^2}{4}} + \frac{h_0 - h_2}{k \cdot \frac{\pi D_2^2}{4}} + \frac{h_2 - h_1}{k' \cdot \frac{\pi D_2^2}{4}}} \quad (25)$$

Où :

D0 = diamètre extérieur de l'isolant

Δt = durée de stockage

Ti = température de l'érythritol

T0 = température de l'air ambiant

K = conductivité de l'isolant

K' = conductivité de l'érythritol

\bar{h}_{c0} = coefficient de convection de l'air

En négligeant les résistances thermiques de l'air et de l'érythritol par rapport à celle de la laine de verre nous aurons

- pour la partie cylindrique

$$q = \frac{T_i - T_0}{\frac{\ln(D_0/D_1)}{2\pi k h_2}} \quad (26)$$

- pour la base

$$q = \frac{T_i - T_0}{\frac{h_0 - h_2}{k \cdot \frac{\pi D_2^2}{4}}} \quad (27)$$

Posons

$$R = \frac{\ln(D_0/D_2)}{2\pi k h_2} = \frac{h_0 - h_2}{k \cdot \frac{\pi D_2^2}{4}} = \frac{T_i - T_0}{q} \quad (28)$$

Nous chercherons à exprimer la conductivité en fonction des paramètres que nous avons pour en déduire l'isolant qu'il faut. Ainsi, nous avons

Pour la partie cylindrique

$$k = \frac{\ln(D_0/D_2)}{2\pi R h_2} \quad (29)$$

Pour la base

$$k = \frac{h_0 - h_2}{R \frac{\pi D_2^2}{4}} \quad (30)$$

Si nous utilisons la laine de verre comme isolant, on a $k = 0.041$

Pour $T_i = 118^\circ\text{C}$

$T_0 = 25^\circ\text{C}$

$\Delta t = 5$ heures

Nous avons :

Pour le flux de chaleur q ,

$$q = \frac{5\% \times 0.78 \cdot 10^3}{5}$$

$$q = 7.77\text{W}$$

Pour la résistance R ,

$$R = \frac{120 - 25}{7.77}$$

$$R = 12.23^\circ\text{C} / \text{W}$$

Pour cause d'encombrement, nous fixerons l'épaisseur de l'isolant égale à 60 mm. Nous obtenons

Pour la partie cylindrique

$$k = \frac{\ln(546/388)}{2 \times \pi \times 11.97 \times 0.144}$$

$$k = 0.025\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$$

Pour la base

$$k = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{12.23 \times \frac{\pi \times (388 \cdot 10^{-3})^2}{4}}$$

$$k = 0.042\text{W} / ^\circ\text{C} \cdot \text{m}$$

L'isolant dont le coefficient de conductivité est plus proche des valeurs trouvées est la mousse de polyuréthane en bombe.

- Calcul du couvercle

En ce qui concerne le couvercle nous choisirons les dimensions tel qu'il ait le même diamètre extérieur, la même épaisseur d'isolant que le corps de cuisinière.

Solution n°3 :

- Calcul de la pièce contenant la paraffine

Pour le dimensionnement de cette pièce, nous choisirons un diamètre intérieur D_1 et une hauteur h_0 de telle sorte que les appareils puissent être placés à l'intérieur. Ainsi, nous prendrons

$$D_1 = 200mm$$

$$h_0 = 180mm$$

Le diamètre extérieur est alors donné par la relation

$$D_0 = \sqrt{D_1^2 + \frac{4V_{st}}{\pi h_0}} \quad (31)$$

En remplaçant D_1 , V_{st} et h_0 par leurs valeurs, nous avons

$$D_0 = \sqrt{(200 \cdot 10^{-3})^2 + \frac{4 \times 0.01}{\pi \times 180 \cdot 10^{-3}}}$$

$$D_0 = 359mm$$

- Calcul de l'isolant de la pièce contenant la paraffine

Le flux de chaleur à travers l'isolant est donné par

$$q = \frac{5\% Q_{st}}{\Delta t} \quad (32)$$

Où :

Δt = durée pendant laquelle l'isolant est traversé par ce flux

Q_{st} = chaleur stockée

Ainsi pour $Q_{st} = 0.54kWh$ et $\Delta t = 5heures$, nous aurons

$$q = \frac{5\% \times 0.54}{5}$$

$$q = 5.40W$$

Nous avons aussi le flux qui est exprimé par la relation suivante

$$q = \frac{T_i - T_0}{R} \quad (33)$$

T_i = température du matériau de stockage

T_0 = température de l'air ambiant

R = résistance thermique de l'isolant

De cette relation nous pouvons tirer la résistance,

$$R = \frac{T_i - T_0}{q} \quad (34)$$

Donc pour $T_i = 64^\circ C$ et $T_0 = 25^\circ C$ nous aurons

$$R = \frac{64 - 25}{5.40}$$

$$R = 7.22^\circ\text{C} / \text{W}$$

La résistance est exprimée par

$$R = \frac{\ln(D_i/D_0)}{2\pi kh_0} \quad (35)$$

Par conséquent

$$e = \frac{D_i - D_0}{2} = \frac{e^{2\pi kh_0 R} - 1}{2} D_0 \quad (36)$$

e = épaisseur de l'isolant

Si nous choisissons comme isolant la laine de verre nous aurons $k = 0.041 \text{ W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ et

$$e = \frac{e^{2 \times \pi \times 0.041 \times 0.1 \times 7.22} - 1}{2} \times 359$$

$$e = 71 \text{ mm}$$

- Calcul du diamètre extérieur du corps de la cuisinière

Le diamètre extérieur du corps de la cuisinière est donné par

$$D_{\text{ext}} = D_0 + 2e$$

$$= 359 + 2 \times 71$$

$$D_{\text{ext}} = 501 \text{ mm}$$

Compte tenu des appareils qui seront logés à l'intérieur nous prenons une hauteur

$$h = 400 \text{ mm}$$

- Calcul de la plaque chauffante

Selon la puissance thermique désirée nous calculons en conséquence la surface de la plaque chauffante. Supposons que la puissance thermique est de 1 kW. Nous avons la puissance qui est donnée par

$$P = \frac{T_i - T_0}{R} \quad (37)$$

T_i = température du caloporteur

T_0 = température de l'air ambiant

R = résistance thermique de la plaque

D'où :

$$R = \frac{T_i - T_0}{P} \quad (38)$$

D'autre part

$$R = \frac{e}{kS} \quad (39)$$

e = épaisseur de la plaque

k = conductivité thermique de la plaque

S = surface d'échange de la plaque

Par conséquent, la surface d'échange est donnée par

$$S = \frac{e}{kR} \quad (40)$$

En application numérique, nous avons pour

$$T_i = 200^\circ C$$

$$T_0 = 25^\circ C$$

Si la plaque est en acier inoxydable, nous avons $k = 14.4 W / m \cdot K$

Et pour une épaisseur de $e = 20mm$, nous aurons

$$R = \frac{200 - 25}{1000}$$
$$R = 0.175 K / W$$

Par suite

$$S = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{14.4 \times 0.175}$$
$$S = 7937 mm^2$$

Si nous choisissons une plaque de forme circulaire puisque cette forme est la mieux adaptée aux types de marmites utilisés, nous aurons si nous appelons D le diamètre

$$S = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (41)$$

Par conséquent

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$$
$$= \sqrt{\frac{4 \times 7937}{\pi}}$$
$$D = 101 mm$$

- Calcul de la pièce contenant le caloporteur

Ici le caloporteur est à une température de $200^\circ C$ pendant toute la durée de l'ensoleillement.

Si le caloporteur est de l'eau, nous aurons

$$\rho = 1000 kg / m^3$$

$$Q_j = 0.62 kWh$$

$$C_p = 4.18 kJ / kg \cdot ^\circ C$$

$$\Delta T = 30^\circ C$$

$$V = \frac{0.62 \times 3600}{1000 \times 4.18 \times 30}$$

$$V = 0.018 m^3$$

Soit

$$V = 18l$$

$$\dot{m} = \frac{18}{10}$$

$$\dot{m} = 1.8l/h$$

Ainsi le volume occupé par le caloporteur est de 1.8 l. par conséquent

$$D_1 = 103mm$$

$$h_1 = 21mm$$

- Calcul de l'isolant de la pièce contenant le caloporteur

Si au passage du caloporteur dans cette pièce nous observons une chute de température de 1°C, nous aurons

le flux de chaleur donné par la relation :

$$q = \rho \dot{m} C_p \Delta T \quad (42)$$

$$= 1 \times \frac{1.8}{3600} \times 4.18 \times 1000 \times 1$$

$$q = 2.09W$$

Puis la résistance thermique donnée par :

$$R = \frac{T_i - T_0}{q} \quad (43)$$

$$= \frac{200 - 25}{2.09}$$

$$R = 83.73^\circ C / W$$

D'où l'épaisseur de l'isolant

$$e = \frac{e^{2\pi k h R} - 1}{2} D_1 \quad (44)$$

$$= \frac{e^{2 \times \pi \times 0.041 \times 0.021 \times 83.73} - 1}{2} \times 103$$

$$e = 30mm$$

Solution n°4 :

Les dimensions des pièces de cette solution sont les même que celles des pièces de la solution n°3 sauf que ici le compresseur est remplacé par le système bouilleur absorbeur. Par conséquent nous dimensionnerons uniquement le bouilleur et l'absorbeur dans cette section.

- Calcul de la puissance du groupe à absorption

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{5}{100 + N} \cdot n \cdot P_m & (45) \\
 &= \frac{5}{100 + 2.67} \times 1.335 \times 0.5 \\
 P &= 0.03 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Solution n°6 :

- Calcul de la plaque chauffante

Nous prendrons les mêmes dimensions que la solution n°1. Par conséquent

$$\begin{aligned}
 D &= 300 \text{ mm} \\
 h &= 100 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- Calcul du serpentin

Le flux de chaleur à travers le serpentin est donné par

$$q = \frac{T_i - T_0}{\frac{1}{\bar{h}_c 2\pi r_1 l} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 l}} \quad (46)$$

T_i = température de l'eau dans le serpentin

T_0 = température de la plaque chauffante

\bar{h}_c = coefficient de convection de l'eau

l = longueur du serpentin

k_1 = conductivité du serpentin

r_1 = rayon intérieur du serpentin

r_2 = rayon extérieur du serpentin

Le flux de chaleur à travers le serpentin est aussi donné par

$$q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (47)$$

\dot{m} = débit massique d'eau

C_p = chaleur massique de l'eau

ΔT = chute de température entre entrée et sortie de l'eau

Puisque la quantité de chaleur que doit céder l'eau au bout de 10 heures est Q_j , alors

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{Q_j}{\Delta t} & (48) \\
 &= \frac{1.24}{10} \\
 q &= 0.124 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Par conséquent, pour une variation de température entre les températures d'entrée et de sortie, nous avons le flux qui est donné par :

$$q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (49)$$

Par suite, le débit massique est donné par :

$$\dot{m} = \frac{q}{C_p \Delta T} \quad (50)$$

Ainsi, pour $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ et si le fluide utilisé est de l'eau, on a :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{0.124}{4.28 \times 30} \\ \dot{m} &= 0.97 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

De la formule du débit massique exprimée par :

$$\dot{m} = \rho v \left(\pi \frac{D^2}{4} \right) \quad (51)$$

Nous déduisons le diamètre du serpent in par l'expression

$$D = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi \rho v}} \quad (52)$$

Pour une vitesse de 3 m/s, nous avons

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{\frac{4 \times 0.97}{\pi \times 935 \times 3}} \\ D &= 21 \text{ mm} \end{aligned}$$

Le flux de chaleur à travers le serpent in est donné par

$$q = \frac{T_i - T_0}{\frac{1}{\bar{h}_c \pi D l} + \frac{\ln(D_{\text{ext}}/D)}{2\pi k l}} \quad (53)$$

T_i = température du fluide

T_0 = température à la surface extérieur du serpent in

\bar{h}_c = coefficient de convection

D = diamètre intérieur du serpent in

l = longueur du serpent in

D_{ext} = diamètre extérieur du serpent in

k = conductivité du serpent in

Ainsi, la longueur du serpent in est donnée par

$$l = q \left(\frac{T_i - T_0}{\frac{1}{\bar{h}_c \pi D} + \frac{\ln(D_{\text{ext}}/D)}{2\pi k}} \right)^{-1} \quad (54)$$

Pour cela, nous déterminerons d'abord le coefficient de convection. Ainsi, nous savons que

$$\bar{h}_c = \frac{k' N_{ud}}{D} \quad (55)$$

Où N_{ud} est un nombre adimensionnel appelé nombre de Nusselt et k' la conductivité du fluide.

