

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL
UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIES



Gm. 0139

PROJET DE FIN D'ÉTUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

Titre :

**MODELISATION D'UN SYSTEME SOLAIRE AVEC
CAPTEUR A TUBES SOUS VIDE**

Auteur : Demba NDIAYE

Directeur : Banda NDOYE

Codirecteur : Mamadou SARR

Date : Juillet 1996

Dédicace spéciale à ...

ma mère,

mon défunt père,

ma famille.

" ... à travers une distance de 148 millions de kilomètres, et seulement par une quantité de chaleur deux milliards de fois moins intense que celle qu' il rayonne, (il) est encore capable d' échauffer notre planète au point de la faire vivre dans la fécondité de ce rayonnement... La force silencieusement dépensée pour élever les réservoirs de la pluie... pour fixer le carbone dans les plantes, pour donner à la nature terrestre sa vigueur et sa beauté, a pu être évaluée au travail de 217 millions 316 milliards de chevaux-vapeur! Voilà le travail permanent du SOLEIL sur la Terre. "

Camille FLAMMARION, l' Astronomie Populaire (1881)

REMERCIEMENTS

Il nous est particulièrement agréable, à travers cette page, d'adresser nos plus sincères remerciements à toutes ces personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet de fin d'études, particulièrement:

- Mr Banda NDOYE, Professeur de Thermique à l'EPT
- Mr Mamadou SARR, Professeur de Physique à l'EPT.

SOMMAIRE

Le but de cette étude est de réaliser un programme de simulation d' un système solaire destiné à la production de vapeur d' eau (chaleur industrielle - électricité) ou de froid (machine à absorption).

Le capteur solaire est constitué de tubes sous vide à surface sélective et le réservoir de stockage est stratifié.

La combinaison des différents modèles définis pour les données météorologiques et pour chacun des composants du système solaire permet d' arriver à un système d' équations différentielles résoluble par la méthode d' Euler modifiée, avec comme conséquence la possibilité du suivi au fil du temps des différents niveaux de température présents dans le système.

Le principal résultat attendu de ce programme relativement fiable est le taux de couverture assuré par l' énergie solaire pour une charge donnée et suivant différentes valeurs des variables de conception. Ceci, afin d' aider à la recherche de systèmes les plus économiques possibles.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	III
Sommaire	IV
Table des matières	V
Liste des annexes	IX
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XII
Liste des symboles	XIII
Notes	XIV
INTRODUCTION	I
CHAPITRE 1: LE SYSTEME EN ETUDE	4
1.1. Le système à un fluide, Stockage sans échangeur	6
1.2. Le système à deux fluides, Stockage à échangeur	6
1.3. Le système à deux stockages, chaud et froid	7
1.4. Fonctionnement	7
1.5. Régulation	10
1.5.1. Schéma de régulation du débit-capteur	10
1.5.2. Schéma de régulation de la vanne de BY-PASS ..	11

CHAPITRE 2: LES DONNEES METEOROLOGIQUES	12
2.1. Le rayonnement solaire global	12
2.1.1. Le modèle	12
2.1.2. Un exemple	15
2.2. La température ambiante	17
2.2.1. Le modèle	17
2.2.2. Un exemple	18
2.3. La vitesse moyenne du vent	18
CHAPITRE 3: LE CAPTEUR SOLAIRE	19
3.1. Généralités	19
3.1.1. Orientation et inclinaison d' un capteur	19
3.1.2. Paramètres de fonctionnement	19
3.1.3. Inertie thermique	20
3.1.4. Pertes de charge	21
3.2. Les capteurs à tube sous vide	21
3.2.1. Schéma de montage	24
3.2.2. Fluide caloporteur	27
3.3. Modèle du capteur	29
3.3.1. Principe	30
3.3.2. Bilan thermique de la vitre	30
3.3.3. Bilan thermique de l' absorbeur	32
3.3.4. Bilan thermique du fluide caloporteur	33
3.3.5. Bilan global	33
3.3.6. Evaluation des constantes	35

CHAPITRE 4: LE RESERVOIR DE STOCKAGE	38
4.1. Caractéristiques du réservoir	38
4.1.1. Dimensions	41
4.1.2. Matériau constitutif	41
4.1.3. Calorifugeage	42
4.2. Analyse du réservoir	43
4.3. Le modèle du réservoir	45
4.3.1. Quelques hypothèses	45
4.3.2. Les équations	47
4.3.3. Evaluation des constantes	50
CHAPITRE 5: L' EVAPORATEUR	54
5.1. Diverses considérations sur les évaporateurs	54
5.2. Le modèle	55
5.2.1. L' échangeur - Chaleur sensible	57
5.2.1. L' échangeur - Vaporisateur	58
5.3. Utilisation pratique du modèle	59
CHAPITRE 6: RESOLUTION INFORMATIQUE	60
6.1. Initialisation	60
6.1.1. Période initiale	64
6.1.2. Conditions initiales au capteur	64
6.1.3. Conditions initiales au réservoir de stockage	64
6.2. Lecture des données	65
6.2.1. Conditions météorologiques	65
6.2.2. Aire de capteur	66
6.2.3. Réservoir de stockage	66

6.2.4. Charge à alimenter	66
6.3. Résolution des équations différentielles	67
6.4. Résultats	69
CONCLUSION	71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	73
Annexes	74

LISTE DES ANNEXES

	<u>page</u>
<u>Appendice A:</u> Fichiers météorologiques - Moyennes mensuelles des valeurs moyennes des années 1981 à 1990	75
<u>Appendice B:</u> Listing du programme principal	81

LISTE DES FIGURES

		<u>page</u>
1.1	Système à un fluide, Stockage sans échangeur	5
1.2	Système à deux fluides, Stockage à échangeur	5
1.3	Système à deux stockages, chaud et froid	5
1.4	Schéma du système - Production de vapeur d' eau	8
1.5	Schéma du système - Machine à absorption	9
3.1	Module solaire à six absorbeurs	25
3.2	Schéma de montage habituel	26
3.3	Modélisation des échanges énergétiques au capteur	31
3.4	Evolution de la température du fluide caloporteur dans le capteur	33
4.1	Le sous-système de stockage	40
4.2	Coordonnées du réservoir	44

4.3	Division du réservoir en noeuds	44
4.4	Modélisation des échanges énergétiques au réservoir	46
4.5	Evaluation de l' aire intérieure d' un noeud	51
4.6	Analogie électrique relative au coefficient h_{pi}	51
5.1	Evolution de la température du fluide à vaporiser	56
6.1	Algorithme général [sur 24 heures]	61
6.2	Algorithme de la procédure ECHANGEUR	62
6.3	Algorithme de la procédure GENERATEUR	63
6.4	Algorithme de la méthode d' EULER modifiée-Modifiée	68

LISTE DES TABLEAUX

		<u>page</u>
2.1	Durée moyenne du jour au Sénégal pour chaque mois de l' année	16
3.1	Propriétés de différentes surfaces utilisées dans les capteurs	23
3.2	Evaluation du coefficient d' échange convectif vitre - air ambiant	38
5.1	Efficacité d' un échangeur suivant le type de circulation	56

LISTE DES SYMBOLES

[A]: référence bibliographique

Lorsque la question est traitée de façon spécifique dans les pages X1 à X2, nous l'indiquons comme suit [A.ppX1-X2]

[1]: fait référence à une note

NOTES

[1] : "MEC 5.12: Air climatisé et Réfrigération"

Cours de Massamba THIOYE, EPT 1995

[2] : "CHAL 3.11: Transmission de chaleur"

Cours de Dorothé AZILINON, EPT 1993

INTRODUCTION

La plupart des systèmes conçus pour des applications par voie thermodynamique de l'énergie solaire échouent (sous-dimensionnement) ou s'avèrent non-rentables (sur-dimensionnement) surtout sous nos latitudes. Ces échecs contribuent d'une certaine manière à la défiance des Décideurs vis à vis de la Thermique solaire.

Le Sénégal jouit d'un gisement solaire important, avec une moyenne journalière d'insolation de 6000 Wh / m^2 , sur une durée moyenne de 12 heures. C'est un potentiel encore très mal exploité (électrification et conservation des aliments en milieu rural, par exemple), et les échecs enregistrés dans ce domaine [G] ne sont pas pour inverser la tendance actuelle.

La variation du rayonnement solaire avec le temps rend nécessaire une étude dynamique, et non en régime permanent comme cela se fait le plus souvent (et c'est l'une des principales causes des échecs), des systèmes qui l'exploitent. Ainsi, s'avère-t-il indispensable de créer des programmes de simulation de ces systèmes afin de savoir, par exemple, si une installation donnée répondra aux performances attendues d'elle lors de son dimensionnement.

Un tel type de programme facilite en outre la recherche de systèmes optimisés. Avec le Solaire en effet, l'expérience a montré qu'il n'est pas avantageux de chercher à tout prix un système qui couvre entièrement la charge qu'il doit alimenter. On doit plutôt chercher à utiliser cette énergie concomitamment avec les autres formes d'énergie disponibles.

C'est de cette manière en effet qu'on réalise l'exploitation optimale de l'énergie solaire, car ainsi que l'écrivent Beckman / Duffie [C - page 350]:

" L'approche de simulation peut être utilisée pour estimer, pour n'importe quelle application, la quantité totale d'énergie délivrée par le capteur solaire pour faire face à la charge [**taux de couverture solaire**] et la quantité totale d'énergie d'appoint requise. La simulation peut aussi indiquer si les variations de température attendues d'un système donné sont raisonnables, par exemple, si une température de capteur s'élèvera au dessus du point d'ébullition du liquide à chauffer.

" Les simulations sont des expérimentations numériques et peuvent donner les mêmes types d'informations sur les performances thermiques que les expérimentations physiques. Elles sont, cependant, relativement **rapides et peu coûteuses**, et peuvent fournir des informations sur les effets des changements de variables de conception sur les performances, au moyen d'une série d'expérimentations utilisant toutes exactement les mêmes charges et temps. Ces variables de conception pourraient inclure la sélectivité des surfaces absorbantes, le nombre de vitrages du capteur, l'aire du capteur, ... **Avec les données de coûts et l'analyse économique appropriée, les résultats de simulation peuvent être utilisés pour trouver des systèmes à coût moindre.**"

Ce rapport présente l'approche utilisée pour la modélisation, physique

d'abord, numérique ensuite, d'un système solaire destiné à la production de vapeur d'eau (chaleur industrielle - électricité) ou de froid (par machine à absorption), domaines correspondant aujourd'hui à des priorités nationales.

Après avoir défini, dans un premier chapitre, le système à étudier, nous faisons sur les quatre chapitres qui suivent une revue détaillée des différents composants de celui-ci afin d'en établir les modèles propres. Un sixième et dernier chapitre consacré à la solution informatique du problème complétera cette étude.

CHAPITRE 1

LE SYSTEME EN ETUDE

Un système solaire est habituellement composé de trois (3) parties principales:

- le capteur solaire
- le sous-système de stockage
- le sous-système de conversion

Si la dernière ne dépend que de l' application envisagée, les deux premières constituent un ensemble qui admet plus couramment trois (3) types ([D] et [B]):

1. le type à un fluide, Stockage sans échangeur (figure 1.1)
2. le type à deux fluides, Stockage à échangeur (figure 1.2)
3. le type à deux stockages, chaud et froid (figure 1.3)

Dans le cadre des applications que nous avons envisagées: Production de vapeur d'eau (chaleur industrielle et électricité) et Alimentation du Générateur d' une machine à absorption, nous nous sommes naturellement intéressés à ces trois types afin d'en choisir le plus approprié à notre cas.

Dépendamment de l' application, chacun de ces types présente (bien évidemment) des avantages et des inconvénients à travers lesquels nous les analysons ci-dessous.