Pour déterminer le nombre de Nusselt, nous devons connaître le type de régime 'écoulement du fluide. Pour cela, nous allons calculer le nombre de Reynolds qui est donné par :

$$R_{ed} = \frac{vD}{\nu} \quad (56)$$

v = vitesse du fluide

ν = viscosité cinématique du fluide

Ainsi, nous avons

$$R_{ed} = \frac{3 \times 21 \cdot 10^{-3}}{2.64 \cdot 10^{-7}}$$

$$R_{ed} = 2.4 \cdot 10^5$$

Puisque $R_{ed} > 10^5$, alors le régime est turbulent. Par conséquent le nombre de Nusselt est donné par :

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.33} \quad (57)$$

Par suite

$$\bar{h}_c = 0.023 \frac{k'}{D} Re_D^{0.8} Pr^{0.33} \quad (58)$$

Pour l'eau nous avons $Pr = 1.55$ et $k' = 0.678 W / mK$, d'où

$$\bar{h}_c = 0.023 \times \frac{0.678}{21 \cdot 10^{-3}} \times (2.4 \cdot 10^5)^{0.8} \times (1.55)^{0.33}$$

$$\bar{h}_c = 360.5 W / m^2 K$$

Pour $T_i = 125^\circ C$ et $T_0 = 124^\circ C$, nous avons

$$l = 124 \times \left(\frac{125 - 124}{\frac{1}{360.5 \times \pi \times 21 \cdot 10^{-3}} + \frac{\ln(23/21)}{2 \times \pi \times 392.3}} \right)^{-1}$$

$$l = 5234 mm$$

- Calcul de la pièce contenant l'érythritol

Nous savons que le volume d'érythritol est donné d'après le schéma de la solution par

$$V_{st} = \frac{\pi D_2^2}{4} h_2 - \frac{\pi D_1^2}{4} h_1 \quad (59)$$

$$= \frac{\pi}{4} (D_2^2 \cdot h_2 - D_1^2 \cdot h_1)$$

D_2 = diamètre de la pièce contenant l'érythritol

h_2 = hauteur " " " " "

D_1 = diamètre de la pièce contenant le caloporteur

h_1 = hauteur " " " " "

De cette relation nous déduisons le diamètre de la pièce pour une hauteur donnée par

$$D_2 = \sqrt{\frac{1}{h_2} \left(\frac{4V_{st}}{\pi} + D_1^2 h_1 \right)} \quad (60)$$

D'où, pour une hauteur $h_2 = 130mm$, nous aurons

$$D_2 = \sqrt{\frac{1}{130} \left(\frac{4 \times 0.006 \cdot 10^6}{\pi} + 300^2 \times 100 \right)}$$

$$D_2 = 358mm$$

- Calcul de l'isolant

Le flux de chaleur est donné par

$$q_p = \frac{5\% Q_{st}}{\Delta t}$$

$$= \frac{5\% \times 0.78}{5}$$

$$q_p = 7.8W$$

La résistance thermique de l'isolant est exprimée d'une part par

$$R = \frac{T_i - T_0}{q_p} \quad (61)$$

Pour $T_i = 118^\circ C$ et $T_0 = 25^\circ C$, nous avons

$$R = \frac{118 - 25}{7.8}$$

$$R = 11.92^\circ C / W$$

Et d'autre part par

$$R = \frac{\ln(D_i / D_2)}{2\pi k h_2} \quad (62)$$

De cette relation, nous tirons la conductivité k de l'isolant

$$k = \frac{\ln(D_i / D_2)}{2\pi R h_2} \quad (63)$$

Où D_i est le diamètre extérieur de l'isolant

Si nous fixons une épaisseur d'isolant de 50 mm, nous aurons

$$D_i = D_2 + 2e$$

$$= 358 + 2 \times 50$$

$$D_i = 458mm$$

Par conséquent

$$k = \frac{\ln(458/358)}{2 \times \pi \times 11.92 \times 130 \cdot 10^{-3}}$$

$$k = 0.025W / mK$$

Cette valeur de la conductivité est plus proche de celui de la mousse de polyuréthane en bombe.

Solution n°8 :

Les calculs sont les mêmes que pour la solution n°3 sauf que ici à la place de la cavité, nous avons mis un serpentin. Par conséquent, dans cette section nous ne calculerons que la serpentin. Ainsi,

Le flux de chaleur véhiculé par le serpentin est

$$\begin{aligned} q &= \frac{Q_j}{\Delta t} & (64) \\ &= \frac{0.62}{2.67} \\ q &= 0.23kW \end{aligned}$$

D'où le débit massique est donné par :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{q}{C_p \Delta T} & (65) \\ &= \frac{0.23}{4.28 \times 30} \\ \dot{m} &= 1.81kg/s \end{aligned}$$

Si nous choisissons une vitesse de circulation du fluide de 5,5 m/s, le diamètre du serpentin qui sera donné par :

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi\rho v}} & (66) \\ &= \sqrt{\frac{4 \times 1.81}{\pi \times 935 \times 5.5}} \\ d &= 21mm \end{aligned}$$

Le nombre de Reynolds est égal à :

$$\begin{aligned} Re &= \frac{vd}{\nu} & (67) \\ &= \frac{5.5 \times 21 \cdot 10^{-3}}{2.64 \cdot 10^{-7}} \\ Re &= 4.4 \cdot 10^5 \end{aligned}$$

Donc, nous sommes en présence d'un régime turbulent. D'où le coefficient de convection est égal à :

$$\bar{h}_c = 0.023 \frac{k'}{d} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.33} \quad (68)$$

$$= 0.023 \times \frac{0.678}{21 \cdot 10^{-3}} \times (4.4 \cdot 10^5)^{0.8} \times (1.55)^{0.33}$$

$$\bar{h}_c = 590.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Par conséquent le longueur du serpentin est donne par :

$$l = q \left(\frac{T_i - T_0}{\frac{1}{\bar{h}_c \pi D} + \frac{\ln(D_{ext}/D)}{2\pi k}} \right)^{-1} \quad (69)$$

$$= 230 \times \left(\frac{200 - 198}{\frac{1}{590.5 \times \pi \times 21 \cdot 10^{-3}} + \frac{\ln(23/21)}{2 \times \pi \times 392.3}} \right)^{-1}$$

$$l = 2962 \text{ mm}$$

Solution n°9 :

Mêmes calculs que la solution n°8 sauf pour le compresseur qui est remplacé par le groupe à absorption qui est le même que celui de la solution n°4.

Solution n°11 :

- Calcul de la plaque chauffante

Nous choisissons les dimensions suivantes :

Hauteur : 100 mm

Longueur : 300 mm

Largeur : 300 mm

- Calcul de la pièce contenant le caloporteur

Le flux de chaleur est égal à :

$$q = \frac{Q_j}{\Delta t} \quad (70)$$

$$= \frac{1.24}{10}$$

$$q = 0.124 \text{ kW}$$

Le débit massique est :

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \frac{q}{C_p \Delta T} & (71) \\ &= \frac{0.124}{4.18 \times 30} \\ \dot{m} &= 3.6 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

Si nous choisissons une vitesse de circulation du fluide de 5 m/s, nous aurons la section du conduit qui sera donnée par :

$$\begin{aligned}S &= \frac{\dot{m}}{\rho v} & (72) \\ &= \frac{3.6}{1000 \times 5} \\ S &= 7.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2\end{aligned}$$

L'épaisseur de la lame d'eau est donnée par :

$$\begin{aligned}e &= \frac{S}{l} & (73) \\ &= \frac{7.1 \cdot 10^{-4} \times 1 \cdot 10^6}{300} \\ e &= 2 \text{ mm}\end{aligned}$$

La largeur qui est égale à la longueur est de :

$$\begin{aligned}l_2 &= l + 2e \\ &= 300 + 2 \times 2 \\ l_2 &= 304 \text{ mm}\end{aligned}$$

La hauteur est donnée par :

$$\begin{aligned}h_2 &= h + e \\ &= 100 + 2 \\ h_2 &= 102 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Calcul de la pièce contenant l'érythritol

Pour une hauteur de 125 mm, nous avons une largeur de

$$\begin{aligned}l_3 &= \sqrt{\frac{1}{h_3} (V_{st} + l_2^2 h_2)} & (74) \\ &= \sqrt{\frac{1}{125} \times (0.006 \cdot 10^6 + 305^2 \times 102)} \\ l_3 &= 352 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Calcul de l'isolant

Le flux de chaleur perdue

$$\begin{aligned}
 q_p &= 5\% \frac{Q_{st}}{\Delta t} & (75) \\
 &= 5\% \times \frac{0.78 \cdot 10^3}{10} \\
 q_p &= 7.8W
 \end{aligned}$$

La résistance thermique de l'isolant

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{T_i - T_0}{q_p} & (76) \\
 &= \frac{118 - 25}{7.8} \\
 R &= 11.92^\circ C/W
 \end{aligned}$$

Si nous choisissons la laine de verre comme isolant, l'épaisseur sera donnée par :

$$\begin{aligned}
 e &= kRl_3^2 h_3 & (77) \\
 &= 0.041 \times 11.92 \times (352 \cdot 10^{-3})^2 \times 125 \cdot 10^{-3} \\
 e &= 22mm
 \end{aligned}$$

Solution n°13 :

- Calcul de la pièce contenant la paraffine

Si la longueur, la largeur et la hauteur sont choisies de telle sorte qu'elles soient égales alors

$$\begin{aligned}
 l &= \sqrt[3]{V_{st}} & (78) \\
 &= \sqrt[3]{0.013 \cdot 10^6} \\
 l &= h = 235mm
 \end{aligned}$$

- Calcul de l'isolant de la pièce contenant la paraffine

Le flux de chaleur perdue est :

$$\begin{aligned}
 q_p &= \frac{5\% \times 0.54 \cdot 10^3}{5} \\
 q_p &= 5.4W
 \end{aligned}$$

La résistance thermique de l'isolant est :

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{64 - 25}{5.4} \\
 R &= 7.22^\circ C/W
 \end{aligned}$$

L'épaisseur de l'isolant (laine de verre) est :

$$\begin{aligned}
 e &= 0.041 \times 7.22 \times (235 \cdot 10^{-3})^2 \times 10^3 \\
 e &= 16mm
 \end{aligned}$$

- Calcul du corps de la cuisinière

Si l'encombrement de la batterie et du compresseur est de 220 mm, nous aurons la longueur du corps de la cuisinière qui sera donnée par

$$l = 16 \times 2 + 235 + 220$$

$$l = 488 \text{ mm}$$

Nous choisirons une hauteur, en tenant compte des encombrements de la plaque chauffante et des appareils placés à l'intérieur, de 400 mm

- Calcul de la plaque chauffante

Pour une épaisseur de 20 mm, le diamètre de la plaque est égal à

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (79)$$

Où :

S = surface d'échange de la plaque

Or cette surface est donnée par :

$$S = \frac{e}{kR} \quad (80)$$

e = épaisseur de la plaque

k = conductivité de la plaque

R = résistance thermique de la plaque

Pour une puissance thermique de 1 kW, la résistance thermique de la plaque est donnée par

$$R = \frac{200 - 25}{1000}$$

$$R = 0.18^\circ\text{C}/\text{W}$$

D'où

$$S = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{14.4 \times 0.18} \times 10^6$$

$$S = 7937 \text{ mm}^2$$

et

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 7937}{\pi}} \quad (81)$$

$$D = 101 \text{ mm}$$

- Calcul de la pièce contenant le caloporteur

Le débit massique est de :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{Q_j}{C_p \Delta T} & (82) \\ &= \frac{0.62}{4.28 \times 2.67 \times 30} \times 3600 \\ \dot{m} &= 6.51 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

Pour une vitesse de 10 m/h et une hauteur de 22 mm, le diamètre est donné par :

$$\begin{aligned} D' &= \sqrt{\frac{4\dot{m}}{\pi \rho v} + D^2} & (83) \\ &= \sqrt{\frac{4 \times 6.51}{\pi \times 935 \times 10} + (101 \cdot 10^{-3})^2} \times 1000 \\ D' &= 105 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Calcul de l'isolant de la pièce contenant le caloporteur

Le flux de chaleur perdue est de :

$$\begin{aligned} q_p &= \dot{m} C_p \Delta T & (84) \\ &= \frac{6.51 \times 4.28 \times 1000}{3600} \\ q_p &= 12 \text{ W} \end{aligned}$$

La résistance thermique est de :

$$\begin{aligned} R &= \frac{200 - 25}{12} \\ R &= 15.07^\circ\text{C/W} \end{aligned}$$

En utilisant de la laine de verre, nous avons une épaisseur de :

$$\begin{aligned} e &= D \frac{e^{2\pi h R} - 1}{2} & (85) \\ &= 105 \times \frac{e^{2 \times \pi \times 0.041 \times 22 \cdot 10^{-3} \times 15.07} - 1}{2} \\ e &= 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Calcul du compresseur frigorifique

La puissance frigorifique est de :

$$P = P_m = 0.5 \text{ kW}$$

La puissance absorbée est donnée par :

$$W = \frac{P_m}{m \frac{T_c}{T_c - T_f}} & (86)$$

Où :

T_c = température du condenseur

T_f = température de l'évaporateur

m = rendement de la machine compris entre 0.5 et 0.7

$$W = \frac{0.5}{\frac{200+273}{200-60}}$$
$$W = 0.3kW$$

Solution n°14 :

Les calculs de cette solution sont les mêmes que ceux de la solution n°13 sauf que à la place du compresseur mécanique nous avons un compresseur thermique. Ce groupe à absorption est le même que celui de la solution n°4.

Solution n°16 :

- La plaque chauffante a pour dimensions :

Longueur : 300 mm

Largeur : 300 mm

Hauteur : 100 mm

- Calcul du serpentin

Les calculs du serpentin sont les mêmes que ceux de la solution n°6. D'où :

Diamètre intérieur : 21 mm

Longueur : 5234 mm

Diamètre extérieur : 23 mm

- Calcul de la pièce contenant l'érythritol

Pour une hauteur de 124 mm, nous avons une largeur qui est égale à la longueur donnée par :

$$l_1 = \sqrt{\frac{1}{h_1}(V_{\alpha} + l^2 h)} \quad (87)$$
$$= \sqrt{\frac{1}{124} \times (0.006 \cdot 10^6 + 300^2 \times 100)}$$
$$l_1 = 348mm$$

- Calcul de l'isolant

Le flux de chaleur perdu (calculé précédemment)

$$q_p = 7.8W$$

La résistance thermique (calculé précédemment)

$$R = 11.92^{\circ}C / W$$

Si nous choisissons la laine de verre, l'épaisseur d'isolant sera donnée par

$$e = 0.041 \times 11.92 \times (348 \cdot 10^{-3}) \times (124 \cdot 10^{-3}) \times 1000$$

$$e = 21mm$$

Solution n°18 :

Seul le serpentín est ajouté par rapport à la solution n°13 d'après les calculs effectués précédemment à la solution n°8, on aura la même longueur et le même diamètre de serpentín.

Solution n°19 :

Seul le serpentín est ajouté par rapport à la solution n°14 d'après les calculs effectués précédemment à la solution n°9, on aura la même longueur et le même diamètre de serpentín.

h) Evaluation du coût de fabrication

Le coût de fabrication se compose essentiellement :

- du coût des tôles

Une tôle de 2 m²x1mm coûte 15000 FCFA. Ainsi, pour déterminer le coût des tôles utilisées dans chaque solution, nous calculons la surface de tôle utilisée puis nous la multiplions par le prix unitaire de tôle.

- du coût du compresseur pour les solutions avec compresseur

Pour ce qui est du compresseur, il y en a deux types :

- o un compresseur mécanique qui coûte environ 50000 FCFA
- o et un compresseur thermique qui coûte environ 75000 FCFA

- du coût des conduits

Les conduits coûtent environ 5190 FCFA le mètre. Le coût des conduits de chaque solution est obtenu après un calcul préalable de la longueur de conduits.

- du coût du matériau de stockage

- o l'érythritol coûte 1150 FCFA le kg
- o la paraffine, 2780 FCFA le kg

- du coût de l'isolant.

- o pour une épaisseur de 60 mm, la mousse de polyuréthane en bombe coûte 4000 FCFA le m²
- o et pour 21 mm d'épaisseur, le m² de laine de verre coûte 2000 FCFA

- du coût de la batterie pour les solutions avec compresseur mécanique. la batterie coûte 15000 FCFA.

Pour ne pas être trop long, nous ne présenterons pas les détails de calculs relatifs aux différents coûts présentés ci-dessus.

Ainsi nous obtenons le tableau suivant qui récapitule les résultats obtenus.

Tableau 2.13 : Tableau récapitulatif des coûts de fabrication

Solution	coût des tôles	coût du compresseur	coût des conduits	coût de la batterie	coût du matériau de stockage	coût de l'isolant	Coût de fabrication en FCFA
Solution n°1	30000	-	-	-	9430	4013	43443
Solution n°3	32400	50000	15570	15000	31136	9080	153186
Solution n°4	32400	75000	15570	-	31136	9080	163186
Solution n°6	15000	-	27507	-	9430	1823	53760
Solution n°8	30000	50000	30640	15000	31136	9080	168756
Solution n°9	30000	75000	30640	-	31136	9080	178756
Solution n°11	30000	-	-	-	9430	2006	41437
Solution n°13	32400	50000	15570	15000	31136	4540	148646
Solution n°14	32400	75000	15570	-	31136	4540	154106
Solution n°16	15000	-	27507	-	9430	911	52848
Solution n°18	32400	50000	30640	15000	31136	4540	164216
Solution n°19	32400	75000	30640	-	31136	4540	174216

2.4.2. Prise de décision

Afin de choisir une solution, nous avons dressé une matrice de décision dans laquelle sont consignées les critères d'évaluation et leur pondération établis lors de la formulation du problème. Ensuite, nous octroyons à chaque solution considérée un pourcentage de satisfaction selon le barème du critère. Pour terminer, nous calculons le total pondéré représentant le pourcentage global de satisfaction de la solution (voir annexe C tableau C.2). Ainsi, nous avons retenu au bout de cette étude la solution n°13 avec le pourcentage global de satisfaction le plus élevé qui est de 86%.

Chapitre 3 :
RAFFINEMENT DE LA SOLUTION ET
DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS
DE CAPTATION

3.1. Raffinement de la solution

3.1.1. Étude du comportement du fluide durant le cycle

Au cours [8] d'un cycle de fonctionnement de la cuisinière, le fluide caloporteur (frigoporteur) passe par différentes phases accompagnées de changement d'état. Le fluide utilisé pour assurer le transfert thermodynamique est le R113 qui répond aux critères de choix de frigorigène définis précédemment.

3.1.1.1. La détente

Elle s'effectue par l'intermédiaire d'une vanne à pointeau généralement automatisé appelée détendeur. Cette détente se fait de manière isenthalpe puisque le fluide (R113) reste proche de la saturation. Cette détente permet au fluide de pouvoir s'évaporer à la phase suivante.

3.1.1.2. L'évaporation

Après la détente, le fluide arrive au niveau de l'évaporateur (capteur ou stockage) à basse température. Le fluide (R113) traverse le capteur en récupérant de l'énergie en s'évaporant. L'évaporation du fluide est pratiquement isobare. Cette pression est, pour une de 64°C, de :

$$P = 1.709 \text{ bar}$$

3.1.1.3. La compression

Elle permet une augmentation de la température du réfrigérant de façon mécanique. La compression assure aussi la différence de pression nécessaire utilisée par la détente et la circulation du réfrigérant.

3.1.1.4. La condensation

C'est par la condensation que le fluide (R113) se refroidit. Cette chaleur cédée par le fluide à une température de 200°C maximum au niveau du condenseur (plaque chauffante) est utilisée pour la cuisine. La pression du fluide dans cette phase est de

$$P_{\text{sup}} = 26.514 \text{ bar}$$

3.1.2. Coefficient de performance de la machine

Ce coefficient vaut

$$COP = m \cdot \frac{T_{cd}}{T_{cd} - T_{ev}} \quad (88)$$

Avec

m = facteur dépendant du type d'installation

T_{cd} = température du condenseur

T_{ev} = température de l'évaporateur

Pour $m = 0.5$, $T_{cd} = 200^\circ\text{C}$ et $T_{ev} = 64^\circ\text{C}$ nous aurons

$$COP = 0.5 \times \frac{200 + 273}{200 - 64}$$

$$COP = 1.74$$

3.1.3. Etude du comportement de la paraffine dans le temps

La paraffine est à l'état solide à la température ambiante. Elle stocke de la chaleur après fusion totale. Au cours de cette fusion, la paraffine passe par trois phases qui sont :

- la phase solide au cours de laquelle la température de la paraffine passe de 25°C à sa température de fusion qui est de 64°C. l'évolution de la température durant cette est régie par [5] :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a_p \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad (89)$$

- la phase de fusion : dans cette phase, coexistent la phase solide et la phase liquide. ces deux phases sont séparées par une ligne appelée front de fusion. cette phase est décrite [5] par :

$$\rho_s L_f \frac{\delta y}{\delta t} = \lambda_s \frac{\delta T_s}{\delta y} - \lambda_l \frac{\delta T_l}{\delta y} \quad (90)$$

- la phase liquide : toute la paraffine est liquide et la température ne doit plus évoluer car c'est la chaleur latente qui nous intéresse. cette phase est décrite par la même équation qu'à la phase solide.

Dans la suite, nous faisons un exemple de résolution de ces équations dans la phase solide. Ainsi, nous allons diviser la paraffine en un nombre fini de nœuds afin de déterminer la température de chaque nœud. En utilisant le découpage en maille carré de la figure 3.1 et la méthode des différences finies, nous aurons en tenant compte de la symétrie du corps:

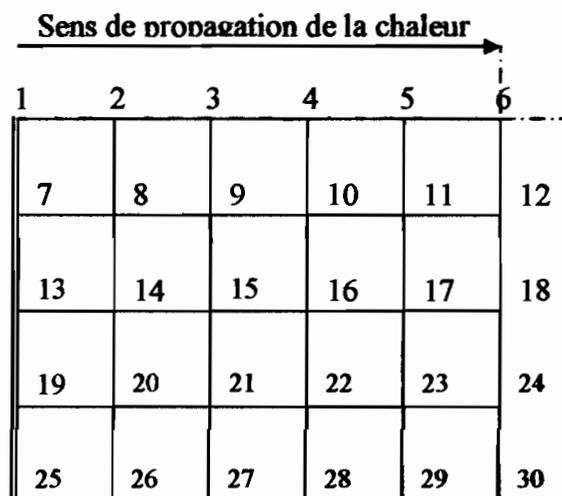


Figure 3.1: Discrétisation de la paraffine

Si les conditions aux limites sont telles que le bord gauche de la cuve de paraffine est à une température 64°C en d'autres termes $T_1 = T_7 = T_{17} = T_{19} = T_{25} = 64^{\circ}\text{C}$ et les autres bords sont à 25°C .

Après résolution de l'équation discrétisée [5], nous obtenons les valeurs suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_2 + T_7 - 4T_8 + 2T_{14} = 0 \\ T_3 + T_8 - 4T_9 + 2T_{15} = 0 \\ T_4 + T_9 - 4T_{10} + 2T_{16} = 0 \\ T_5 + T_{10} - 4T_{11} + 2T_{17} = 0 \\ T_6 + T_{11} - 4T_{12} + 2T_{18} = 0 \\ T_8 + T_{13} - 4T_{14} + 2T_{20} = 0 \\ T_9 + T_{14} - 4T_{15} + 2T_{21} = 0 \\ T_{10} + T_{15} - 4T_{16} + 2T_{22} = 0 \\ T_{11} + T_{16} - 4T_{17} + 2T_{23} = 0 \\ T_{12} + T_{17} - 4T_{18} + 2T_{24} = 0 \\ T_{14} + T_{19} - 4T_{20} + 2T_{26} = 0 \\ T_{15} + T_{20} - 4T_{21} + 2T_{27} = 0 \\ T_{16} + T_{21} - 4T_{22} + 2T_{28} = 0 \\ T_{17} + T_{22} - 4T_{23} + 2T_{29} = 0 \\ T_{18} + T_{23} - 4T_{24} + 2T_{30} = 0 \end{array} \right. \quad (91)$$

Nous avons :

$$\begin{aligned} T_2 &= 30^{\circ}\text{C}, T_3 = 30^{\circ}\text{C}, T_4 = 30^{\circ}\text{C}, T_5 = 30^{\circ}\text{C}, T_6 = 30^{\circ}\text{C}, T_8 = 38^{\circ}\text{C}, \\ T_9 &= 38^{\circ}\text{C}, T_{10} = 38^{\circ}\text{C}, T_{11} = 38^{\circ}\text{C}, T_{12} = 38^{\circ}\text{C}, T_{14} = 40.6^{\circ}\text{C}, \\ T_{15} &= 40.6^{\circ}\text{C}, T_{16} = 40.6^{\circ}\text{C}, T_{17} = 40.6^{\circ}\text{C}, T_{18} = 40.6^{\circ}\text{C}, T_{20} = 41.1^{\circ}\text{C}, \\ T_{21} &= 41.1^{\circ}\text{C}, T_{22} = 41.1^{\circ}\text{C}, T_{23} = 41.1^{\circ}\text{C}, T_{24} = 41.1^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

3.1.4. Dessin de la cuisinière sur solidworks

Nous présentons dans cette section un dessin détaillé montrant la forme extérieure de la cuisinière en trois dimensions et une vue en coupe de l'intérieur de la cuisinière.

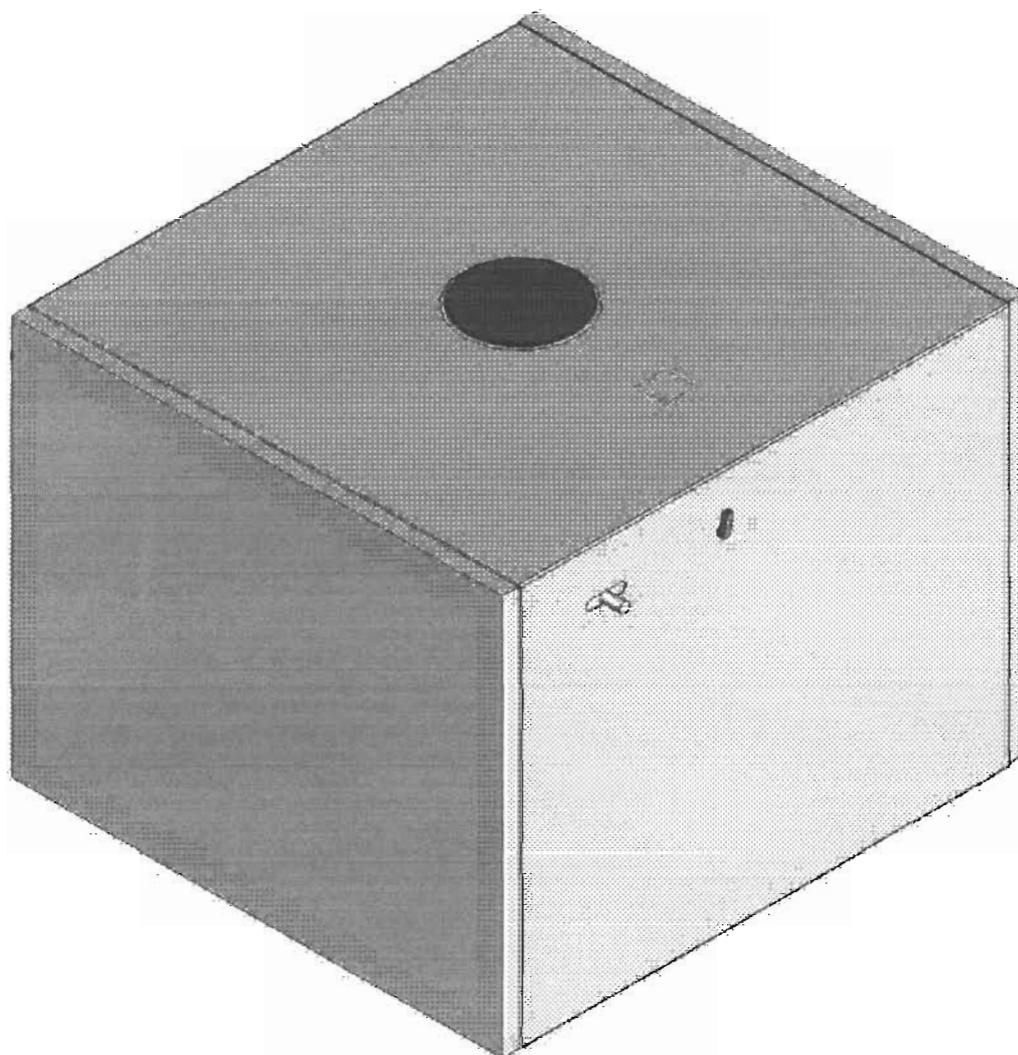


Figure 3.2 : Vue d'ensemble de la cuisinière

3.2. Dimensionnement des capteurs

3.2.1. Dimensionnement du capteur plan

Pour ce faire, nous nous limiterons au calcul de la surface de captage qui est donnée par la relation

$$S = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\varphi \cdot Q_j}{E} \quad (92)$$

Où :

η = rendement du capteur

Q_j = besoins journaliers

E = ensoleillement quotidien

Nous avons l'ensoleillement moyen indiqué par le solarimètre qui est de $0.09W/cm^2$, les besoins qui ont été calculés précédemment de $0.62kWh$. Si nous supposons un rendement de 50% et une couverture des besoins de 80%, nous aurons

$$S = \frac{1}{0.5} \times \frac{0.8 \times 0.62 \cdot 10^3}{0.09 \times 10}$$
$$S = 1102cm^2$$

3.2.2. Le dimensionnement du panneau solaire et de la batterie d'accumulation

3.2.2.1. La consommation journalière

La consommation d'énergie est donnée par la puissance du compresseur multiplié par le temps de fonctionnement journalier

$$E_j = P \cdot T \quad (93)$$

La puissance du compresseur a été déterminée dans les calculs précédents et est de $0.3kW$.