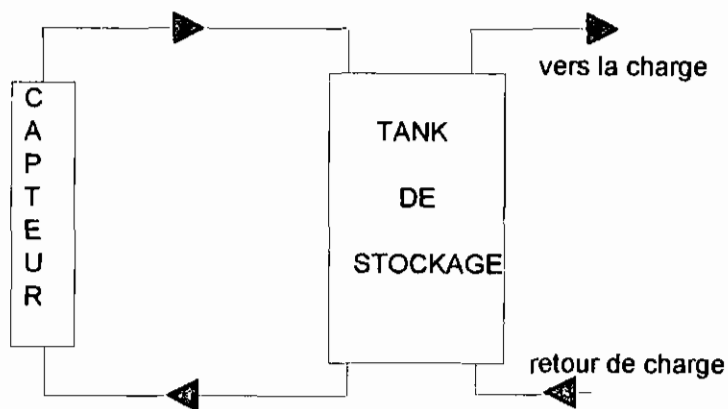


Figure 1.1 : Système à un fluide , Stockage sans échangeur

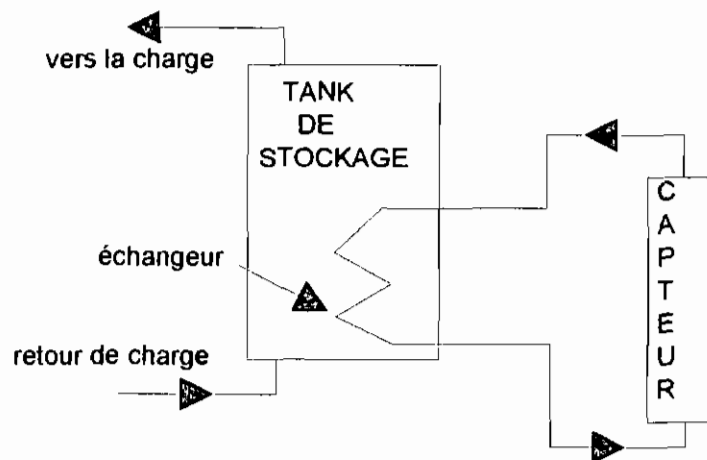


Figure 1.2 : Système à deux fluides, Stockage à échangeur

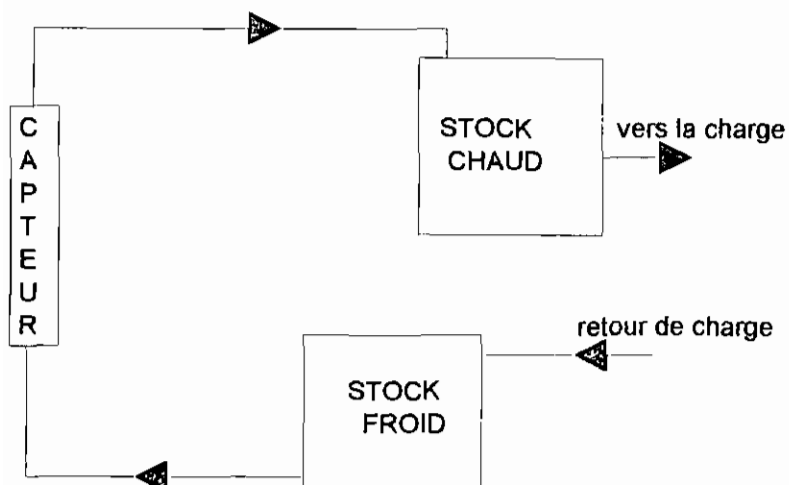


Figure 1.3 : Système à deux stockages , chaud et froid

1.1. Le Système à un fluide, Stockage sans échangeur

*** Avantages**

- simple
- échange de chaleur par mélange
- contrôle facile de la régulation
- soutirage à l' utilisation facile
- température à l' utilisation maximale

*** Inconvénient**

- alimentation possible du capteur à température relativement élevée
conséquence: diminution du rendement de captation

1.2. Le Système à deux fluides, Stockage à échangeur

*** Avantages**

- simple
- soutirage à l' utilisation facile
- température à l' utilisation maximale
- choix libre des deux fluides

*** Inconvénients**

- alimentation possible du capteur à température relativement élevée
- efficacité moindre de l'échangeur
- régulation difficile
- augmentation de l'investissement

1.3. Le Système à deux stockages, chaud et froid

*** Avantages**

- toute la chaleur captée est stockée
 - alimentation du capteur à température relativement basse
- conséquence: augmentation du rendement de captation

*** Inconvénients**

- soutirage à l' utilisation difficile
- régulation difficile
- augmentation de l'investissement

Considérant tous ces facteurs, nous estimons que le choix I (Système à un fluide, Stockage sans échangeur) est le meilleur par rapport au comportement dynamique du système et aux applications envisagées.

Sur cette base, nous avons établi le schéma simplifié du système.

La figure 1.4 représente le schéma du système destiné à la production de vapeur d' eau.

La figure 1.5 représente le schéma du système destiné à la production de froid par machine à absorption.

1.4. Fonctionnement

Il se conçoit aisément

Le fluide caloporteur quitte le fond du tank et rejoint le capteur où il est chauffé avant de revenir, par une première boucle au tank (par son sommet).

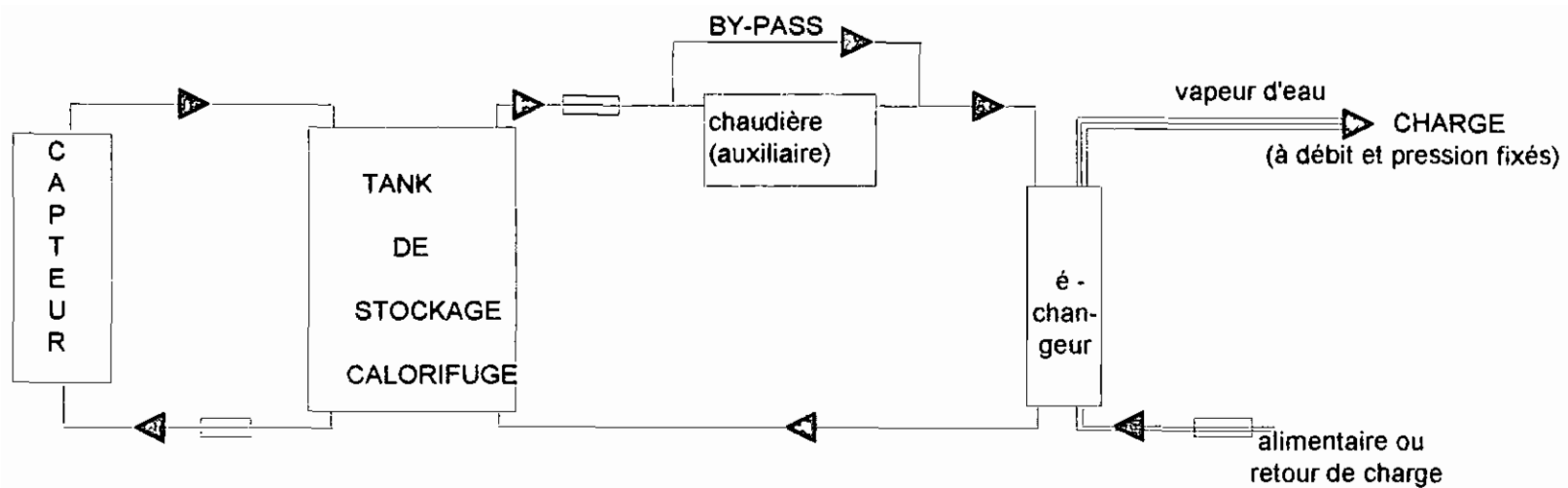


Figure 1.4 : Schéma du système - Production de vapeur

LEGENDE :

1- symbole d'une pompe

2- circuits : —:gilotherm; eau; vapeur

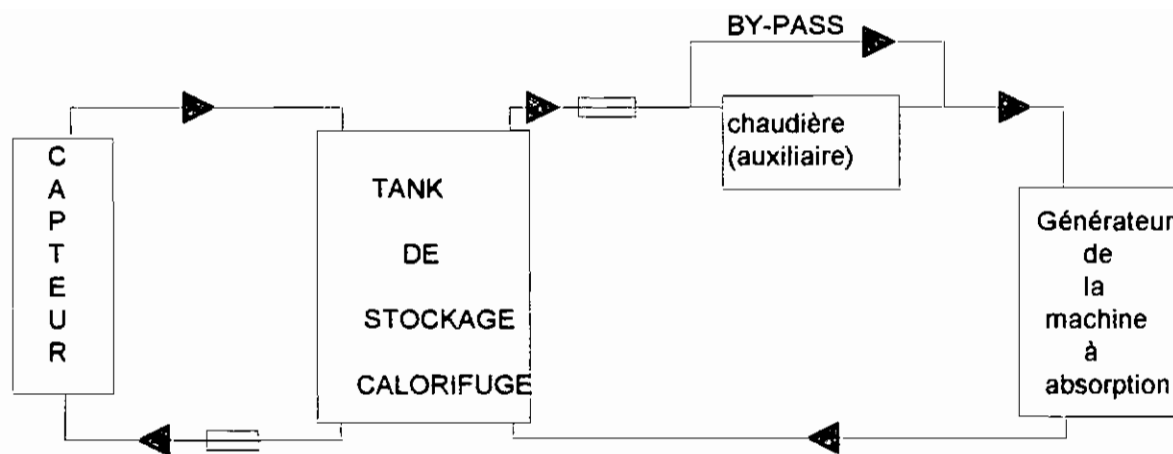


Figure 1.5 : Schéma du système - Machine à absorption

LEGENDE :

—  — symbole d'une pompe

A partir du sommet du tank où se retrouve le fluide le plus chaud, on alimente l'évaporateur (ou le générateur) avant de rejoindre, par une seconde boucle, le tank (par son fond).

1.5. Régulation

C'est un aspect important du système. IL convient de lui donner tout l'intérêt qui lui sied. Il existe ainsi différents schémas de régulation pour les différents paramètres que sont les débits, températures, pressions,...

Pour cette raison, il serait utopique d'essayer de définir un schéma type de régulation (l'initiative en sera laissée au concepteur). Nous nous limiterons ainsi aux aspects de régulation qui interviennent par leurs effets sur la modélisation que nous faisons du système.

1.5.1. Schéma de régulation du débit-capteur

Le schéma que nous adoptons est habituel et connu. Il s'agit d'une régulation TOUT ou RIEN. Nous choisissons de ne faire marcher la pompe que si la température moyenne du capteur est supérieure à la température du fond du réservoir de stockage. A cet effet, deux sondes de température sont nécessaires; une donc au fond du stockeur et une au capteur.

1.5.2. Schéma de régulation de la vanne de BY-PASS

L'existence de cette vanne est liée à la nécessité d'installer un chauffeur auxiliaire, ceci au cas où le niveau de température nécessaire à la charge n'est pas atteint au sommet du réservoir de stockage.

De manière simplifiée, ce schéma se conçoit ainsi:

- si la température est suffisante, la chaudière est mise en by-pass et hors fonctionnement.
- si la température n'est pas suffisante, on chauffe le fluide jusqu'à la température de référence T_{ref} (qui est exigée par la charge et à laquelle nous ajoutons 2°C pour tenir compte des pertes et des inerties thermiques au niveau de l'auxiliaire) avant de l'envoyer vers la charge.

CHAPITRE 2

LES DONNEES METEOROLOGIQUES

Les conditions météorologiques pertinentes sont:

- le rayonnement solaire global
- la température ambiante
- la vitesse moyenne du vent

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons aux moyennes mensuelles de ces paramètres.

Nous avons pu obtenir auprès de la Direction de la Météorologie Nationale ces moyennes pour neuf (9) des stations sénégalaises: Dakar-Yoff, Bambey, Louga, Linguère, Matam, Podor, Tambacounda, Ziguinchor et Nioro du Rip.

On se reportera à l' Appendice A (page 75).

2.1. Le rayonnement solaire global

2.1.1. Le modèle

L' analyse dynamique d' un capteur nécessite la connaissance de la valeur instantanée de ce paramètre . Or habituellement , les stations météorologiques ne fournissent que l' **Irradiation journalière** qui est la quantité d' énergie solaire reçue par une surface de 1 m² durant la journée. D' où la nécessité de définir un modèle

représentatif de la variation de l'éclairement énergétique au cours de la journée. Son établissement devra, et cela se comprend, partir de l'irradiation journalière.

Bernard / Menguy / Schwartz [D] proposent un modèle habituellement utilisé dans la pratique. En supposant une répartition sinusoïdale en fonction du temps du rayonnement solaire global, on obtient:

$$G_n = G_{\max} \cdot \sin \frac{\pi t}{\Delta t} \quad (2-1)$$

avec:

- G_n : valeur instantanée du rayonnement solaire global (W/m^2)
- $G_{\max}$: rayonnement global obtenu au milieu du jour (W/m^2)
- t : temps compté à partir de l'instant de lever du Soleil (heures)
- Δt : durée du jour - intervalle entre le lever et le coucher du Soleil (heures)

Si nous notons I_j l'irradiation journalière, nous obtenons :

$$\begin{aligned} I_j &= \int_0^{\Delta t} G_n \cdot dt \\ &= \int_0^{\Delta t} G_{\max} \cdot \sin \frac{\pi t}{\Delta t} \cdot dt \\ I_j &= \frac{2}{\pi} G_{\max} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (2-2)$$

avec:

I_j en Wh/m^2 .

Ainsi, connaissant Δt et I_j , nous obtenons la valeur de $G_{\max}$ qui, mise dans l'équation (2-1), donne l'expression du rayonnement global en fonction du temps $G_n(t)$.

Pour obtenir la **durée du jour**, nous nous proposons d'admettre que les heures de coucher et de lever du Soleil sont les mêmes partout au Sénégal. Ce faisant, on peut calculer Δt pour chacun des douze (12) mois de l'année.

Des formules approchées (erreur d'environ 0,1 heure pour une latitude inférieure à 65°) donnant les heures de lever et de coucher du Soleil en n'importe quel point de la Terre ont pu être établies [D]:

$$GMT = 12 - Et + \frac{L + \varepsilon \cdot \text{Arc cos}(tg\delta \cdot tg\phi)}{15} \quad (2-3)$$

avec:

L : longitude du lieu (on admet $L < 0$ pour l'Est et $L > 0$ pour l'Ouest)

$\varepsilon = -1$ pour le lever

$= +1$ pour le coucher

ϕ : latitude du lieu (on l'admet positive au Nord et négative au Sud).