Ainsi, nous avons

$$E_j = 0.3 \times 2.67$$

$$E_j = 0.8kWh$$

3.2.2.2. Dimensionnement du panneau solaire

Nous allons déterminer la puissance du capteur. Elle est exprimée en terme de puissance crête. Cette puissance crête dépend de la consommation, de l'ensoleillement et d'un coefficient de pertes au niveau du panneau. Elle est donnée par

$$\begin{aligned}
 P_c &= \frac{E_j}{0.6 \times E_i} & (94) \\
 &= \frac{0.8}{0.6 \times 0.09 \times 10 \times 10} \\
 P_c &= 148 \text{ Wc}
 \end{aligned}$$

3.2.2.3. Dimensionnement de la batterie d'accumulation

La capacité des batteries dépend de la consommation journalière, du nombre de jour d'autonomie, de la tension et du type de batterie utilisé. Elle s'exprime en Ah et est donnée par

$$C = \frac{N_j \times E_j}{D_p \times V} \quad (95)$$

Avec :

E_j = consommation journalière

C = capacité de la batterie

V = tension de la batterie

D_p = coefficient de décharge profonde

0.8 pour les batteries solaires

0.6 pour les batteries standards

0.5 pour les batteries de voitures

N_j = nombre de jours d'autonomie

5 jours pour les sites ensoleillé (afrique)

7 à 10 jours pour les sites tempérés (europe du sud et france)

15 à 20 jours pour les sites les plus défavorables (europe du nord)

Ainsi, nous aurons pour un panneau de tension 12 volts

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{5 \times 0.8}{0.8 \times 12} \\
 C &= 0.42 \text{ Ah}
 \end{aligned}$$

CONCLUSION

La cuisinière retenue (solution n°13) permettrait d'obtenir de bonnes performances thermiques mais aussi le confort et le tout à un coût relativement bas. En effet, ce modèle de cuisinière pourrait atteindre 200°C et rendre aussi possible la cuisson de tout aliment. Elle a un fonctionnement analogue à celui des cuisinières classiques car munie de commande et de réglage de niveau de température. Ce qui permet d'offrir un meilleur confort à l'utilisateur et d'éviter d'être exposé au soleil et aux éblouissements occasionnés par l'utilisation des cuisinières solaires classiques. Son système de stockage lui permet de fonctionner la nuit. Cette solution présente un intérêt majeur par rapport aux autres solutions. Elle permet une utilisation des deux composantes du rayonnement solaire car elle récupère l'énergie solaire provenant de la lumière du soleil par le panneau photovoltaïque et celle provenant de la chaleur produite par un capteur plan. Cette cuisinière est également non polluante puisqu'elle ne libère aucun déchet toxique.

Cependant, à cause de l'utilisation d'un compresseur, elle produit du bruit qui peut être relativement gênant. Les températures susceptibles d'être atteintes par ce type de cuisinières sont aussi limitées par l'usage du compresseur.

Ainsi, des recherches peuvent être envisagées pour trouver une solution permettant d'avoir des performances au moins égales à celles que nous avons obtenues sans usage d'un compresseur.

Annexes

Annexe A

Tableau A.1 : Classification des défauts

CATEGORIES DE DEFAUTS OU DE LACUNES	DEFAUTS OU LACUNES OBSERVES
2. autonomie	<ul style="list-style-type: none"> - les cuisinières solaires actuelles ne fonctionnent pas quand il n'y a pas de soleil (à la tombée de la nuit ou tôt le matin) - le surplus d'énergie disponible souvent le jour n'est pas efficacement utilisé pour compenser les déficits ou pour les besoins nocturnes - les cuisinières solaires actuelles ne fonctionnent pas avec un appoint énergétique renouvelable
3. performance thermique	<ul style="list-style-type: none"> - la cuisson de certains aliments est impossible par faiblesse de la température - on ne peut pas effectuer simultanément plusieurs cuissons avec la même cuisinière
4. confort et ergonomie	<ul style="list-style-type: none"> - pour cuisiner, il faut mettre la cuisinière au soleil - on ne peut cuisiner dans sa cuisine - la cuisson de certains aliments est impossible par insuffisant de température - l'accès aux marmites est souvent difficile du fait que la cuisinière est à l'air libre ; on ne protège pas la marmite contre la poussière, la saleté, etc. - les miroirs étant souvent proches de l'opérateur, il est exposé aux éblouissements
5. exécution des manœuvres de commande	<ul style="list-style-type: none"> - il n'existe pas de système permettant de mettre en marche ou d'arrêter l'appareil - on ne peut réguler la température de cuisson

Annexe B

Solution n°1 :

Description :

La forme générale de la cuisinière est cylindrique avec un creux au milieu permettant d'accueillir la marmite. Le matériau permettant d'emmagasiner de l'énergie thermique est en contact direct avec la plaque chauffante. Il a une température de fusion assez haute pour permettre de cuire les aliments. Il est également stocké dans un réservoir cylindrique tout au tour de la plaque chauffante. La cuisinière est munie d'orifices avec clapets permettant de la brancher au capteur par l'intermédiaire de câbles calorifugés. Ici, le capteur utilisé est à concentration ou des tubes sous vide car ce sont ces derniers qui permettent d'obtenir des températures suffisamment hautes pour la cuisson des aliments.

Tout au tour du matériau emmagasinant la chaleur est aménagé une chambre recevant l'eau chaude issue du capteur.

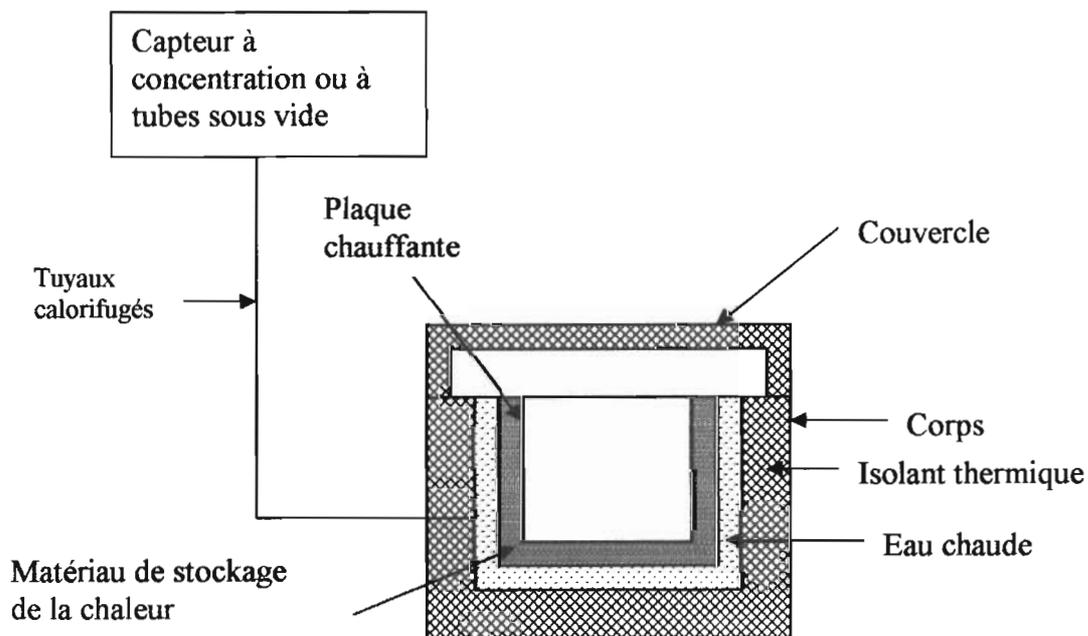


Figure B.1 : Schéma de la solution n°1

Solution n°2 :

Description :

La forme générale de la cuisinière est cylindrique. Le matériau utilisé pour emmagasiner la chaleur n'est pas en contact direct avec la plaque chauffante. Il est confiné dans une batterie cylindrique. Cette dernière restitue la chaleur emmagasinée à l'unité de traitement thermique pour que celle-ci ramène la température de l'eau à la température d'utilisation. Les appareils utilisés par l'unité de traitement thermique fonctionnent avec des piles jetables du commerce. La température de fusion du matériau qui emmagasine la chaleur est suffisante pour le fonctionnement de l'unité de traitement thermique. La batterie de chaleur est reliée au capteur et à la plaque chauffante par de petits circuits d'eau de même que le capteur et la plaque chauffante. La forme de la plaque chauffante est cylindrique et creuse au centre pour une meilleure restitution de la chaleur. Le capteur et la cuisinière sont séparables par les moyens d'orifices munis de clapets où sont connectés les câbles calorifuges venant du capteur.

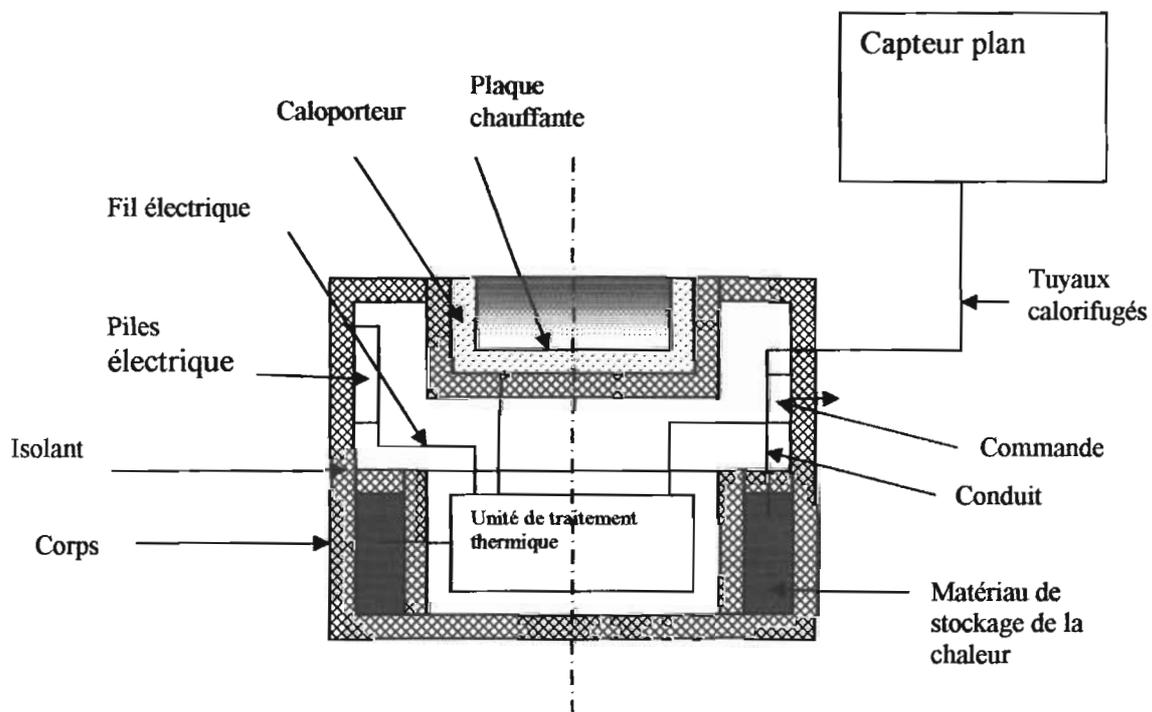


Figure B.2 : Schéma de la solution n°2

Solution n°3 :

Description :

La cuisinière est de forme cylindrique avec une plaque chauffante plate. Elle est munie d'un distributeur permettant de commander la marche et l'arrêt mais aussi de passer du circuit d'eau venant de la batterie de chaleur au circuit d'eau venant du capteur. Elle a aussi un régulateur de température pour fournir la température de fonctionnement souhaitée. Les circuits d'eau venant de la batterie et du capteur passent par l'unité de traitement thermique et cette dernière est reliée à la plaque chauffante. Le capteur et la cuisinière sont séparables. Les appareils de l'unité de traitement thermique sont alimentés par une batterie de courant électrique rechargeable au moyen de panneaux solaires. Elle est aussi munie d'un indicateur de niveau de charge de la batterie de chaleur.