Et est l'équation du temps :

$$Et = 0,123 \cdot \cos(t + 87) - \frac{1}{6} \sin 2(t + 10) \quad [\text{heures}]$$

$$\delta : \text{déclinaison} . \quad \delta \cong 23,5 \cos(t + 10) \quad [\text{degrés}]$$

$$t = 0,988 [D + 30,3(M-1)] \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} D : \text{jour du mois} \\ M : \text{numéro du mois} \end{array}$$

En appliquant ces formules à la latitude et à la longitude moyennes du Sénégal, respectivement 14,5°N et 15,3°W (voir Tableau A-1, page 76), et en adoptant le jour moyen pour chaque mois de l' année tel que recommandé par Klein [C], nous aboutissons au tableau 2.1.

En tenant compte de l' heure de lever du Soleil et de la nécessité de prendre t comme l' heure absolue, nous obtenons:

$$G_n = \begin{cases} G_{\max} \bullet \sin \frac{\pi(t - H_L)}{\Delta t}, & \text{si } H_L \leq t \leq H_C. \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

(0 ≤ t ≤ 24)

avec:

H_L : Heure de lever du Soleil

H_C : Heure de coucher du Soleil

Avec les trois (3) dernières colonnes du tableau 2.1, il est possible de retrouver l' expression de $G_n = f(t)$ pour n' importe quelle station ou localité du Sénégal, connaissant l' irradiation journalière.

2.1.2. Un exemple

DAKAR-YOFF . Mois de Mai

L' heure de lever du soleil est : 7h00

L' heure de coucher du soleil est: 19h00

La durée du jour est donc de 12 heures.

D' après le tableau A-2 (page 77), l' irradiation journalière moyenne vaut 6250 wh/m² .

Tableau 2.1 : Durée moyenne du jour au Sénégal pour chaque mois de l'année

Mois	Jour moyen (D)	t (°)	δ (°)	Et (h)	Heure de Lever calculée	Heure de Coucher calculée	Heure de Lever adoptée	Heure de coucher adoptée	Durée du jour (heures)
Janvier	17	16.796	20.98	-0.163	7 h 34	18 h 48	7 h 30	18 h 30	11
Février	16	45.774	13.23	-0.238	7 h 22	19 h 02	7 h 30	19 h 00	11.5
Mars	16	75.681	1.77	-0.142	7 h 12	19 h 08	7 h 30	19 h 00	11.5
Avril	15	104.629	-9.79	0.006	6 h 50	19 h 11	7h 00	19 h 00	12
Mai	15	134.566	-19.15	0.065	6 h 37	19 h 18	7h 00	19 h 00	12
Juin	11	160.55	-23.18	0.007	6 h 35	19 h 26	7h 00	19 h 00	12
Juillet	17	196.414	-21.05	-0.104	6 h 45	19 h 30	7h 00	19 h 00	12
Août	16	225.363	-13.36	-0.073	6 h 51	19 h 20	7h 00	19 h 00	12
Septembre	15	254.311	-2.33	0.084	6 h 54	18 h 59	7h 00	19 h 00	12
Octobre	15	284.248	9.65	0.245	6 h 57	18 h 36	7h 00	18 h 30	11.5
Novembre	14	313.196	18.82	0.254	7 h 6	18 h 26	7h 00	18 h 30	11.5
Décembre	10	339.18	23.08	0.111	7 h 20	18 h 29	7 h 30	18 h 30	11

$$I_j = \frac{2}{\pi} \bullet G_{\max} \bullet \Delta T \Rightarrow G_{\max} = \frac{\pi(t-7)}{2 \bullet \Delta T} = \frac{\pi \times 6250}{2 \times 12} = 818 \text{ w/m}^2$$

d' où:

$$G_n = \begin{cases} 818 \bullet \sin \frac{\pi(t-7)}{12} , & \text{si } 7 \leq t \leq 19. \\ 0 , & \text{sinon.} \end{cases}$$

2.2. La température ambiante

C' est une donnée essentielle pour la modélisation. Elle permet d' avoir l' estimé des pertes de chaleur par convection-rayonnement du système avec l' Extérieur.

Il a été remarqué qu' indépendamment du lieu et de la saison, la valeur maximale de la température ambiante est atteinte entre 12h et 15h, et sa valeur minimale, entre 1h et 4h.

Au Sénégal, la température ambiante, qui varie avec la latitude, est surtout influencée par la géographie (végétation, proximité de l' océan).

2.2.1. Le modèle

Les variations au cours de la journée de la température ambiante peuvent être représentées par le modèle suivant, très couramment utilisé par ailleurs en calcul des charges de climatisation [1] :

$$T_a = \frac{T_{a\max} + T_{a\min}}{2} + \frac{T_{a\max} - T_{a\min}}{2} \bullet \sin [15(t - 9)] \quad (2-5)$$

avec:

t: l' heure considérée, $0 \leq t \leq 24$

T_{amax} : la valeur maximale de la température ambiante (°C)

T_{amin} : la valeur minimale de la température ambiante (°C)

T_a : la valeur instantanée de la température ambiante (°C)

Les fichiers METEO donnent les moyennes mensuelles des températures minimales et maximales pour une station et un mois donnés (Tableaux A-3 et A-4, pages 78 et 79).

2.2.2. Un exemple

TAMBACOUNDA . Mois de FEVRIER

Le tableau A-3 donne: $T_{\text{amin}}=20,2^{\circ}\text{C}$.

Le tableau A-4 donne: $T_{\text{amax}}=36,3^{\circ}\text{C}$.

D' où: $T_a(t) = 28,25 + 8,05 \bullet \sin[15(t - 9)]$

Ainsi $T_a(12\text{h}) = 33,9^{\circ}\text{C}$.

2.3. La vitesse moyenne du vent

Ce paramètre intervient dans la détermination du coefficient de pertes de chaleur par conduction-convection forcée du système avec l' air ambiant (calcul du nombre de Reynolds).

Les moyennes mensuelles compilées à partir des données journalières peuvent être jugées assez représentatives de ce paramètre (voir aussi le tableau A-5, page 80).

CHAPITRE 3

LE CAPTEUR SOLAIRE

C'est le nerf central du système. Il convient par conséquent de lui accorder une attention particulière.

Dans ce chapitre, nous revenons sur les paramètres généraux qui caractérisent un capteur, avant de mettre l'accent sur les capteurs à tubes sous vide et sur le choix du type de fluide caloporteur qui devrait leur convenir, pour enfin terminer avec le modèle que nous proposons pour le capteur.

3.1. Généralités

3.1.1. Orientation et inclinaison d'un capteur

La règle généralement adoptée est d'incliner le capteur suivant un angle correspondant à la latitude du lieu considéré, avec une orientation plein-Sud [D].

3.1.2. Paramètres de fonctionnement

Habituellement, l'intérêt porte sur :

- la surface utile du capteur: c' est celle de son ombre au soleil lorsqu' il est normal aux rayons solaires.
- la température d' entrée du fluide caloporteur
- la température de sortie du fluide caloporteur
- le débit de fluide caloporteur dans le capteur
- la température moyenne de l' absorbeur
- le rendement du capteur: quantité globale d' énergie collectée sur une période SUR valeur totale du rayonnement global au cours de cette même période.

NOTE : Il n' est nullement possible de définir un rendement instantané à cause du critère Inertie thermique.

D' autre part, le rendement dit de régime permanent n' est significatif que si le capteur est alimenté par un fluide à température constante sur toute la période en question. (considérer les mécanismes de transmission de la chaleur)

3.1.3. Inertie thermique

Il existe un certain déphasage dans le temps entre l' énergie solaire captée et l' énergie emportée par le fluide caloporteur. C' est le critère d' inertie thermique. Il est fondamental dans l' analyse d' un capteur solaire.

S' exprimant comme la somme des produits masse-capacité calorifique ($M \cdot C_p$) des différentes parties du capteur, ce critère fait que le capteur est susceptible de fonctionner bien après le coucher du Soleil s' il est bien isolé.

Nous retiendrons que cette inertie engendre la non-pertinence de

l'hypothèse de fonctionnement en régime permanent qui est habituellement faite dans l'étude des capteurs.

3.1.4. Pertes de charge

Elles sont causées dans les canalisations d'écoulement du fluide caloporteur par:

- les frottements
- les obstacles: ils comprennent:
 - *les changements de section
 - *les changements de direction
 - *les accessoires: robinets, vannes,....

Les pertes de charge par frottement sont des pertes linéaires qui varient avec le diamètre de la canalisation ainsi qu'avec la vitesse d'écoulement du fluide.

Une pompe doit suppléer à ces pertes.

Dans cette étude, nous ne nous occuperons pas de la détermination de la puissance des pompes. Car elle exige des paramètres indéfinissables à priori, tels la longueur de la tuyauterie et les différents obstacles rencontrés par le fluide.

3.2. Les capteurs à tube sous vide

Les capteurs plans classiques présentent souvent beaucoup de pertes et ont par conséquent de faibles rendements.

L'amélioration du rendement de ces capteurs s'obtient par une action sur les propriétés optiques des matériaux fonctionnels ou sur leur conductance de pertes.

Cette dernière peut être réduite en minimisant les échanges de chaleur par rayonnement ou par convection.

L' idéal pour l' obtention de hautes températures (supérieures à 100°C) avec des capteurs plans est d' avoir:

-1- un rapport α/ϵ (taux d' absorption SUR émissivité infra -rouge) aussi grand que possible | surface dite SELECTIVE|.

En effet, pour une surface classique, l' augmentation du coefficient α entraîne l' élévation de la température de celle-ci, or la loi de réémission de l' énergie (pertes par rayonnement) est proportionnelle à T^4 (et à ϵ), d' ou l' intérêt, si ce n' est la nécessité, d' avoir un facteur d' émission ϵ aussi faible que possible.

Le tableau 3.1 donne, pour différentes surfaces utilisées dans les capteurs solaires, les taux d' absorption solaire et facteurs d' émission.

-2-des pertes par convection minimales

Si la deuxième condition s' obtient par l' effet de serre, par l' établissement du vide entre l' absorbeur et la vitre (le VIDE est le meilleur isolant qui puisse exister) et par l' isolation de toute partie du capteur non-exposée directement au Soleil, la première nécessite une action sur les propriétés optiques des matériaux constituant par utilisation de surfaces sélectives.

Les capteurs à tube sous vide respectent ces deux conditions et sont, pour cette raison, utilisés lorsqu' il s' agit d' obtenir de hautes températures sans effet de concentration des rayons solaires.

Tableau 3.1 : Propriétés de différentes surfaces utilisées dans les capteurs

SURFACE	α	ε	α/ε
Noir de nickel sur acier galvanisé	0,81	0,17	4,8
Oxyde de cuivre sur Aluminium	0,93	0,11	8,5
Oxyde de cuivre sur Nickel	0,81	0,17	4,8
Noir de chrome sur Acier nickelé	0,95	0,09	10,6
Noir de cuivre sur cuivre	0,89	0,17	5,2
Acier inoxydable	0,76	0,18	4,2
Peinture blanche époxy	0,25	0,91	0,3
Peinture noire époxy	0,95	0,92	1,0
Sulfure de nickel et de zinc	0,95	0,07	13,6
Fer oxydé	0,85	0,12	7,1
Absorbeur Corning (°)	0,95	0,05	19,0

(D'après [C] et [D])

(°) Données du constructeur

Meinel [B] affirme que des températures de l'ordre de 300 à 400°C peuvent être obtenues avec un tel type de capteur, lorsque le rapport α/ε peut atteindre 40.

Dans notre système solaire, nous utilisons des capteurs à tube sous-vide du type CORTEC.

Fabriqués par la société CORNING-USA, ils se présentent sous forme de modules de 1,13m² d'aire utile, regroupant chacun six (6) tubes.

(voir figure 3.1 et FICHE SIGNALÉTIQUE)

3.2.1. Schéma de montage

Pour augmenter l'aire utile de captation, on convient d'associer les modules en SERIE. Néanmoins, chaque module ne peut, tel que le signale la fiche signalétique, supporter qu'un débit maximum de 90 litres/heure (i.e. 2,5 cl/s), ce qui est relativement faible. Donc, s'il y a association en série, celle-ci se limitera, quelque soit le nombre de modules qui la composent, à ces 90 litres/heures. Il devient ainsi nécessaire de faire une association en PARALLELE si l'on désire s'affranchir de cette limitation du débit-capteur à 90 litres/heure.

En conséquence, un bon rendement de captation devra résulter uniquement d'une combinaison optimisée de ces deux sortes d'association.

Le montage habituellement adopté est une association en séries des modules, associées à leur tour en parallèle (figure 3.2). Convenons d'appeler :

-n: le nombre de modules associés en série

-m: le nombre de séries parallèles

alors, le nombre total de modules est donné par le produit ($n \cdot m$). Et l'aire du capteur s'estime par le produit ($n \cdot m \cdot 1,13$) (m²).

CORTEC® CAPTEUR SOLAIRE SOUS VIDE

FICHE SIGNALÉTIQUE

Surface	1,13 m ²
Composants	6 tubes en verre Pyrex distants de 10 mm Épaisseur 2,5 mm Longueur 2.400 mm Diamètre extérieur 100 mm
Caractéristiques	Transmission : 92 % Absorption : 95 % Emissivité infra-rouge : 5 %
Structure absorbante	Tube cuivre soudé au dos d'une plaque de cuivre
Revêtement de l'absorbeur	Noir de chrome Emissivité I.R. : 5 % Absorption totale : 95 %
Isolation	6 tubes sous vide (10 ⁻⁶) avec « getters » + 2 boîtes en matière plastique maintenant les tubes verre + mousse - fibre de verre + feuille d'aluminium
Chassis	Hors tout 2.620 mm x 710 mm x 152 mm Surface : 1,86 m ² % Surface utile 60 % Surface totale
Débit max.	90 litres/heure
Perte de charge	Avec débit de 80 litres/heure : 0,217 bar
Remarques	Entrée et sortie situées du même côté.
Poids	40 kgs

EFFICACITÉ

2 à 5 fois plus grande que celle des capteurs classiques.
Fonctionne même par temps couvert sous lumière diffuse.

FIABILITÉ

En service depuis plus de cinq ans à l'Université du Colorado (U.S.A.) et à Fribourg (R.F.A.).

GARANTIE

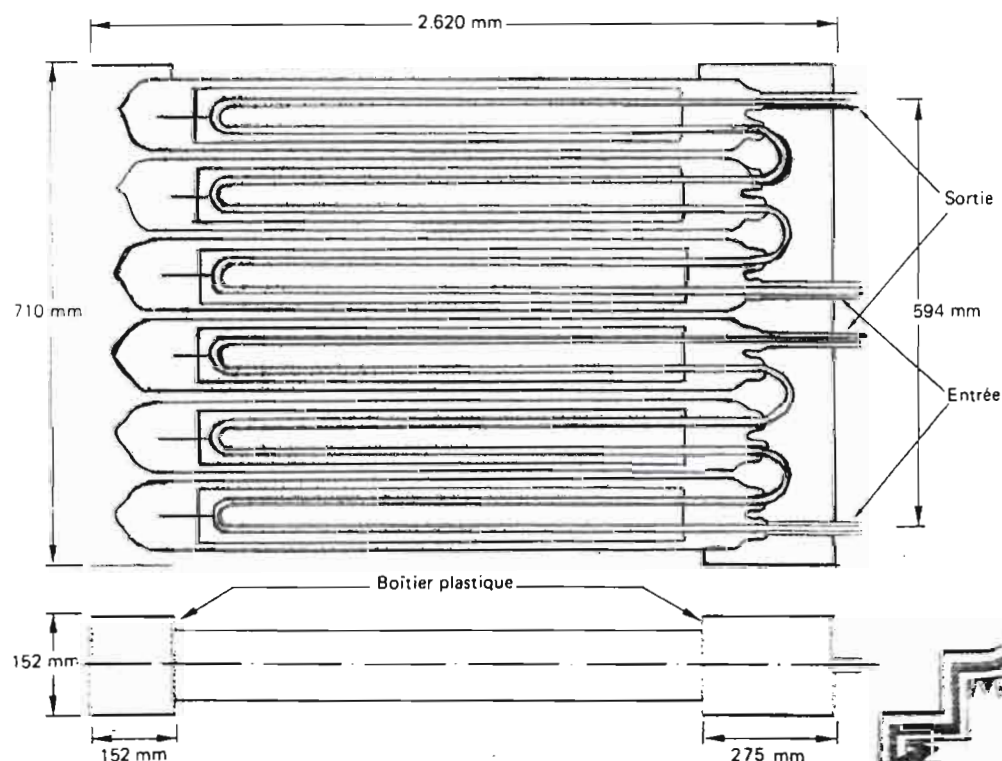
Dix ans.

COTE

Avis technique n° 14/82133

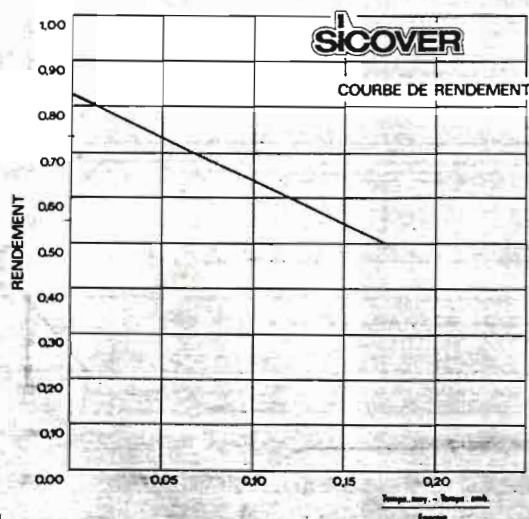
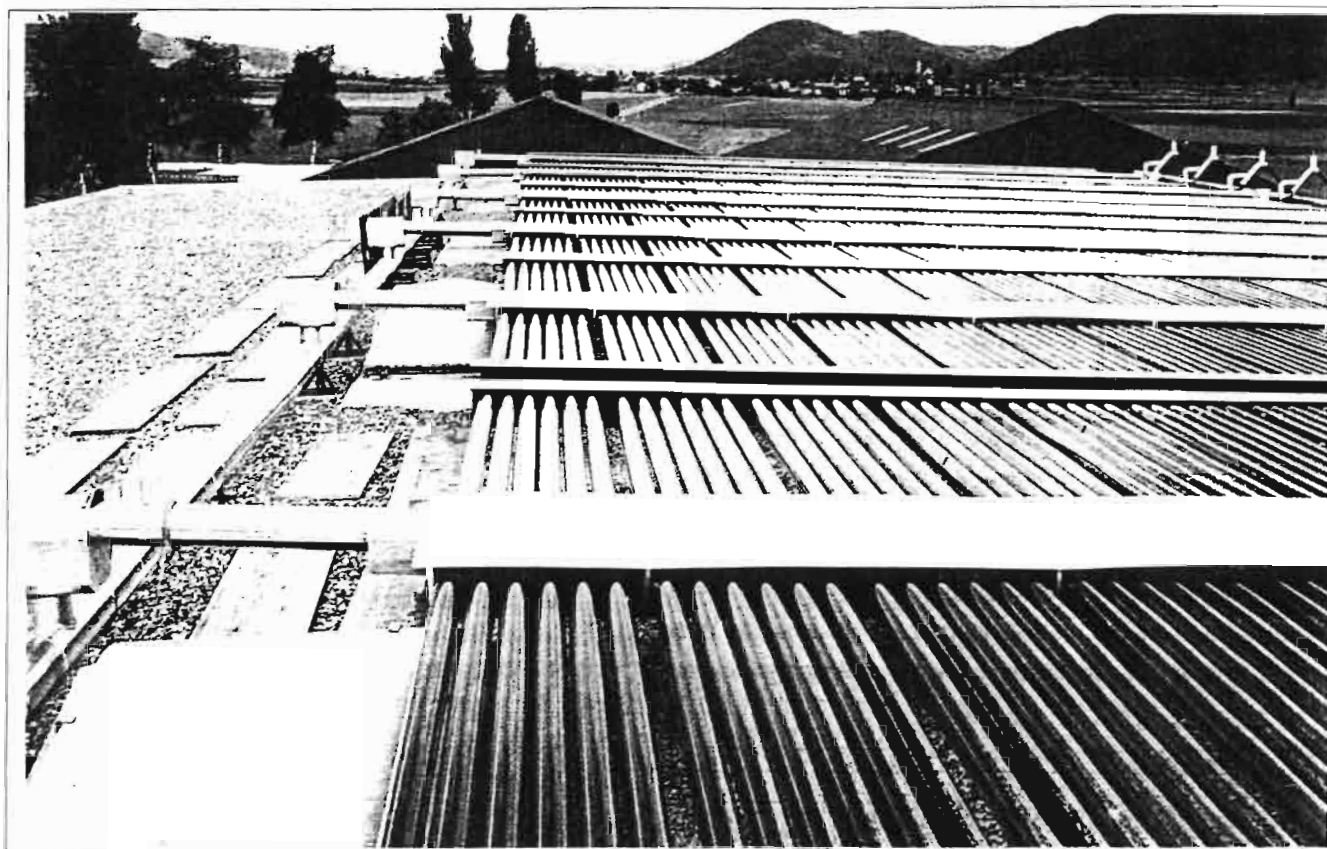
Figure 3.1.

MODULE SOLAIRE
A
SIX ABSORBEURS
Surface 1.13 m²



CORTEC®

CAPTEUR SOLAIRE SOUS VIDE



SICOVER (Département Solaire) - 44, avenue de Valvins - 77212 AVON CEDEX
(Filiale de CORNING FRANCE et SIV)
Tél. : (1) 60.72.50.00 - Télex 690 550 F

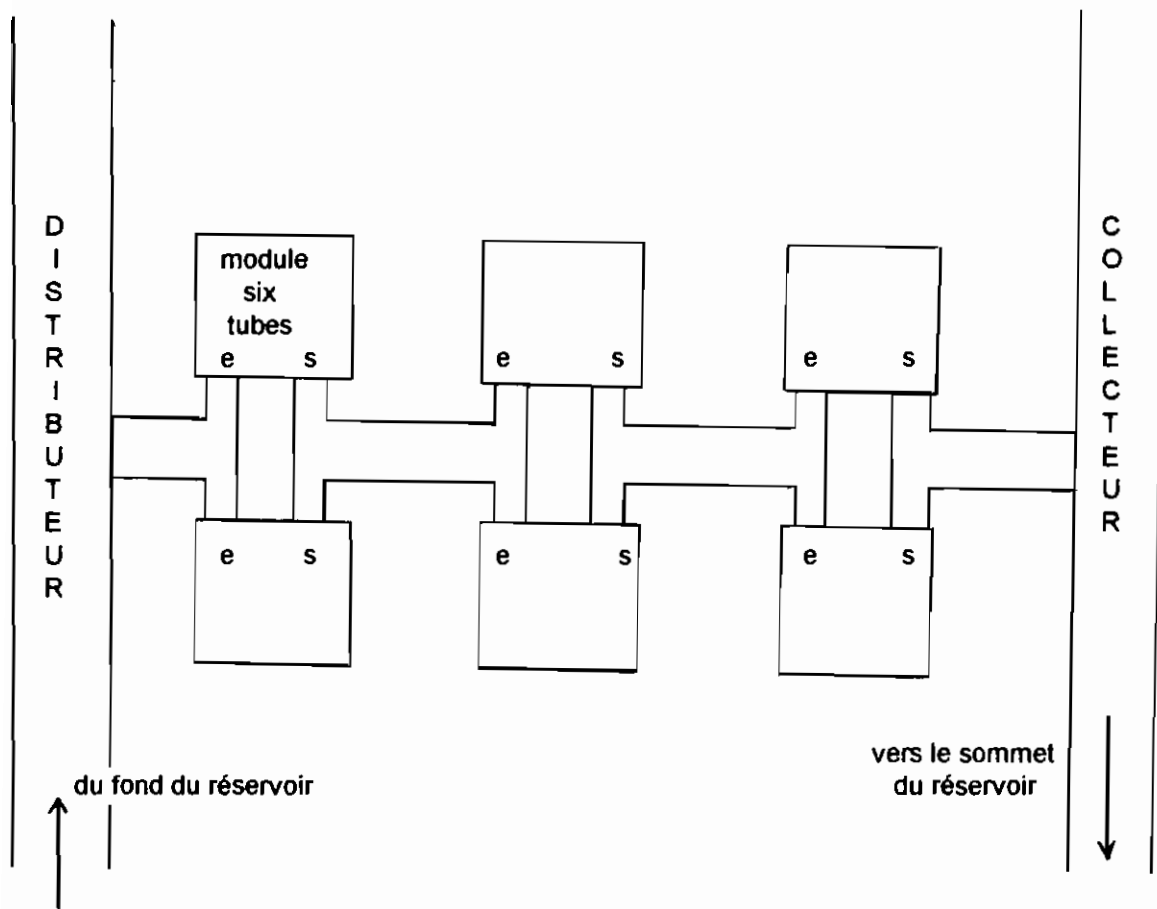


Figure 3.2 : Schéma de montage habituel
Exemple avec $n=3$ et $m=2$

Légende:

e: entrée du module
s: sortie du module

Si nous adoptons un débit-module nominal de 80 litres/heure, le débit-capteur sera de $80 \cdot m$ (l/h).

Notons enfin que des régulateurs automatiques de débit peuvent assurer la bonne répartition du flux fluide entre les différentes séries de modules.

2.2. Fluide caloporteur

Avec les tubes sous-vide, il est possible d'obtenir des températures bien supérieures à 100°C .

L'eau est le fluide caloporteur auquel on pense en premier lieu. Seulement, les températures pouvant être obtenues sont telles que l'utilisation de l'eau comme fluide caloporteur conduirait à sa vaporisation à la sortie du capteur. Il faut donc un autre type de caloporteur, à moins d'utiliser de l'eau surpressée qui est d'un coût énorme.

a) Qualité fondamentale d'un fluide caloporteur

La quantité de chaleur captée par le fluide caloporteur lors de son passage à travers le capteur est :

$$q = M_f \cdot C_{p_f} \cdot (T_{2f} - T_{1f}) \quad (3-1)$$

avec:

M_f : débit du fluide caloporteur dans le capteur (Kg/s)

C_{p_f} : capacité calorifique à pression constante du fluide (J/Kg.°K)

T_{1f} : température d'entrée du fluide au capteur

T_{2f} : température de sortie du fluide du capteur

Ce flux est donc proportionnel à $M.C_p$. Or $M = \rho.Q$ où Q est le débit volumique du fluide (en m^3/s) et ρ sa masse volumique (kg/m^3). Dès l'instant où ce débit volumique est fixé (son maximum dans un module CORTEC est 90 l/h), M devient entièrement dépendant de ρ .