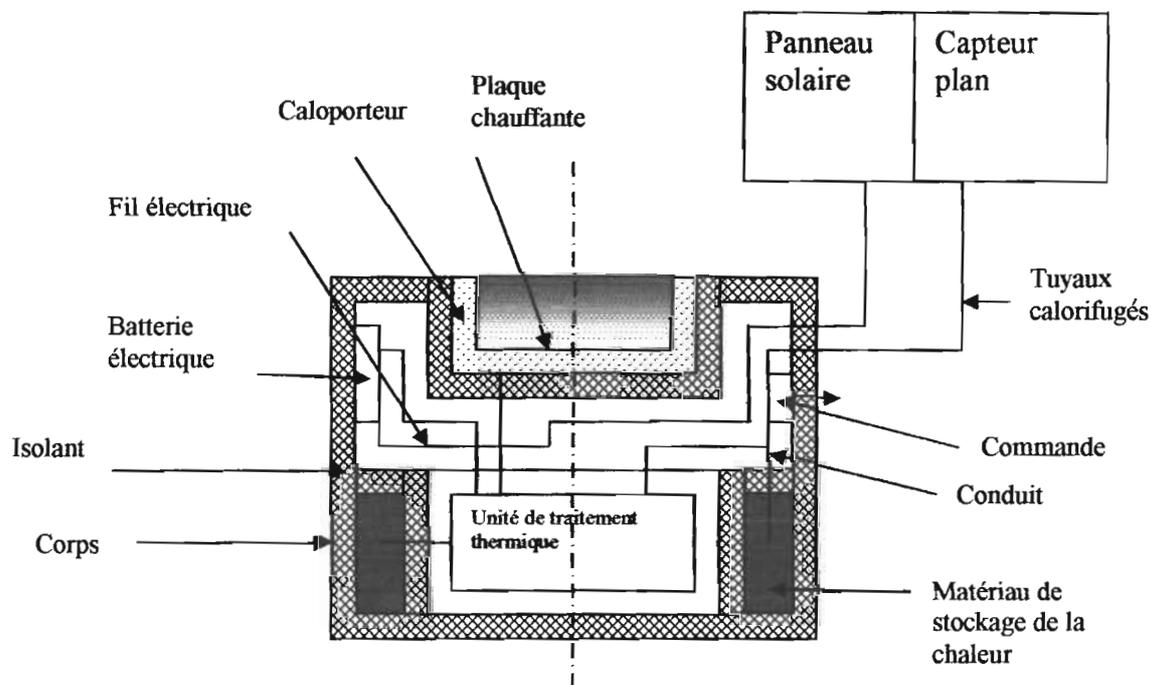


Figure B.3 : Schéma de la solution n°3

Solution n°4 :

Description :

Elle est semblable à la précédente mais ici à la place de la batterie rechargeable on utilise l'énergie thermique.

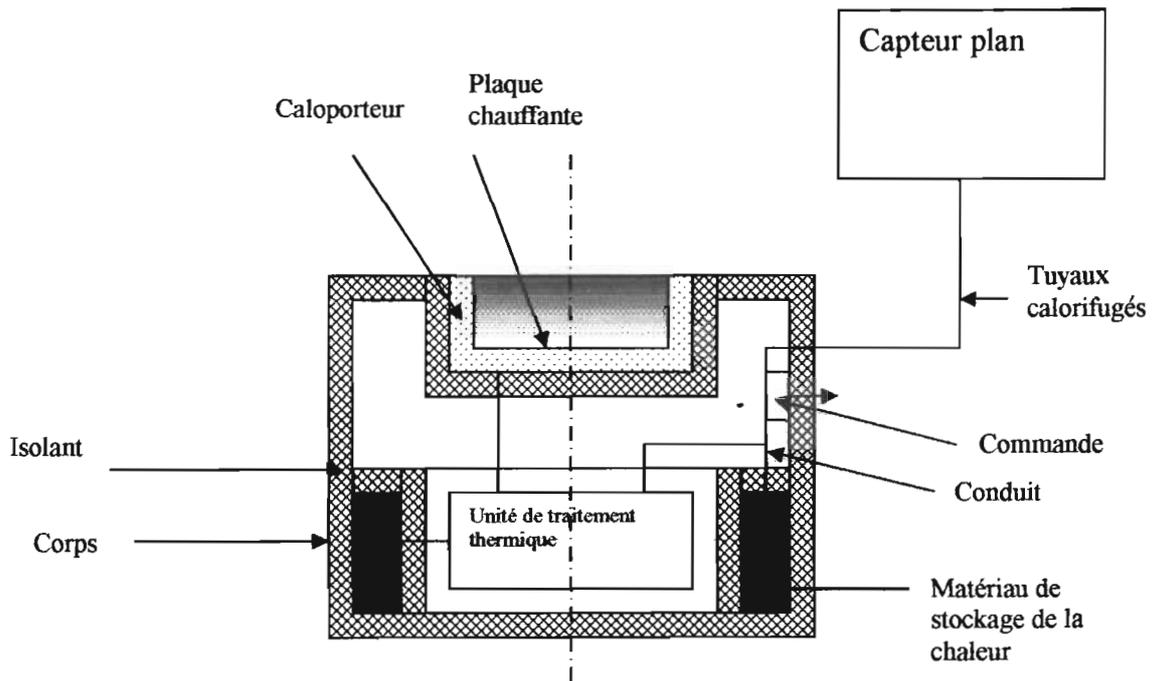


Figure B.4 : Schéma de la solution n°4

Solution n°5 :

Description :

Comme la précédente sauf que pour celle-ci on utilise des appareils qui ne consomment pas de l'énergie.

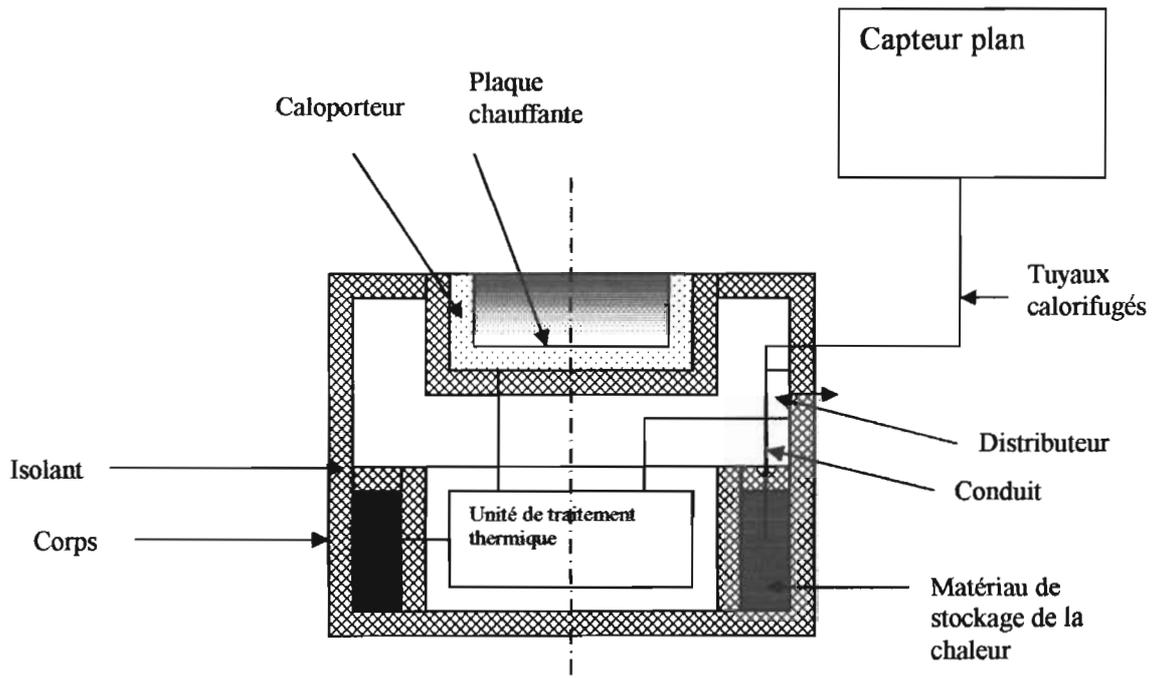


Figure B.5 : Schéma de la solution n°5

Solution n°6 :

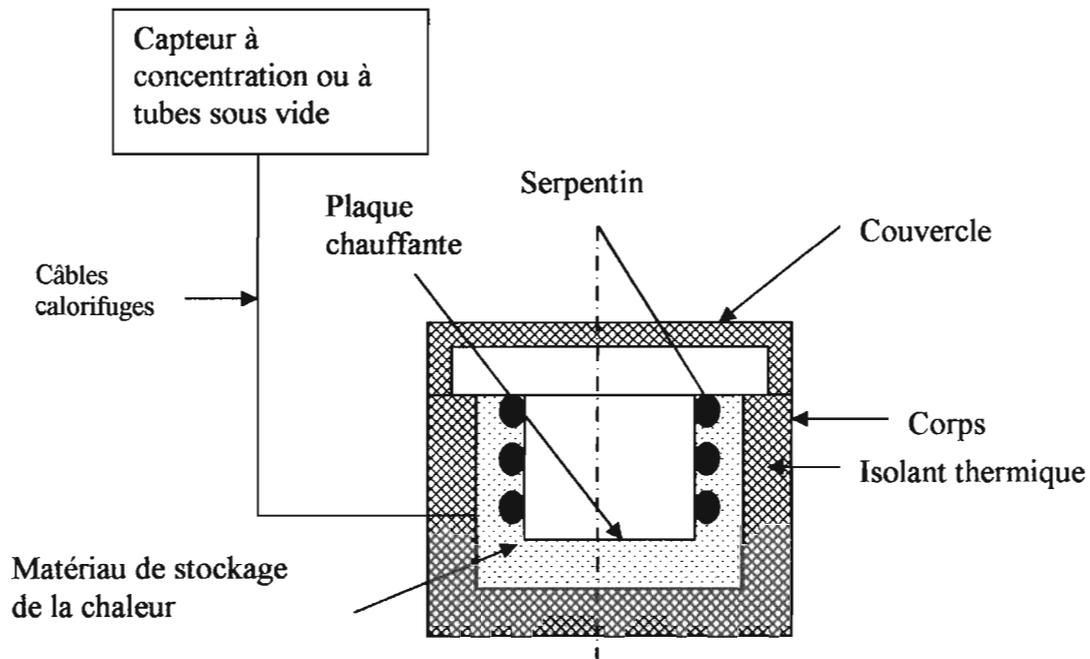


Figure B.6 : Schéma de la solution n°6

Description :

La forme générale de la cuisinière est cylindrique. Dans le corps sont inséré, un isolant, un matériau de stockage, un serpentin et une plaque chauffante. Le tout est recouvert par un couvercle. Le serpentin qui entoure la plaque chauffante, restitue une partie de la chaleur reçue du capteur au matériau de stockage et l'autre est utilisée pour la cuisson. La chaleur emmagasinée à l'intérieur grâce au couvercle calorifugé.

Solution n°7 :

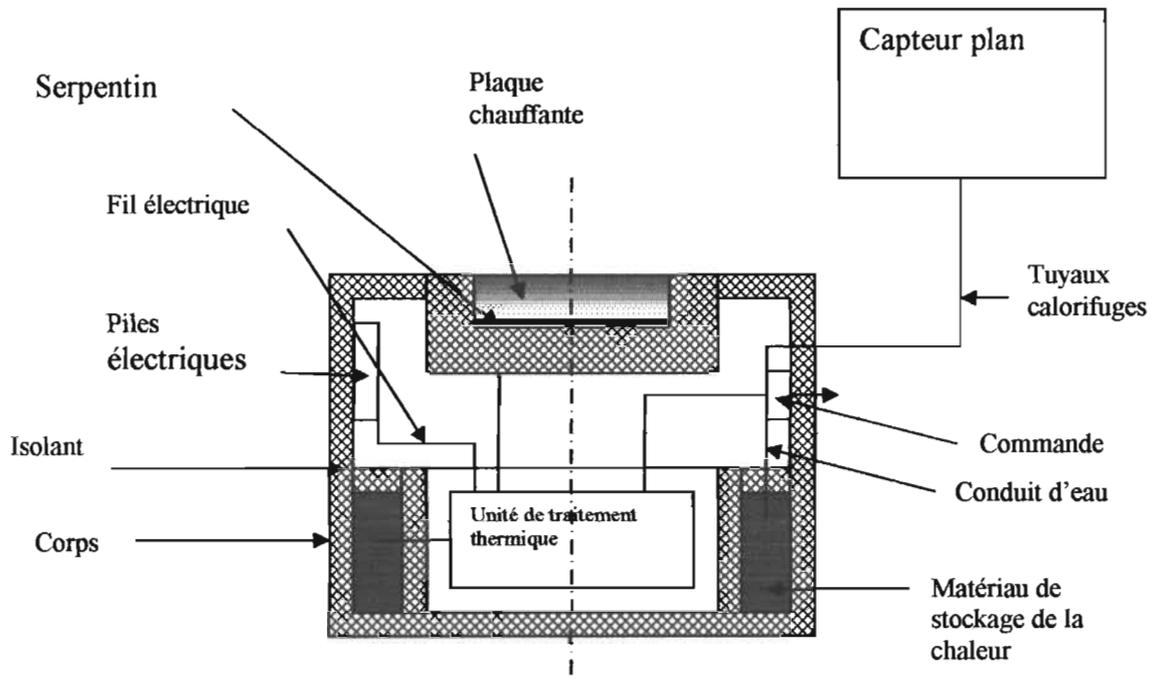


Figure B.7:- Schéma de la solution n°7

Description :

La cuisinière de forme cylindrique est munie d'une unité de traitement thermique qui permet de restituer la chaleur reçue du capteur à une température plus élevée, un matériau de stockage confiné dans un corps cylindrique calorifugé placé au bas de la cuisinière, des piles électriques qui assurent le fonctionnement de l'unité de traitement thermique, d'une commande et d'une plaque chauffante en dessous de laquelle est placé un serpentin relié à l'unité de traitement thermique. Le capteur est relié à la cuisinière au moyen de tuyaux calorifugés.

Solution n°8 :

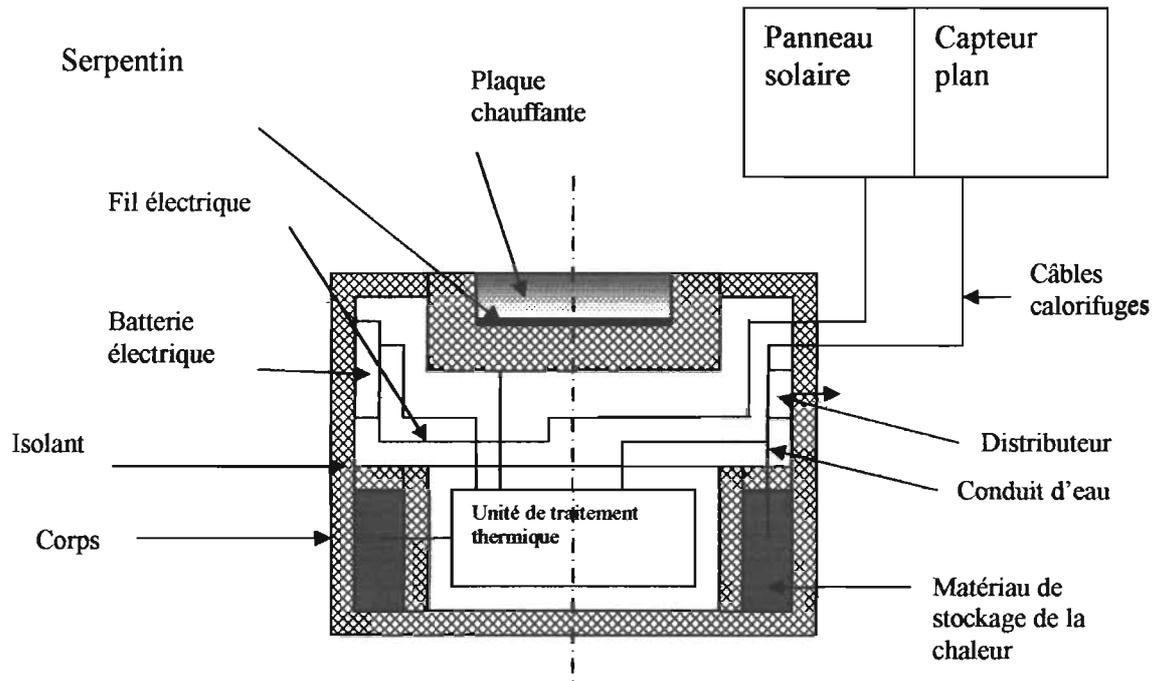


Figure B.8 : Schéma de la solution n°8

Description :

La cuisinière est de forme cylindrique avec une unité de traitement thermique pour relever la température, un matériau de stockage emmagasiné dans un réservoir cylindrique calorifugé, une batterie rechargeable connectée à un panneau solaire, une commande et une plaque chauffante munie d'un serpentin. Elle est connectée au capteur par l'intermédiaire de tuyaux calorifugés.

Solution n°9 :

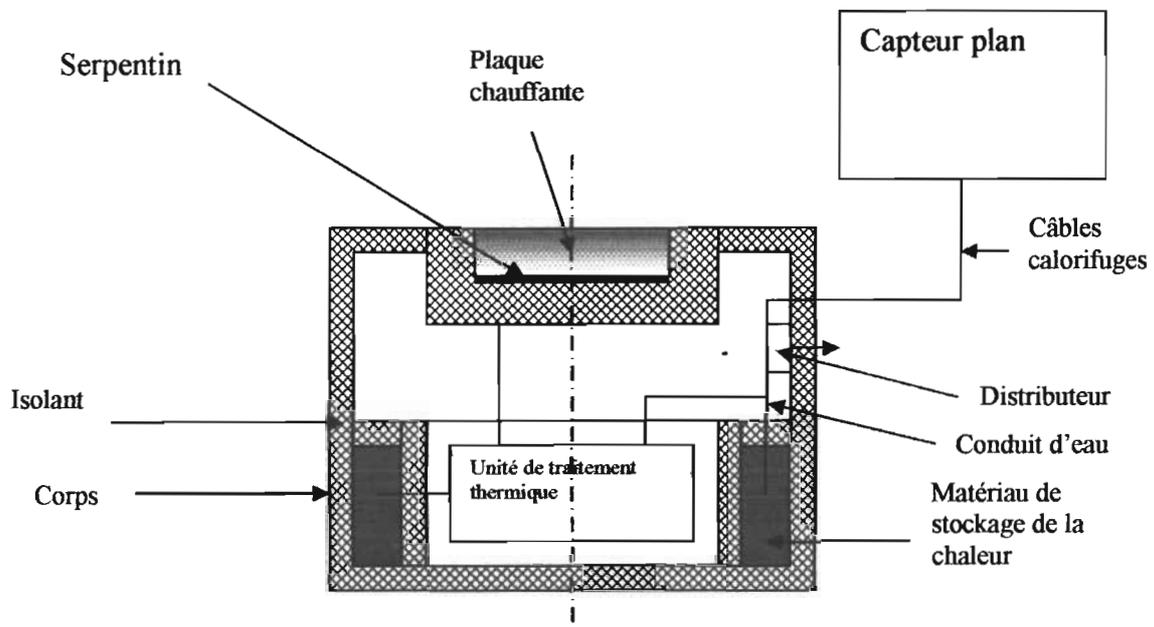


Figure B.9 : Schéma de la solution n°9

Description :

La cuisinière a une forme cylindrique. Elle est constituée d'une unité de traitement thermique fonctionnant avec de l'énergie thermique, d'une pièce cylindrique munie d'un isolant thermique dans laquelle est emprisonné le matériau de stockage de chaleur, d'une commande et plaque chauffante au bas de laquelle est placé un serpentin. Le tout relié au capteur par des tuyaux calorifugés.

Solution n°10 :

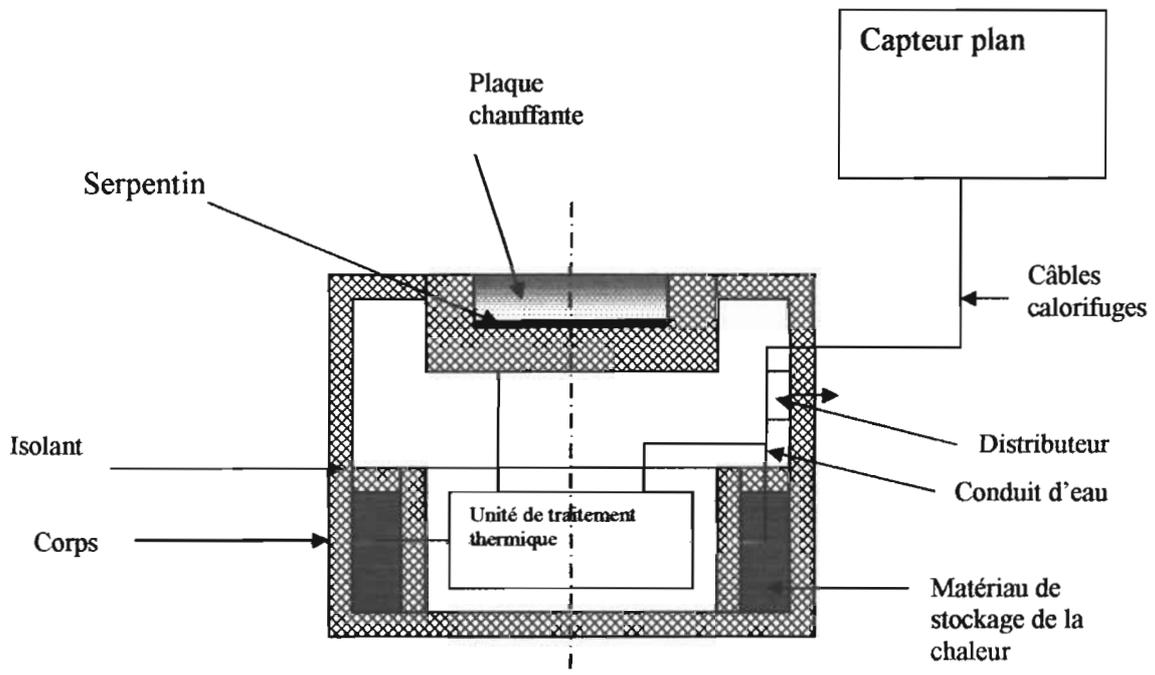


Figure B.10 : Schéma de la solution n°10

Description :

Celle-ci est semblable à la précédente sauf que ici l'unité de traitement thermique fonctionne sans consommation d'énergie.

Solution n°11 :

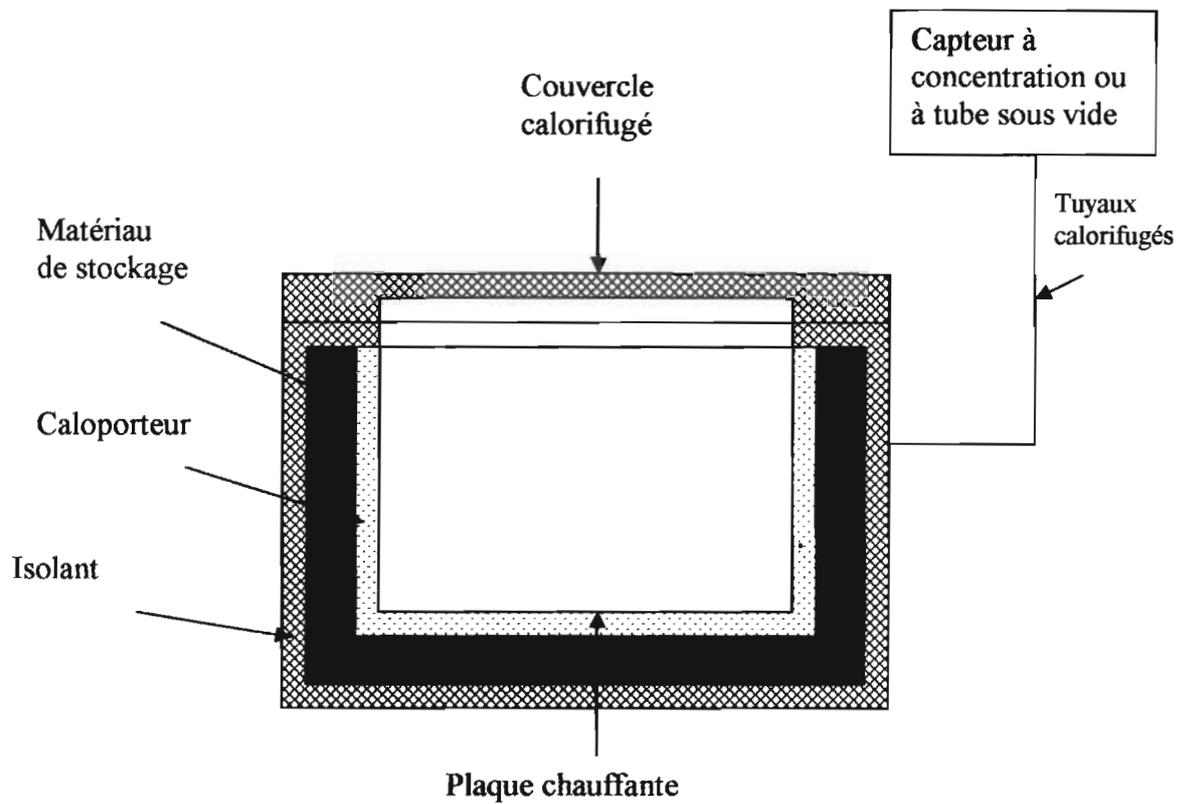


Figure B.11 : Schéma de la solution n°11

Description :

Cette fois ci, la cuisinière est de forme parallélépipédique, cependant elle est constituée des mêmes éléments que la solution n°1.

Solution n°12 :

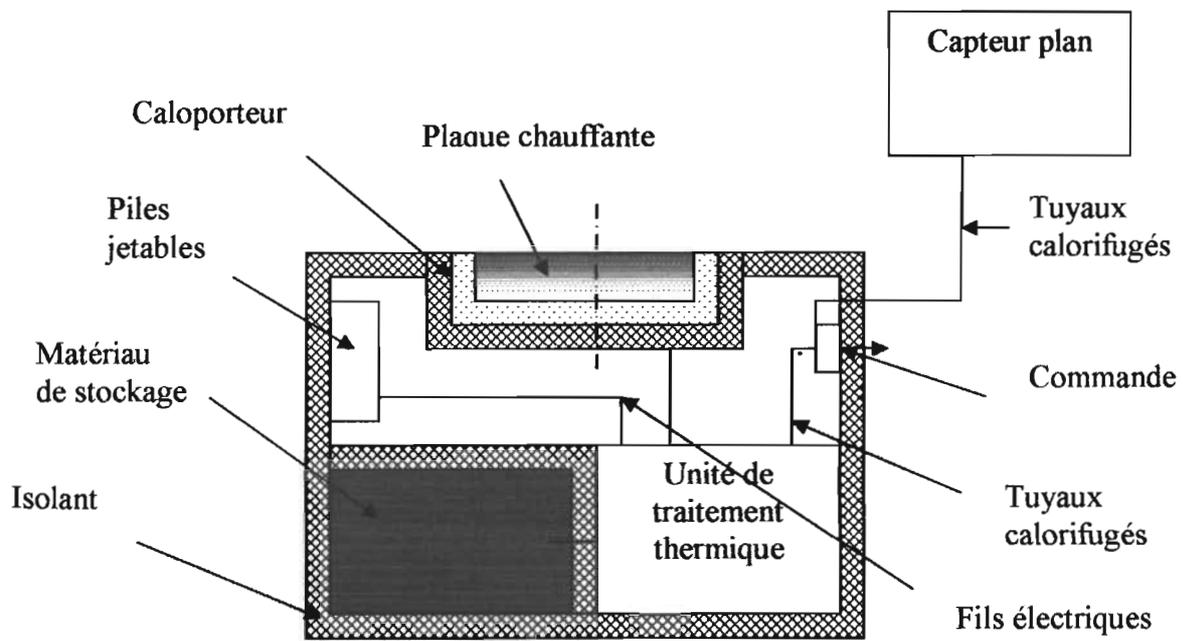


Figure B.12 : Schéma de la solution n°12

Description :

Elle a une forme parallélépipédique. En son sein est mis une pièce parallélépipédique calorifugée pour emmagasiner le matériau de stockage, l'unité de traitement thermique, des piles électriques pour faire fonctionner l'unité de traitement thermique, une commande et une plaque chauffante entourée du caloporteur. Elle est reliée au capteur par des tuyaux calorifugés.