En d'autres termes, $\dot{q}$ est proportionnel à $\rho.C_p$, lesquels facteurs sont des caractéristiques propres au fluide utilisé.

Ce produit $\rho.C_p$ est l'indice primordial de la qualité d'un fluide caloporteur. Car plus il est grand, plus le fluide véhicule de la chaleur.

D'autres critères de choix existent. Nous pouvons citer entre autres :

- la stabilité thermique
- les pressions d'utilisation
- les possibilités de corrosion
- les possibilités d'entartrage
- l'inflammabilité
- la viscosité
- le coût

b) Divers Caloporteurs

*** EAU :** Elle a une viscosité faible, un produit $\rho.C_p$ très grand et un faible coût, mais est limitée par les risques d'ébullition, l'entartrage et la corrosion qu'elle engendre vis à vis des métaux.

*** AIR :** Il est abondant et gratuit, mais sa capacité calorifique est trop faible: il faut environ 3000 litres d'air pour véhiculer autant d'énergie que... 1 litre d'eau [D]. Imaginer le volume de stockeur qu'il requiert !

***GILOTHERM :** C' est un fluide organique à base de polyphényles hydrogénés ou d' hydrocarbures linéaires. Il en existe plusieurs variétés dont trois (3) spécialement adaptées à l' énergie solaire. Nous serons plus particulièrement intéressés par le TH qui couvre la gamme de températures à laquelle nous risquons d' être confrontés (0-340°C). Les deux autres variétés sont l' ADX 10 (jusqu' à 260°C) et l' HVS 13 (180°C).

Le Gilotherm a été mis au point par **Rhône Poulenc Industries** afin d' éviter les défauts liés à l' eau: corrosion, entartrage, ébullition. Notons cependant que leur produit $\rho.C_p$ moyen vaut 450 kcal/m³ .°K (contre 1000 pour l' eau) et leur viscosité, quoique faible, reste supérieure à celle de l' eau.

Dans cette application, nous utiliserons le Gilotherm TH comme fluide caloporteur car, à défaut, nous devrions utiliser l' eau pressurisée pour éviter l' ébullition. Or, il est maintenant établi que celle-ci coûte deux fois plus cher qu' un fluide organique bien adapté [H].

3.3. Le modèle du capteur

Gn, le rayonnement solaire global est une fonction du temps et le flux de chaleur q emporté par le fluide caloporteur est aussi par conséquent une fonction du temps. Cette situation, associée au critère d' inertie thermique, fait que les équations doivent être établies en régime transitoire pour une meilleure approche du phénomène physique [D].

3.3.1. Principe

(figure 3.3)

La vitre reçoit l'énergie solaire, en absorbe 3% et en réfléchit 5%, cependant qu'elle en transmet 92% à l'absorbeur. Celui-ci garde les 95% de cette énergie qui lui a été transmise par la vitre. Cette dernière voit sa température s'élever sous l'effet des 3% d'énergie qu'elle a absorbés. Elle rayonne alors ($\epsilon = 0,05$) vers le ciel et perd également de la chaleur par échange convectif avec le milieu ambiant supposé à la température T_a (température sèche extérieure). L'absorbeur, quant à lui, transmet de la chaleur convective au fluide caloporteur et rayonne vers la vitre ($\epsilon = 0,05$).

Remarque: le vide a été fait entre l'absorbeur et la vitre. On suppose donc qu'il n'y a pas de convection entre ces éléments.

3.3.2. Bilan thermique de la vitre

Dans ce paragraphe et dans ceux qui suivent, nous adoptons les notations suivantes:

A : aire (m^2)

m : masse (kg)

M : débit (kg/s)

Q : quantité d'énergie (W)

h : coefficient d'échange de chaleur ($W/m^2 \cdot ^\circ K$)

Indices : v : vitre

f : fluide caloporteur

cu : absorbeur

t : tube-cuivre

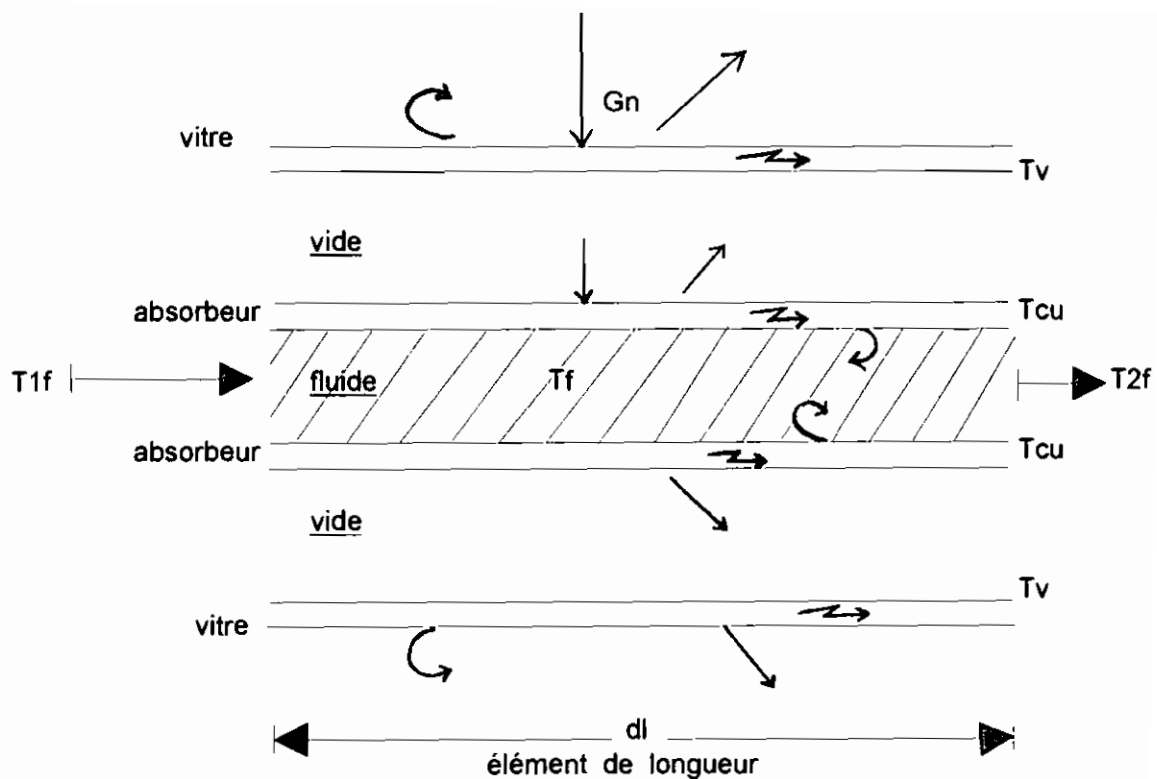
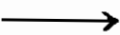


Figure 3.3 : Modélisation des échanges énergétiques au capteur

Légende :

-  chaleur absorbée
-  chaleur rayonnée (rayonnement - transmission - réflexion)
-  chaleur convective

T_v , T_f et T_{cu} sont des températures moyennes

Pour la vitre, nous avons:

$$m_v C p_v \frac{dT_v}{dt} = Q1 + Q2 - Q3 - Q4 \quad (3-2)$$

avec:

$Q1 = A'_v . Gn . \alpha_v$: quantité d' énergie solaire absorbée par la vitre

$Q2 = 2 . A . \sigma . \epsilon_{cu} . (T_{cu}^4 - T_v^4)$: chaleur échangée par rayonnement entre l' absorbeur et la vitre

$\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W/m}^2 . ^\circ\text{K}^4$ est la constante de Stefan-Boltzmann

$Q3 = A_v \epsilon_v \sigma (T_v^4 - T_c^4)$: chaleur rayonnée vers le ciel supposé à $T_c = 0,0552 . Ta^{1,5}$ (d' après la **relation de SWINBANK** [C - pl22], avec T en $^\circ\text{K}$)

$Q4 = A_v h_{va} (T_v - Ta)$: chaleur convective de la vitre vers l' Extérieur

3.3.3. Bilan thermique de l' absorbeur

$$m_{cu} C p_{cu} \frac{dT_{cu}}{dt} = Q5 - Q2 - Q6 \quad (3-3)$$

avec:

$Q5 = \tau_v . \alpha_{cu} . A . Gn$: quantité d' énergie solaire transmise par la vitre et absorbée par le cuivre.

$Q6 = A_i h_{cuf} (T_{cu} - T_f)$: chaleur convective de l' absorbeur vers le fluide caloporteur

3.3.4. Bilan thermique du fluide caloporteur à l'intérieur du capteur

$$m_f C_{p_f} \frac{dT_f}{dt} = Q_6 - Q_7 \quad (3-4)$$

avec :

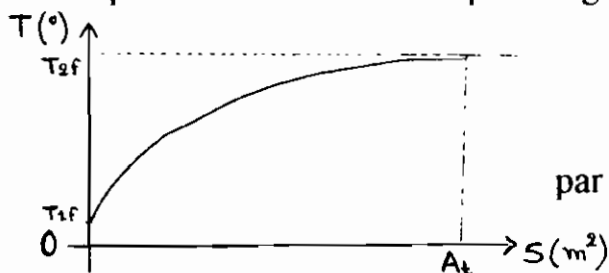
$Q_7 = M_f C_{p_f} (T_{2f} - T_{1f})$: chaleur emportée par le fluide caloporteur

3.3.5. Bilan global

La température moyenne T_f du fluide dans le capteur est un cas, un cas délicat. Certains auteurs (comme Menguy et Cie) l'estiment égale à la moyenne arithmétique des températures d'entrée et de sortie ($T_f = \frac{T_{1f} + T_{2f}}{2}$), DESAUTEL [A] propose:

$$T_f = 0,75T_{2f} + 0,25T_{1f} + \Delta T \quad (3-5)$$

L'équation (3-5), où ΔT représente un gradient de transfert thermique entre la température moyenne de l'absorbeur T_{cu} et T_f , nous paraît plus proche de la réalité que la simple moyenne arithmétique car l'évolution du fluide dans le capteur a la forme donnée par la figure 3.4.



A_t est l'aire totale de l'absorbeur concernée par l'échange avec le fluide

Figure 3.4 : Evolution de la température du fluide dans le capteur

Dans notre cas, T_{cu} et T_f sont très peu différentes en moyenne, et nous prendrons $\Delta T = 0$. Ainsi, obtient - on :

$$T_f = 0,75 T_{2f} + 0,25 T_{1f} \quad (3-6)$$

Cette équation implique que :

$$T_{2f} = \frac{4}{3} T_f - \frac{1}{3} T_{1f} \quad (3-7)$$

et

$$T_{2f} - T_{1f} = \frac{4}{3} (T_f - T_{1f}) \quad (3-8)$$

Le modèle définitif du capteur devient ainsi:

$$(1) \quad m_v C_{p_v} \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v A'_v G_n + 2\varepsilon_{cu} \sigma A (T_{cu}^4 - T_v^4) - \varepsilon_v \sigma A_v (T_v^4 - T_c^4) - A_v h_{va} (T_v - T_a)$$

$$(2) \quad m_{cu} C_{p_{cu}} \frac{dT_{cu}}{dt} = \tau_v \alpha_{cu} A G_n - 2\varepsilon_{cu} A \sigma (T_{cu}^4 - T_v^4) - A_t h_{cuf} (T_{cu} - T_f)$$

$$(3) \quad m_f C_{p_f} \frac{dT_f}{dt} = A_t h_{cuf} (T_{cu} - T_f) - \frac{4}{3} M_f C_{p_f} (T_f - T_{1f})$$

$$(4) \quad T_{2f} = \frac{4}{3} T_f - \frac{1}{3} T_{1f}$$

Ainsi, connaissant la température d'entrée du caloporteur au capteur et les caractéristiques de ceux-ci, ainsi que la valeur instantanée du rayonnement solaire global, pourra-t-on suivre l'évolution dans le temps des températures

T_v , T_{cu} , T_f , et T_{2f} .

3.6. Evaluation des constantes

Pour éviter d'alourdir cette partie de l'étude, nous ne nous étendrons pas sur le détail des calculs de certaines des constantes qui n'apparaissent pas sur la fiche signalétique CORTEC. Nous nous contenterons d'indiquer les valeurs des constantes qui interviennent dans le modèle du capteur. Cependant, en raison de son caractère particulier, nous nous arrêterons quelque peu sur le calcul du coefficient d'échange par convection forcée entre la vitre et l'air ambiant h_{va} .