Solution n°13 :

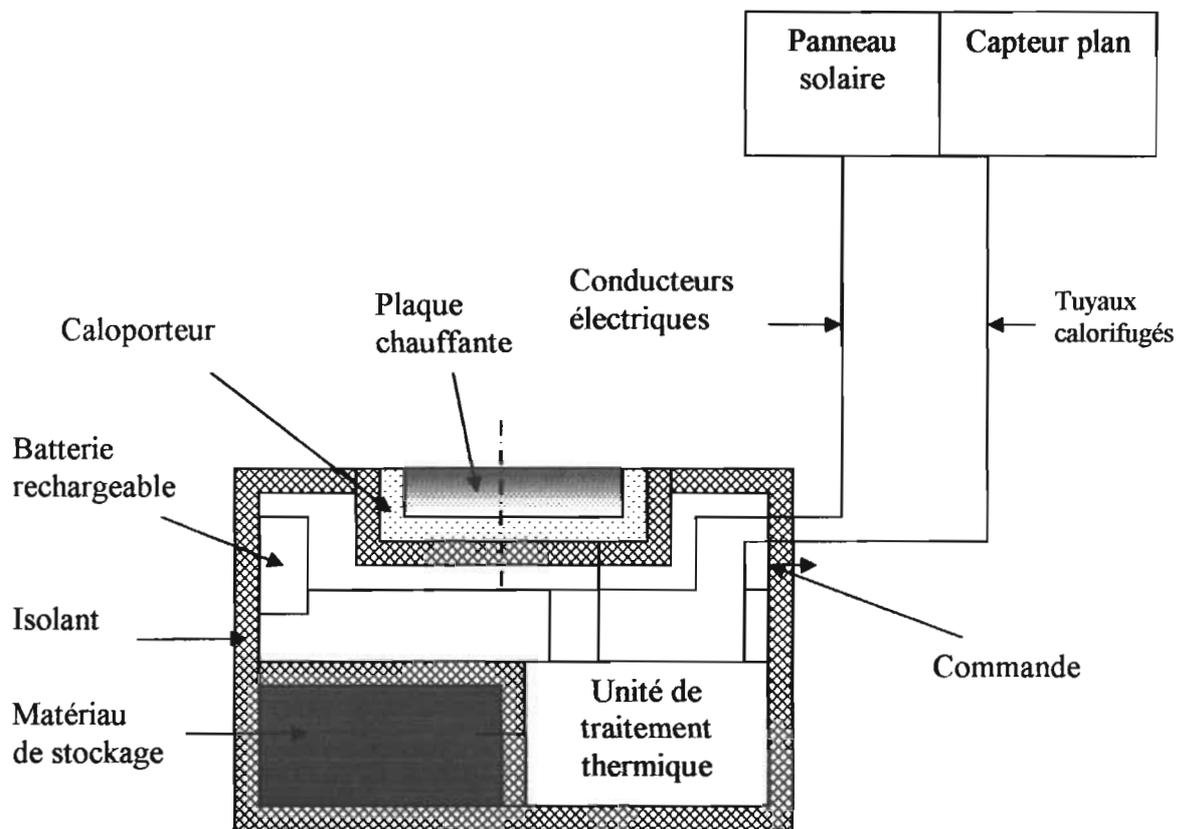


Figure B.13 : Schéma de la solution n°13

Description :

Elle est semblable à la précédente sauf que ici à la place des piles électriques on a mis une batterie rechargeable et un panneau solaire pour la recharger.

Solution n°14 :

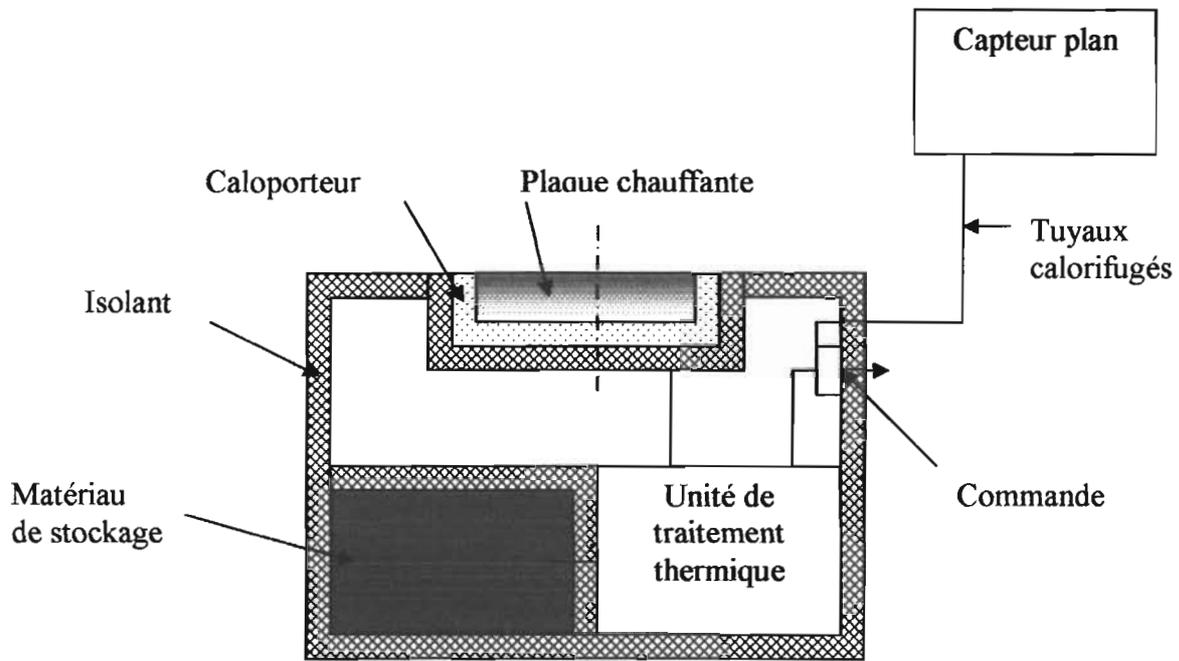


Figure B.14 : Schéma de la solution n°14

Description :

Elle est analogue à la précédente. Ici, l'unité de traitement thermique fonctionne avec l'énergie thermique fournie par le capteur.

Solution n°15 :

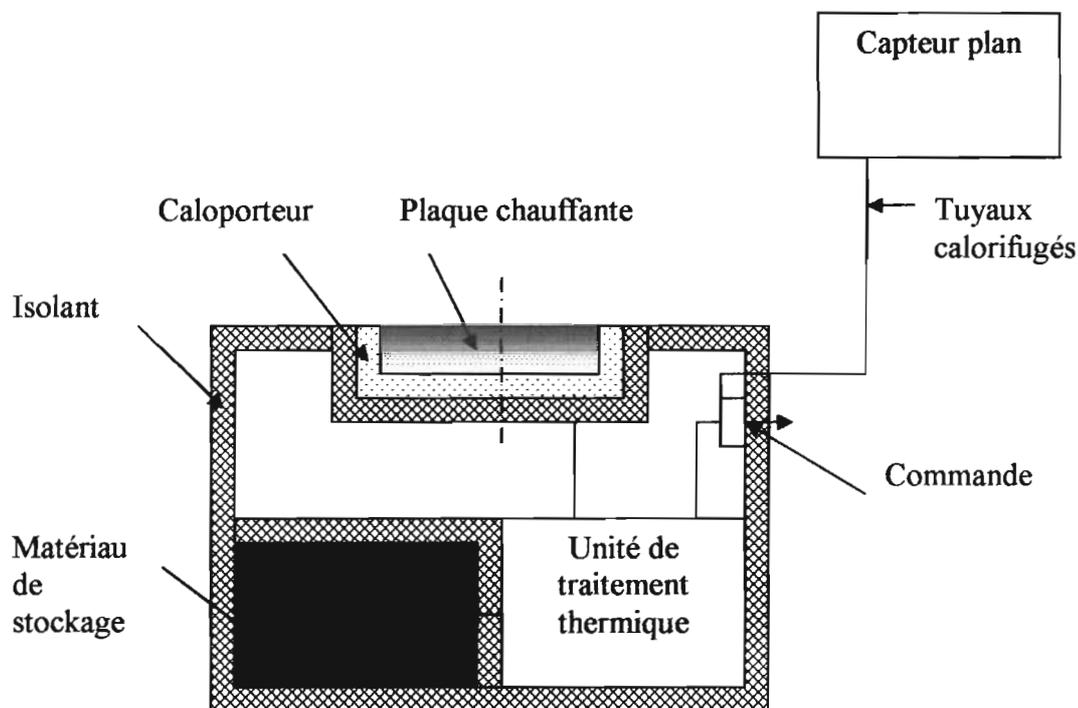


Figure B.15 : Schéma de la solution n°15

Description :

Elle est semblable à la précédente sauf que l'unité de traitement thermique fonctionne sans apport énergétique.

Solution n°16 :

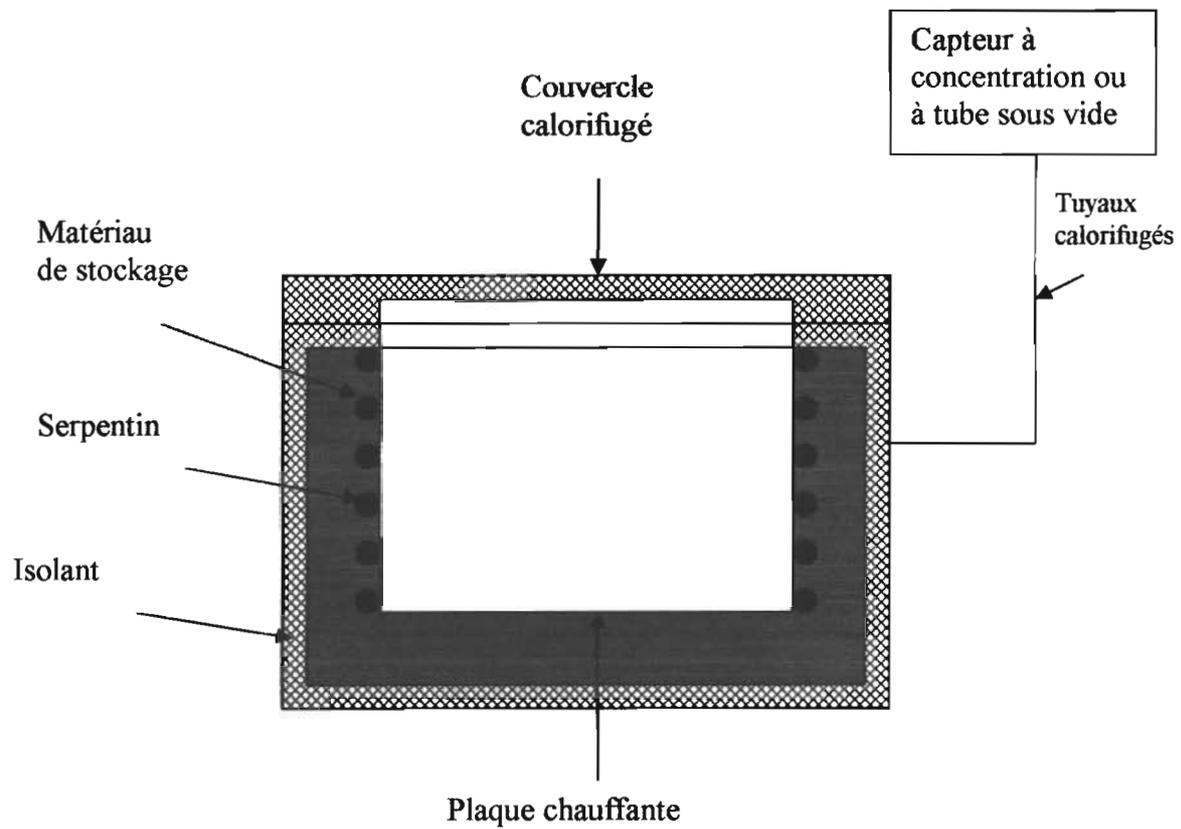


Figure B.16 : Schéma de la solution n°16

Description :

Elle s'apparente à la solution n°6. Mais ici sa forme est parallélépipédique.

Solution n°17 :

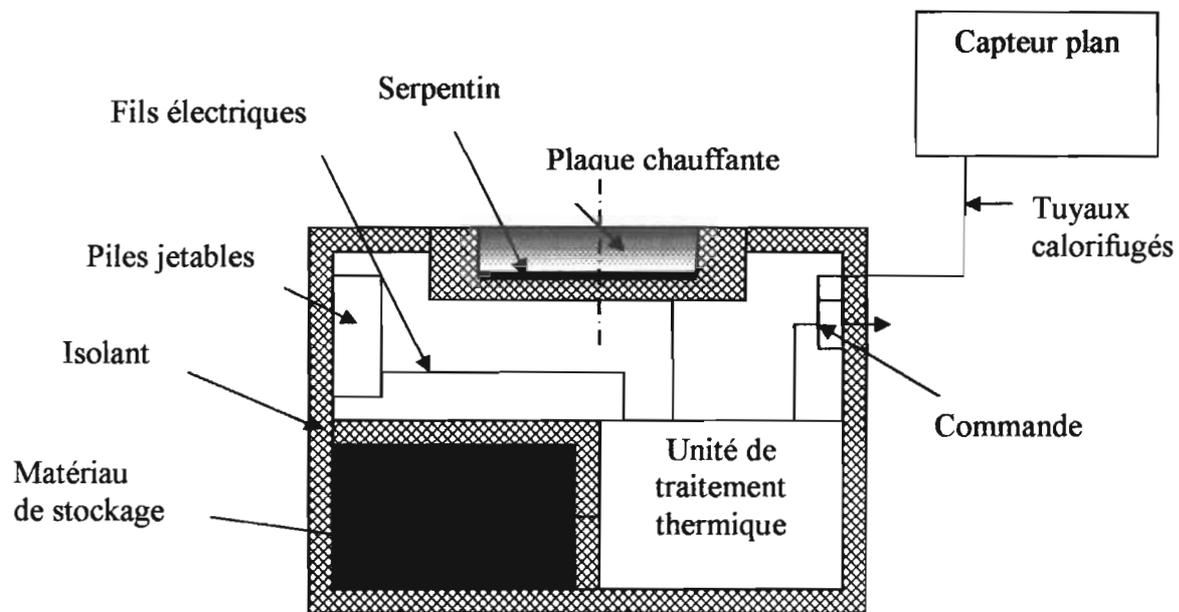


Figure B.17 : Schéma de la solution n°17

Description :

Elle est de forme parallélépipédique avec une unité de traitement thermique, une batterie de stockage de chaleur, une commande, des piles jetables assurant le fonctionnement de l'unité de traitement thermique et un plaque au bas de laquelle est placée un serpentin.