- * $m_v = 28,9 \text{ kg}$ par module
- * $C_{p_v} = 800 \text{ J/ kg.k}$
- * $\alpha_v = 0,03$
- * $A'_v = 2,02 \text{ m}^2$ par module (partie supérieure du vitrage)
- * $A_v = 4,03 \text{ m}^2$ par module (aire totale du vitrage)
- * $\epsilon_{cu} = 0,05$
- * $A = 1,13 \text{ m}^2$ par module: aire utile du capteur (absorbeur)
- * $\epsilon_v = 0,05$
- * $m_{cu} = 9,9 \text{ kg}$ par module
- * $C_{p_{cu}} = 480 \text{ J/kg.}^\circ\text{K}$
- * $\tau_v = 0,92$
- * $\alpha_{cu} = 0,95$

- * $A_t = 0,74 \text{ m}^2$ par module
- * $H_{cuf} = 600 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ si $T_{cu} < 100^\circ\text{C}$
 $= 1000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$, sinon [B et E]
- * $m_f = 1,43 \text{ kg}$ par module
 ($\rho = 860 \text{ kg/m}^3$ pour le gilotherm)
- * $C_{p_f} = 2174 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}$
- * $M_f = 80 \text{ l/h} = 0,019 \text{ kg/s}$ (débit nominal)

***EVALUATION DE h_{va}**

La détermination des coefficients h d' échange de chaleur par convection est un des domaines qui posent encore des problèmes en matière de transmission de chaleur.

En effet, h est un coefficient qui varie tout le long de la surface en question. Il n' est possible d' utiliser qu' un coefficient moyen. D' autre part, h dépend :

- des caractéristiques géométriques de la surface
- des caractéristiques du fluide
- du régime d' écoulement du fluide (laminaire/turbulent)
- de la définition de la température de la couche de contact surface-fluide

(il peut s' agir d' une température moyenne, d' une température minimale ou d' une température maximale).

Si l' écoulement du fluide est dû uniquement à l' action de la pesanteur, la convection est dite naturelle ou libre.

Si cet écoulement est imposé (pompe, ventilateur,...) la convection est alors dite forcée.

Nous sommes dans ce cas.

Convenons de noter par v_a , la vitesse moyenne du vent et par T_a , la température ambiante, alors étant donné que nous avons affaire à un écoulement externe et vu par ailleurs, l'importance relative du taux de renouvellement de l'air, nous pouvons évaluer les propriétés physiques de la couche de contact à T_a . Pour cela, nous définissons trois (3) gammes de température:

1. $T_a \leq 20$: température de référence = 18°C

2. $20 < T_a \leq 30$: température de référence = 25°C

3. $T_a > 30$: température de référence = 35°C

Connaissant la masse volumique ρ_a , le coefficient de viscosité dynamique μ_a et la conductivité thermique k_a de l'air évalués à la température de référence [E], nous pouvons calculer le nombre de Reynolds, rapporté au diamètre extérieur du tube:

$$Re_d = \frac{v_a \cdot D \cdot \rho_a}{\mu_a} \quad (3-9)$$

et par suite $Nu_d = f(Re_d)$ et enfin:

$$hva = \frac{k_a \cdot Nu_d}{D} \quad (3-10)$$

Le nombre de Nusselt moyen vaut [2] :

$$* Nu_d = 0,43 + 0,48 \cdot Re_d^{0,5} \quad \text{si } 0,1 < Re_d \leq 1000 \quad (3.11)$$

$$* Nu_d = 0,24 \cdot Re_d^{0,6} \quad \text{si } Re_d > 1000$$

Le tableau 3.2 détaille les résultats des calculs réalisés (v_a étant un paramètre).

Tableau 3.2 : Evaluation du coefficient d'échange convectif vitre - air ambiant

Gamme de température Ta (°C)	Température de référence (°C)	ρ_{air} (kg/m³)	$\mu_{\text{air}} * 10^5$ (kg/m.s)	k air (W/m.°C)	ReD	NuD		hva (W/m².°C)
- - 20	18	1,220	1,816	0,0254	6718,1 va	ReD < 1000	impossible	/
						ReD > 1000	47,485 va	12,061 va
20 - 30	25	1,191	1,849	0,0258	6441,3 va	ReD < 1000	impossible	/
						ReD > 1000	46,302 va	11,946 va
30 - -	35	1,149	1,896	0,0265	6060,1 va	ReD < 1000	impossible	/
						ReD > 1000	44,637 va	11,829 va

Tableau 3.2 : Evaluation du coefficient d'échange convectif vitre - air ambiant

Gamme de température Ta (°C)	Température de référence (°C)	ρ_{air} (kg/m³)	$\mu_{\text{air}} \cdot 10^5$ (kg/m.s)	k air (W/m.°C)	ReD	NuD		hva (W/m².°C)
- - 20	18	1,220	1,816	0,0254	6718,1 va	ReD < 1000	impossible	/
						ReD > 1000	47,485 va	12,061 va
20 - 30	25	1,191	1,849	0,0258	6441,3 va	ReD < 1000	impossible	/
						ReD > 1000	46,302 va	11,946 va
30 - -	35	1,149	1,896	0,0265	6060,1 va	ReD < 1000	impossible	/
						ReD > 1000	44,637 va	11,829 va

CHAPITRE 4

LE RESERVOIR DE STOCKAGE

L' intérêt d' un stockeur vient du fait que l' énergie solaire est intermittente et qu' il faut néanmoins assurer son adéquation avec la charge qu' elle doit alimenter. A cet effet, le réservoir de stockage joue un rôle important de régulation.

Dans la pratique, le concepteur d' un système solaire est de prime abord intéressé par le volume du réservoir.

Dans ce chapitre, nous essayons, après avoir défini ses paramètres caractéristiques d' entrer au coeur du réservoir afin d' analyser le comportement dynamique du fluide qui y évolue. Cette analyse nous permettra, et c' est l' objet du troisième et dernier point de proposer un modèle pour ce composant si essentiel.

4.1. Caractéristiques du réservoir

Avant d' entrer dans la définition de ces caractéristiques, convenons d' adopter la notation suivante (figure 4.1):

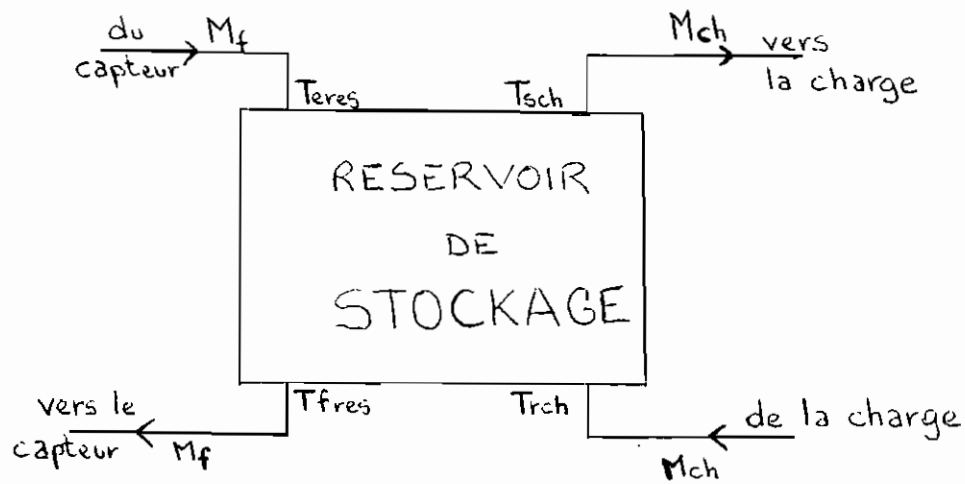


Figure 4.1 : Le sous-système de stockage

T_{eres}: Température d'entrée au réservoir: c' est la température du fluide provenant du capteur.

On la supposera égale à 99% de T_{2f} (perte totale de 1% donc) moyennant un bon calorifugeage de la tuyauterie d' amenée du fluide du capteur au réservoir.

$$T_{ERES} = 0.99 T_{2f} \quad \text{en degrés kelvin.} \quad (4-1)$$

T_{fres}: Température du fond du réservoir: c' est la température du fluide quittant le réservoir en direction du capteur.

De même, on l' estimera valant $\frac{T_{1f}}{99\%}$ pour les mêmes raisons de perte de chaleur sur le tuyau d' amenée par convection naturelle ou forcée avec le milieu ambiant.

$$T_{FRES} = \frac{1}{0.99} T_{2f} \quad \text{en degrés kelvin.} \quad (4-2)$$

T_{sch} : Température de sortie du réservoir vers la charge: c' est la température au sommet du réservoir.

T_{rch} :Température du fluide de retour de la charge.

Ces températures sont les paramètres qui lient le sous-système de stockage aux autres sous systèmes. Nous en venons à présent à ceux qui sont propres au stockeur.

1.1. Dimensions

Il s'agit surtout du volume, celui-ci étant un des principaux paramètres du système solaire lui-même.

Nous savons que le volume du réservoir est donné par:

$$V = \frac{\pi}{4}d^2h \quad (4-3)$$

Cette équation montre que la connaissance du seul volume ne suffit pas pour connaître les paramètres de calcul que sont le diamètre d et la hauteur h (nous y reviendrons lorsqu'il s'agira d'établir le modèle). Par conséquent, le second et dernier indice dimensionnel devra être le rapport h/d .

1.2. Matériau constitutif

Le choix du matériau duquel sera fait le réservoir devra être assez pertinent. Différents critères permettent de faire le choix le plus approprié au système. Nous pouvons citer, entre autres :

- l'épaisseur
- la conductivité thermique
- la tenue à la température

- la masse volumique
- le coût

Pour ce modèle, nous serons plutôt intéressés par les deux premiers (critères) cités.

Soulignons qu'un des matériaux les plus couramment utilisés à l'heure actuelle est l'ACIER INOXYDABLE 18-8 dont la conductivité thermique moyenne dans la gamme 100-300°C vaut 17,53 W/m.°C [E].

4.1.3. Calorifugeage

En raison des températures élevées que peut atteindre le fluide y contenu, le réservoir peut être la source d'importantes pertes énergétiques s'il n'est pas bien calorifugé.

A cet effet, divers types d'isolant existant sur le marché [D] peuvent être utilisés. Et en vue du choix de l'isolant qui convient le mieux, on se base sur les deux critères essentiels suivants:

- la conductivité thermique
- le coût

Précisons que la LAINE DE VERRE dont la conductivité moyenne entre 100 et 300 °C vaut 0,05W/m.°K, est l'isolant le plus souvent utilisé en de pareils cas.

4.2. Analyse du réservoir

La densité du fluide est une fonction décroissante de la température. Le stockeur admet du fluide à des niveaux de température variant dans le temps. Ainsi, les couches de fluide dans le réservoir se répartissent suivant leurs densités (et donc leurs températures). C' est un phénomène naturel dont la conséquence directe est que les particules de fluide plus chaudes se retrouvent au sommet, cependant que le fond du stockeur en contient les moins chaudes. Ce phénomène est appelé STRATIFICATION (de strates = couches, i.e., répartition du fluide en couches de températures différentes, croissantes suivant la hauteur).

Ce phénomène présente un intérêt évident dans le cas d' un système solaire puisqu' ainsi le capteur pourra être alimenté avec un fluide à un niveau de température relativement bas (conséquence : augmentation du rendement de captation), et par ailleurs, la charge pourra recevoir un Caloporteur à la température la plus chaude possible (sommet du réservoir).

Pour l' analyse de la stratification, divers auteurs et spécialistes ont proposé des approches plus ou moins approfondies, souvent différentes mais toujours basées sur les principes premiers de la Transmission de chaleur. Certains d' entre eux préconisent une analyse tridimensionnelle, plus précise mais aussi plus lourde. La plupart proposent cependant une analyse unidimensionnelle suivant la hauteur. Cette dernière est acceptable et donne d' ailleurs de bon résultats dans la pratique.