Solution n°18 :

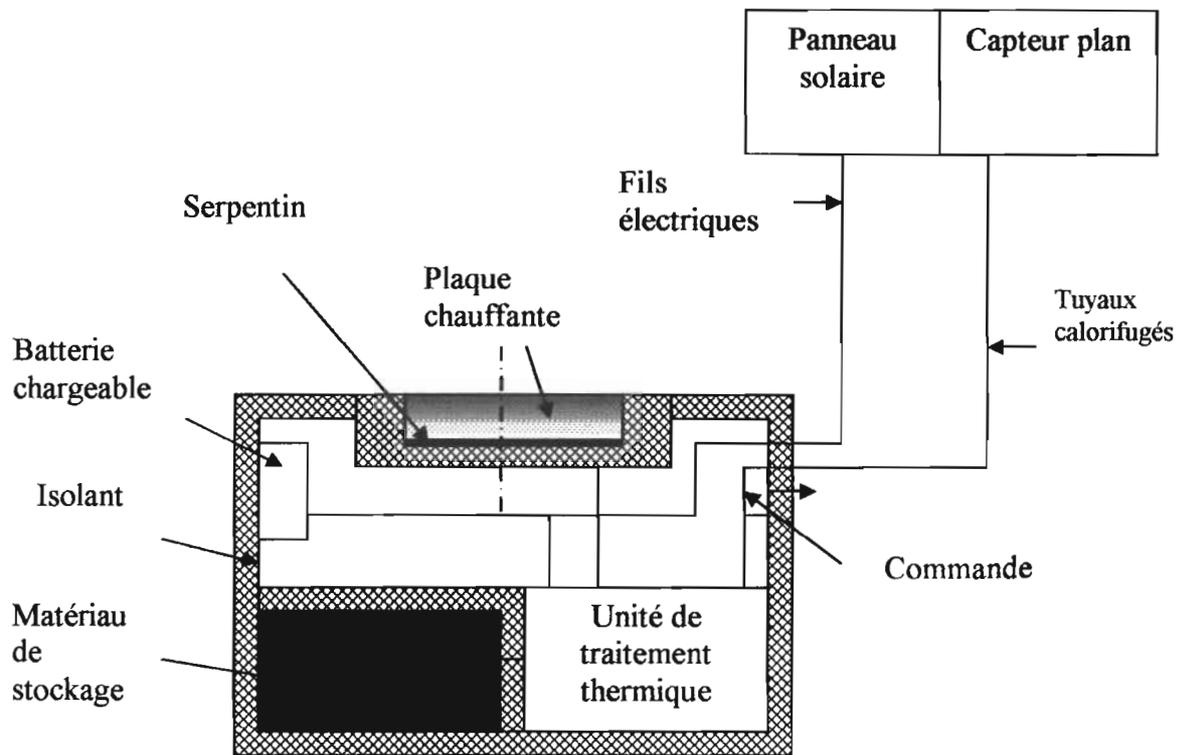


Figure B.18 : Schéma de la solution n°18

Description :

Elle est semblable à la précédente sauf que ici on a remplacé les piles jetables par une batterie rechargeable et un panneau solaire.

Solution n°19 :

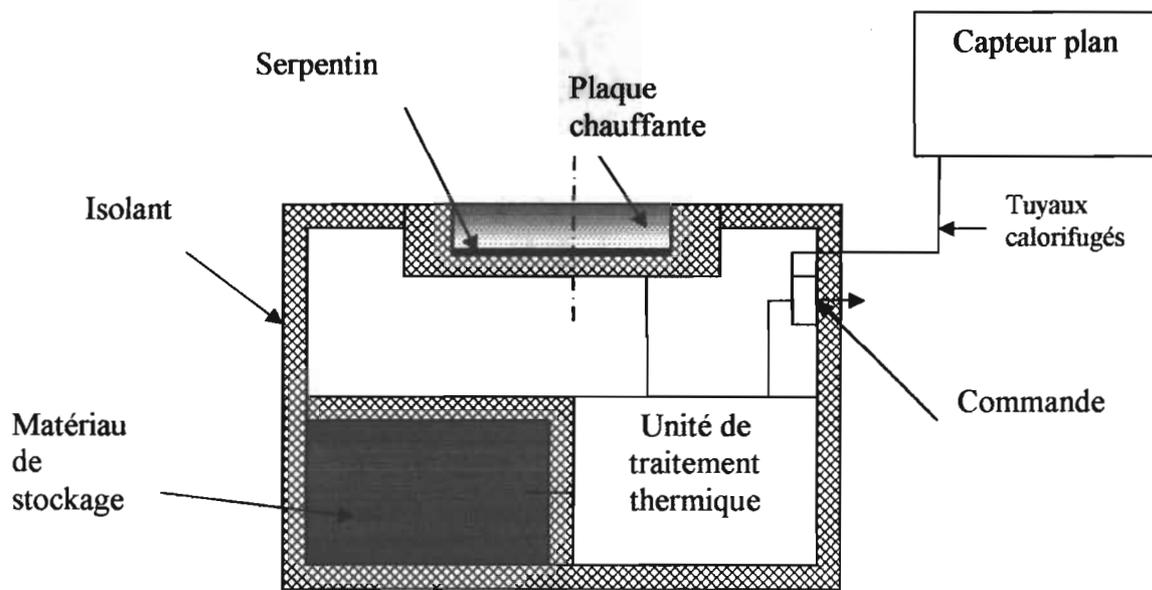


Figure B.19 : Schéma de la solution n°19

Description :

Même chose que précédemment sauf que l'unité de traitement thermique ne fonctionne par avec de l'électricité mais avec de l'énergie thermique.

Solution n°20 :

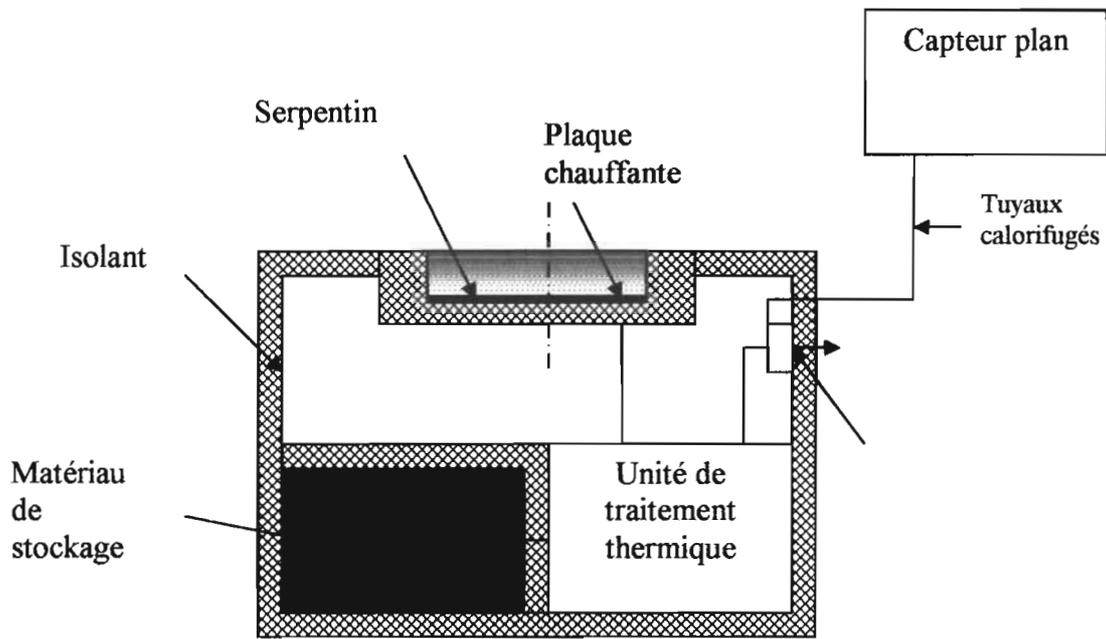


Figure B.20 : Schéma de la solution n°20

Description :

Semblable à la précédente sauf que l'unité de traitement thermique ne consomme pas d'énergie.

Annexe C

Tableau C.1 : Récapitulation de l'étude de praticabilité

SOLUTIONS	PRATICABILITE				DECISION
	Aspects physiques	Aspects économiques	Facteurs de temps	Facteurs environnementaux	
	Normes NF ; simple ; égale ou supérieure aux cuisinières existantes	Prix de vente d'au plus 150000FCFA	Prête pour soutenance de juillet de cette année	Usage par ménagère ; cuisine des aliments ; hygiénique, non polluante, confort et ergonomie	
Solution n°1	oui	oui	oui	oui	Retenue
Solution n°2	oui	Non : cher à la longue et ne convient par pour une utilisation intense	Oui	oui : mais rejets de piles	Rejetée
Solution n°3	Oui	Oui : cher au début mais amorti par la suite	Oui	Oui	Retenue
Solution n°4	Oui	Oui	Oui	Oui	Retenue
Solution n°5	Oui	Oui	Non : délai trop court pour recherche	Oui	Rejetée
Solution n°6	Oui	Oui	Oui	Oui	Retenue
Solution n°7	Oui	Non : cher à la longue et ne convient par pour une utilisation	Oui	Oui : mais rejets de piles	Rejetée

		intense			
Solution n°8	Oui	Oui : cher au début mais amorti par la suite	Oui	Oui	Retenue
Solution n°9	Oui	Oui	Oui	Oui	Retenue
Solution n°10	Oui	Oui	Non : délai trop court pour recherche	Oui	Rejetée
Solution n°11	Oui	Oui	Oui	Oui	Retenue
Solution n°12	Oui	Non : cher à la longue et ne convient par pour une utilisation intense	Oui	Oui : mais rejets de piles	Rejetée
Solution n°13	Oui	Oui : cher au début mais amorti par la suite	Oui	Oui	Retenue
Solution n°14	Oui	Oui	Oui	Oui	Retenue
Solution n°15	Oui	Oui	Non : délai trop court pour recherche	Oui	Rejetée
Solution n°16	Oui	Oui	Oui	Oui	Retenue
Solution n°17	Oui	Non : cher à la longue et ne convient par pour une utilisation intense	Oui	Oui : mais rejets de piles	

Solution n°18	Oui	Oui : cher au début mais amorti par la suite	Oui	Oui	Retenue
Solution n°19	Oui	Oui	Oui	Oui	Retenue
Solution n°20	Oui	Oui	Non : délai trop court pour recherche	Oui	Retenue

Tableau C.2 : Matrice de prise de décision

Critères d'évaluation détaillés	coût	Utilisation d'un matériau de stockage thermique	Utilisation d'une source renouvelable d'appoint	Temps de fonctionnement avec l'énergie stockée	Puissance thermique	Température	Facilité d'utilisation	Nombre de bouton de commande et de régulation de l'appareil	Satisfaction globale aux critères (total pondéré en %)
Pondération ($\sum P_i = 1.0$)	0.15	0.28	0.20	0.10	0.10	0.10	0.15	0.10	
Solution n°1	100	100	100	10	20	20	50	0	75,5
Solution n°3	0	100	50	10	100	100	100	60	80
Solution n°4	0	100	25	10	100	100	100	60	75
Solution n°6	80	100	100	10	20	20	50	0	72,5
Solution n°8	0	100	50	10	100	100	100	60	80
Solution n°9	0	100	25	10	100	100	100	60	75
Solution n°11	100	100	100	10	20	20	50	0	75,5
Solution n°13	40	100	50	10	100	100	100	60	86
Solution n°14	0	100	25	10	100	100	100	60	75
Solution n°16	80	100	100	10	20	20	50	0	72,5
Solution n°18	0	100	50	10	100	100	100	60	80
Solution n°19	0	100	25	10	100	100	100	60	75

Références

1. FRANK KREITH & WILLIAM Z. BLACK, Basic heat transfert, New York, Happer & Row, 1980.
2. JHON A. DUFFIE & WILLIAM A. BECKMAN, Solar Energy thermal processes, John Wiley & sons, 1974.
3. J. PATRY, Stockage par chaleur latente: bilan énergétique, applications thermiques, solaires, frigorifiques, Paris, Pyc édition, 1981.
4. ALY SARR, cuisinière solaire à accumulation, juin 82, Ecole Polytechnique de Thies.
5. KHAOUSSOU BAKHOUM, étude d'un système de stockage et de destockage de chaleur latente de fusion : application à la cuisinière solaire, 2004-2005, Ecole Polytechnique de Thies.
6. ABDELHAMINE BENALLOU ET JAQUES BOUGARD, guide de l'énergie solaire « le solaire thermique au service du développement durable », réseau international d'énergie solaire, IEPF, Québec Canada.
7. PAPE MODY NDIAYE, note de cours énergies nouvelles et renouvelables, Ecole Supérieure Polytechnique Centre de Thies.
8. PROFESSEUR J. CL. GIANOLA, Installations frigorifiques et de pomme a chaleur, Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne, Département de génie mécanique, laboratoire de thermodynamique, 1983.