Si en effet, nous considérons le réservoir qui est cylindrique dans notre système, nous nous rendons compte que la seule variation de température suivant r et θ (figure 4.2) est celle qui serait due aux effets de bord, i.e. aux pertes thermiques par convection et par rayonnement vers le milieu extérieur. Or, si nous supposons que le réservoir est pourvu d' un bon calorifugeage, ces pertes peuvent

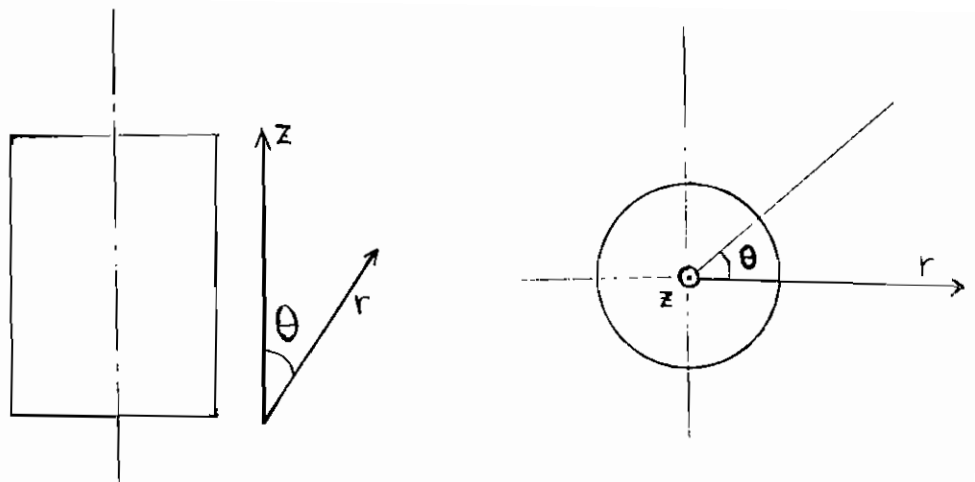


Figure 4.2 : Coordonnées du réservoir

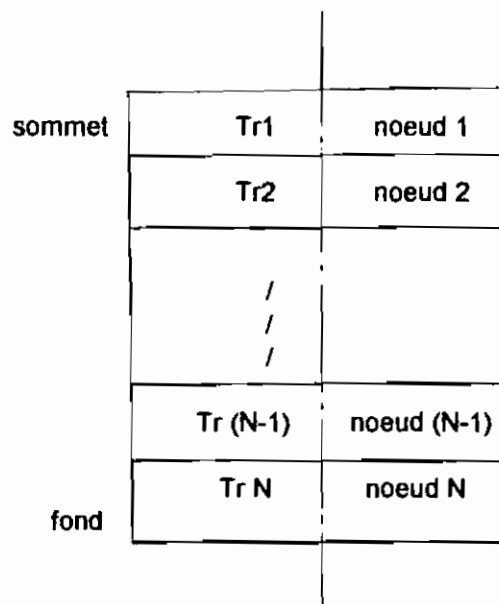


Figure 4.3 : Division du réservoir en noeuds

être faibles et par suite négligeables. Par conséquent, il est possible de négliger ces effets de bord et de considérer en définitive que la seule variation sensible de température est celle qui a lieu suivant la cote (z).

4.3. Le modèle du réservoir

Nous l' avons déjà souligné: le réservoir présente différents niveaux de température. Une méthode d' analyse et de modélisation d' un réservoir stratifié a été développée par Beckman / Duffie dans leur ouvrage [C]. L' analyse qu' ils ont faite est très pratique et le modèle qu' ils en ont tiré mérite que nous le reconduisons pour notre étude .

4.3.1. Quelques hypothèses

Nous admettrons tout d' abord que le réservoir est divisé en N noeuds (figure 4.3). Le noeud i est à la température Tr_i et nous notons que:

$$Tr_1 > Tr_2 > > Tr_{(N-1)} > Tr_N.$$

Faisons à présent une hypothèse sur la manière dont le fluide entrant dans le stockeur à une température $T_{entrée}$ se répartira dans le système constitué par les N noeuds du réservoir. Nous supposons ainsi que cette masse de fluide s' admettra dans le noeud dont la température est plus proche de $T_{entrée}$ tout en lui restant inférieure (figure 4.4).

Exemple : soit un réservoir à 3 noeuds avec :

$$Tr_1=100^{\circ}\text{C} , Tr_2= 96^{\circ}\text{C} \text{ et } Tr_3= 89^{\circ}\text{C}$$

alors une masse de fluide de température $T_{entrée} = 97^{\circ}\text{C}$ s' admettra dans le noeud 2.

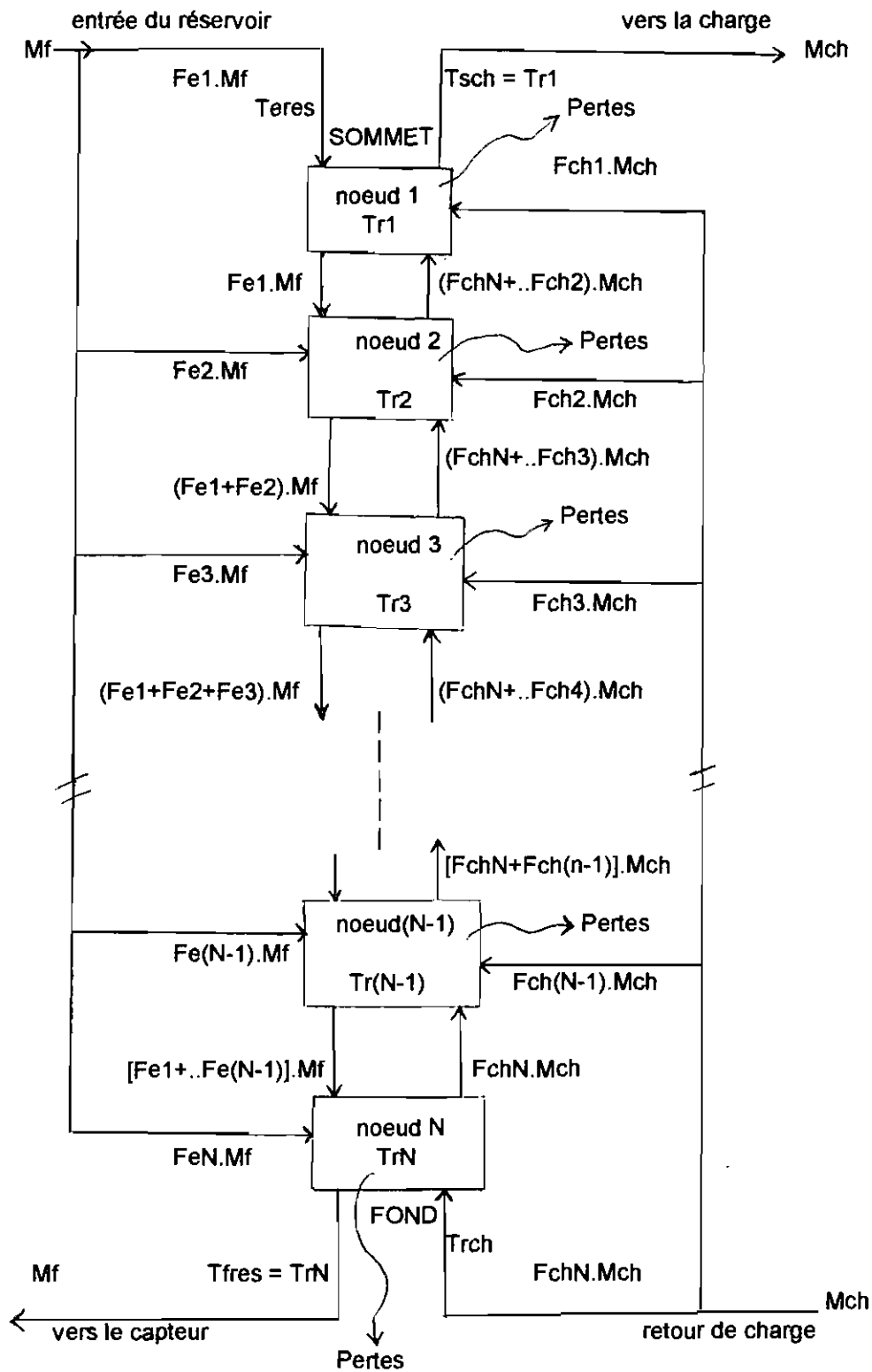


Figure 4.4 : Modélisation des échanges énergétiques au réservoir

L'hypothèse ci-dessus induit la nécessité de poser une condition sur le volume d'un noeud et donc sur le nombre maximal de noeuds admissible pour un volume de stockage donné.

Qualitativement, cette condition qui s'explique par la nécessité d'assurer la répartition du fluide entrant dans un noeud et un seul, s'articule ainsi:

"Le volume d'un noeud doit être supérieur à celui de la masse de fluide entrant dans le réservoir pendant le temps Δt correspondant au pas de temps de l'algorithme de résolution du système d'équations différentielles qui sera tiré de la modélisation."

Quantitativement, nous devons avoir:

$$\frac{V}{N} \geq \frac{(mf + mch)}{\rho_f} \quad (4-4)$$

Cette condition se trouve parfaitement réalisée dès que le volume du réservoir dépasse0,2 m³.

Le principe engendré par cette hypothèse sert de base à l'étude du stockeur. Ainsi, conçoit-on que lorsqu'une certaine masse de fluide entre dans le réservoir et s'admet dans un noeud, ce dernier perd vers son voisin une quantité de fluide d'égale volume, et celui-ci perd également une quantité de fluide de volume toujours identique vers son autre voisin, et ainsi de suite.

4.3 .2. Les équations

La définition d'une fonction de contrôle notée F_{ei} permet de déterminer le noeud i qui recevra le fluide provenant du capteur. Cette fonction qui se construit à

partir de l'hypothèse faite ci-dessus est telle qu'il existe un et un seul i ($1 \leq i \leq N$) tel que $F_{ei}=1$. Elle se définit ainsi, moyennant la supposition de l'existence d'un noeud fictif ($N+1$) à la température nulle et d'un noeud fictif 0 à la température infinie.

$$\begin{aligned}
 T_{r0} &= +\infty \\
 T_{r(N+1)} &= 0 \\
 F_{ei} &= \begin{cases} 0 & , \text{ si } i=0 \text{ ou } i=N+1 \\ 1 & , \text{ si } i=1 \text{ et } T_{eres} \geq T_{ri} \\ 1 & , \text{ si } T_{r(i-1)} \geq T_{eres} \geq T_{ri} \\ 0 & , \text{ autrement} \end{cases} \quad (4-5)
 \end{aligned}$$

De manière analogue, nous définissons une fonction de contrôle **Fchi** permettant le repérage du noeud i qui reçoit le retour de charge:

$$F_{chi} = \begin{cases} 0 & , \text{ si } i=0 \text{ ou } i=N+1 \\ 1 & , \text{ si } i=N \text{ et } T_{rch} \leq T_{ri} \\ 1 & , \text{ si } T_{r(i-1)} \geq T_{rch} \geq T_{ri} \\ 0 & , \text{ autrement} \end{cases} \quad (4-6)$$

Nous définissons un débit d'échange noté **Mechi** qui exprime le débit net provenant du noeud ($i-1$) et entrant dans le noeud i .

$$M_{echi} = \begin{cases} 0 & , \text{ si } i=1 \text{ ou } i= N+1 \\ M_f \sum_{j=1}^{i-1} F_{ej} & , \text{ si } i=N \\ M_f \sum_{j=1}^{i-1} F_{ej} - M_{ch} \sum_{j=i+1}^N F_{chj} & , \text{ si } 1 < i < N \end{cases}$$

Il s'agit maintenant et pour terminer d'appliquer l'équation de la conservation de l'énergie au noeud i:

$$mr_i \frac{dT_{ri}}{dt} = \frac{h_{pi} \cdot A_{ri}}{Cp_f} (T_{hang} - T_{ri}) + F_{ei} \cdot M_f (T_{eres} - T_{ri}) + F_{chi} \cdot M_{ch} (T_{rch} - T_{ri}) \quad (4-7)$$

$$+ \begin{cases} M_{echi} [T_{r(i-1)} - T_{ri}] & \text{ si } M_{echi} > 0 \\ M_{ech(i+1)} \cdot [T_{ri} - T_{r(i+1)}] & \text{ si } M_{ech(i+1)} < 0 \end{cases}$$

(i= 1 à N)

Le premier terme du second membre de l'équation (4-7) représente les pertes vers le milieu extérieur au réservoir dans le hangar .

Nous avons en effet supposé que le réservoir est installé dans un hangar, ceci en vue de le préserver de la convection forcée ambiante et de sauvegarder l'isolant de l'humidité (par exemple, la laine de verre doit rester absolument sèche pour conserver toutes ses propriétés isolantes).

Dans ce même ordre d' idées, nous avons aussi admis que les parois, le plancher et le plafond du hangar, ainsi que l' air ambiant dans celui-ci sont maintenus à la température constante $T_{hang} = 30^{\circ}\text{C}$.

3.3. Evaluation des constantes

L' équation (4-7) fait apparaître:

*** m_{ri}** : c' est la masse du fluide contenu dans le noeud i . Elle s' exprime par:

$$m_{ri} = \rho_f \frac{V}{N} \quad (4-8)$$

où $\rho_f = f(T_{ri})$ est la masse volumique du fluide i .

*** A_{ri}** : c' est l' aire intérieure du réservoir directement exposée à l' extérieur via l' isolant. On note que (figure 4.5):

$$A_{ri} = \begin{cases} \frac{\pi d h}{N} + \frac{\pi d^2}{4} & \text{si } i=1 \text{ ou } i=N \\ \frac{\pi d h}{N} & \text{si } 1 \leq i \leq N \end{cases} \quad (4-9)$$

où d et h sont respectivement le diamètre intérieur et la hauteur du réservoir hors isolant.

*** h_{pi}** : c' est un coefficient global qui tient compte:

- de la conduction à travers le matériau duquel est constitué le réservoir (λ_{mat} / e_{mat})
- de la conduction à travers l' isolant ($\lambda_{isol} / e_{isol}$)

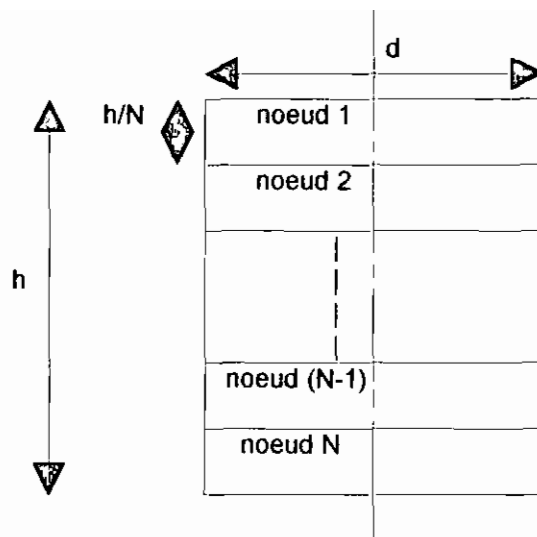


Figure 4.5 : Evaluation de l'aire intérieure d'un noeud

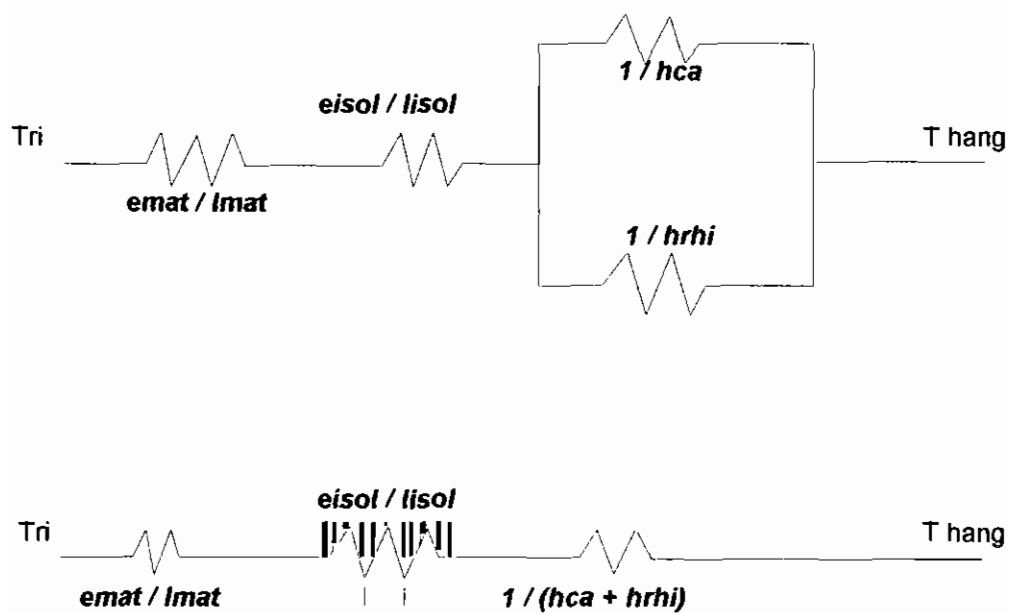


Figure 4.6 : Analogie électrique relative au coefficient H_{pi}

- de la convection libre avec l' air à la température Thang (hca)
- du rayonnement avec les parois du hangar à la température Thang (hrhi)

On peut l' estimer en prenant comme surface de référence l' aire intérieure du réservoir et en supposant que la température de sa paroi intérieure est égale à celle du noeud correspondant .

En nous basant sur l' Analogie électrique (figure 4.6), nous aboutissons à l' expression de hpi:

$$\frac{1}{h_{pi}} = \frac{e_{mat}}{\lambda_{mat}} + \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + \frac{1}{hca + hrhi} \quad (4-10)$$

*hrhi peut être approché en fonction de Tri ainsi qu' il suit:

$$\begin{aligned} hrhi &= \frac{\sigma(Tri^4 - Thang^4)}{Tri - Thang} \\ &= \sigma(Tri^2 + Thang^2)(Tri + than) \end{aligned} \quad (4-11)$$

*hca: l' évaluation du coefficient d' échange par convection (libre ici) est une opération assez difficile (on se reportera aux constats faits lorsqu' il s' est agi d' effectuer l' estimation du coefficient d' échange convectif vitre-air ambiant pour le capteur - page 36).

Pour cette raison, et ne connaissant pas encore les différents paramètres qui devraient intervenir dans le calcul de la moyenne de ce coefficient, nous utiliserons les valeurs données par Kreith [E]. Selon ce thermicien, les coefficients moyens d' échange de chaleur en convection libre avec l' air qu' on

rencontre dans l'industrie se situent entre 5,8 (pour les basses températures) et 29,0 W/m².°K (aux hautes températures). Dans cette étude, nous nous situons dans le domaine des températures moyennes, nous supposons donc que le coefficient hca vaudra:

$$hca = \frac{5,8 + 29,0}{2} = 17,4 W/m.K$$

Avec la fin de ce chapitre, se termine la modélisation physique de la composante primaire (capteur-réservoir) du système solaire.

Pour le système - Machine à absorption, il ne sera pas nécessaire d'aller plus loin.

Cependant, et c'est l'objet du prochain chapitre, l'échangeur du système - Production de vapeur d'eau doit également bénéficier d'un modèle physique.

CHAPITRE 5

L' EVAPORATEUR

Cet appareil dont le primaire est parcouru par le fluide caloporteur servira à vaporiser l' eau, fluide du secondaire.

Avec ce chapitre, nous nous proposons, après quelques rappels sur ce composant, de définir, pour l' évaporateur, un modèle avant de traiter de la manière dont celui-ci pourrait être accommodé au modèle de la composante primaire du système.

5.1. Diverses considérations sur les évaporateurs

L' analyse du transfert de chaleur lors d' un changement de phase (ici l' ébullition) est l' un des aspects les plus délicats de la Thermique. Il ne s' agit plus d' un transfert de chaleur sensible, mais d' un transfert de chaleur latente au fluide à vaporiser.

Dans un évaporateur, il se passe divers phénomènes. Le fluide du secondaire peut se présenter à une température d' entrée inférieure à sa température d' ébullition. Dans ce cas, il est dit sous-refroidi. Il échange alors de la chaleur sensible avec le fluide du Primaire jusqu' à ce que sa température d' ébullition soit

atteinte. Dès ce moment, le fluide ne reçoit plus que de la chaleur latente, sa température restant constante jusqu' à ce que la vapeur obtenue soit sèche. Et si l' échange calorifique se poursuit alors, la température de la vapeur croît par échange de chaleur sensible cette fois-ci: c'est la surchauffe (figure 5.1).

Donc, on peut, dans un évaporateur, arriver jusqu' à la surchauffe ou se limiter à produire de la vapeur saturée, sèche ou non, dépendamment du design et du dimensionnement de cet appareil, ainsi que des températures d' entrée-sortie des fluides en question. Car en effet, la capacité d' échange d' un évaporateur dépend de nombreux paramètres, parmi lesquels:

- la surface d' échange S
- la différence des températures d' entrée des fluides
- les débits thermiques unitaires qt ($qt=M \times C_p$ en J/s.°K) des fluides.
- la conductivité thermique du métal
- l' épaisseur du métal.

5.2. Le modèle

Habituellement, on convient de modéliser les évaporateurs de la même manière que les échangeurs classiques, en les divisant en deux parties; d' une part, celle qui assure le transfert sensible et d' autre part, celle qui réalise la vaporisation à température constante.

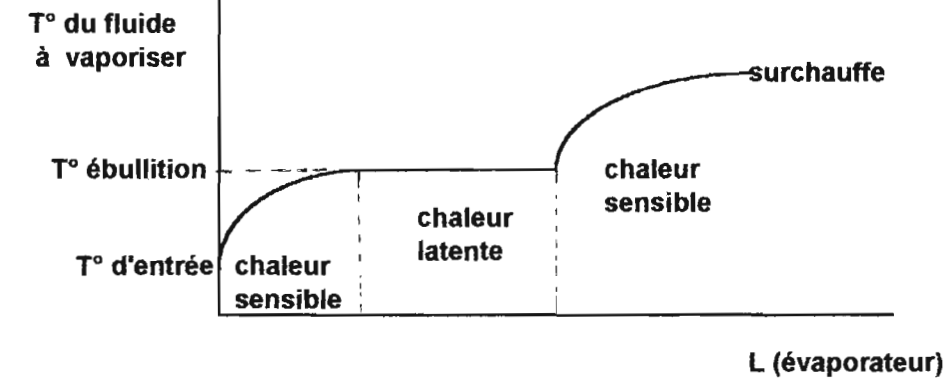


Tableau 5.1 : Efficacité d'un échangeur suivant le type de circulation

Type de circulation	E (NUT)	E _{lim} pour NUT infini
Contre-courant	$E = \frac{1 - \exp[-(1 - R)NUT]}{1 - R \exp[-(1 - R)NUT]}$	$E_{\text{lim}} = R$
Co-courant	$E = \frac{1}{1 + R} \{1 - \exp[-(1 + R)NUT]\}$	$E_{\text{lim}} = \frac{1}{1 + R}$
(1-N)	$E = \frac{2}{(1 + R) + \sqrt{1 + R^2} \frac{1 + \exp[-NUT\sqrt{1 + R^2}]}{1 - \exp[-NUT\sqrt{1 + R^2}]}}$	$E_{\text{lim}} = \frac{2}{1 + R + \sqrt{1 + R^2}}$

5.2.1. L' échangeur - Chaleur sensible

Le modèle le plus souple, et c' est celui que nous utiliserons, est celui du Nombre d' Unités de Transfert (NUT). Rappelons que:

$$NUT = \frac{KS}{qt_{\min}} \quad (5-1a)$$

avec:

K : coefficient de transfert de chaleur ($W/m^2 \cdot ^\circ K$)

S : surface d' échange (m^2)

K.S est une constante constructive ($W/^\circ K$)

$qt_{\min}$: plus petit débit thermique unitaire ($J/s \cdot ^\circ K$).

L' efficacité d' un échangeur peut être exprimée en fonction du NUT et du rapport R des débits thermiques unitaires:

$$E = f(NUT, R)$$

$$\text{avec} \quad R = \frac{qt_{\min}}{qt_{\max}}, \quad 0 \leq R \leq 1 \quad (5.1b)$$

Le tableau 5.1 donne l' expression de l' efficacité suivant le type de circulation adopté [2]. Il indique également, à titre d'information, l' efficacité limite qu' on peut s' attendre à avoir dans un échangeur donné.

Il existe en outre des relations pratiques entre E, R et les températures:

- Tcv : température d' entrée du fluide du primaire à l' échangeur-Chaleur sensible
- Tcs : température de sortie du fluide du primaire

-Tfe : température d' entrée du fluide à vaporiser

-Tfs : température d' ébullition du fluide à vaporiser

Ces relations sont:

*si $qt_{min} = qtc = Mch.C_{pl}$,

$$R = \frac{Tfs - Tfe}{Tcv - Tcs} \quad , \quad E = \frac{Tcv - Tcs}{Tcv - Tfe} \quad (5.2)$$

*si $qt_{min} = qtf$,

$$R = \frac{Tcv - Tcs}{Tfs - Tfe} \quad , \quad E = \frac{Tfs - Tfe}{Tcv - Tfe} \quad (5.3)$$

5.2.2. L' échangeur - Vaporisateur

Ici, le fluide "froid", i.e. l' eau, a déjà atteint sa température d' ébullition. Il va à présent recevoir de la chaleur latente du Caloporteur. En notant:

Tce : la température d' entrée du Caloporteur à ce second échangeur
nous obtenons [E]:

$$Tcv = Tfs + (Tce - Tfs)EXP\left(-\frac{KS}{qt_c}\right) \quad (5-4)$$

d' où:

$$Tce = \frac{Tcv - Tfs}{EXP\left(-\frac{KS}{qt_c}\right)} + Tfs \quad (5-5)$$

5.3. Utilisation pratique du modèle

La connaissance des températures d'entrée et de sortie du fluide à vaporiser, des débits des deux fluides, du type de circulation et de la constante constructive KS permet de déterminer les températures d'entrée (T_{ce}) et de sortie (T_{cs}) du fluide caloporteur.

Car en effet, avec les valeurs de KS et des débits thermiques unitaires, on peut calculer R et le NUT suivant les formules (5-1). Ensuite, grâce au tableau 5.1, on détermine E. Ces valeurs de R et E utilisées dans les formules (5-2) ou (5-3) nous donnent alors T_{ce} (via la formule 5-5) et T_{cs} qui sont les paramètres qui, associés à M_{ch} , permettent, à partir de l'évaporateur, de remonter jusqu'au capteur en passant par le réservoir de stockage.

Avec ce modèle de l'évaporateur se termine la modélisation physique du système. Nous allons à présent passer au traitement informatique du problème.

CHAPITRE 6

RESOLUTION INFORMATIQUE

Les chapitres qui précèdent ont servi à établir les modèles physiques de chacun des composants étudiés. Dans celui-ci, nous allons nous atteler à combiner ces différents modèles afin d'en faire un modèle informatique de simulation du système. Nous utiliserons pour cela l'approche algorithmique descendante ou TOP-DOWN DESIGN.

A partir de l'algorithme général (figures 6.1, 6.2 et 6.3), nous allons décomposer le programme en plusieurs modules, chacun d'entre eux étant destiné à une tâche spécifique.

6.1. Initialisation

Les conditions initiales jouent un rôle important dans la programmation. Considérées du point de vue de la résolution numérique des équations différentielles, elles sont d'une influence non négligeable.

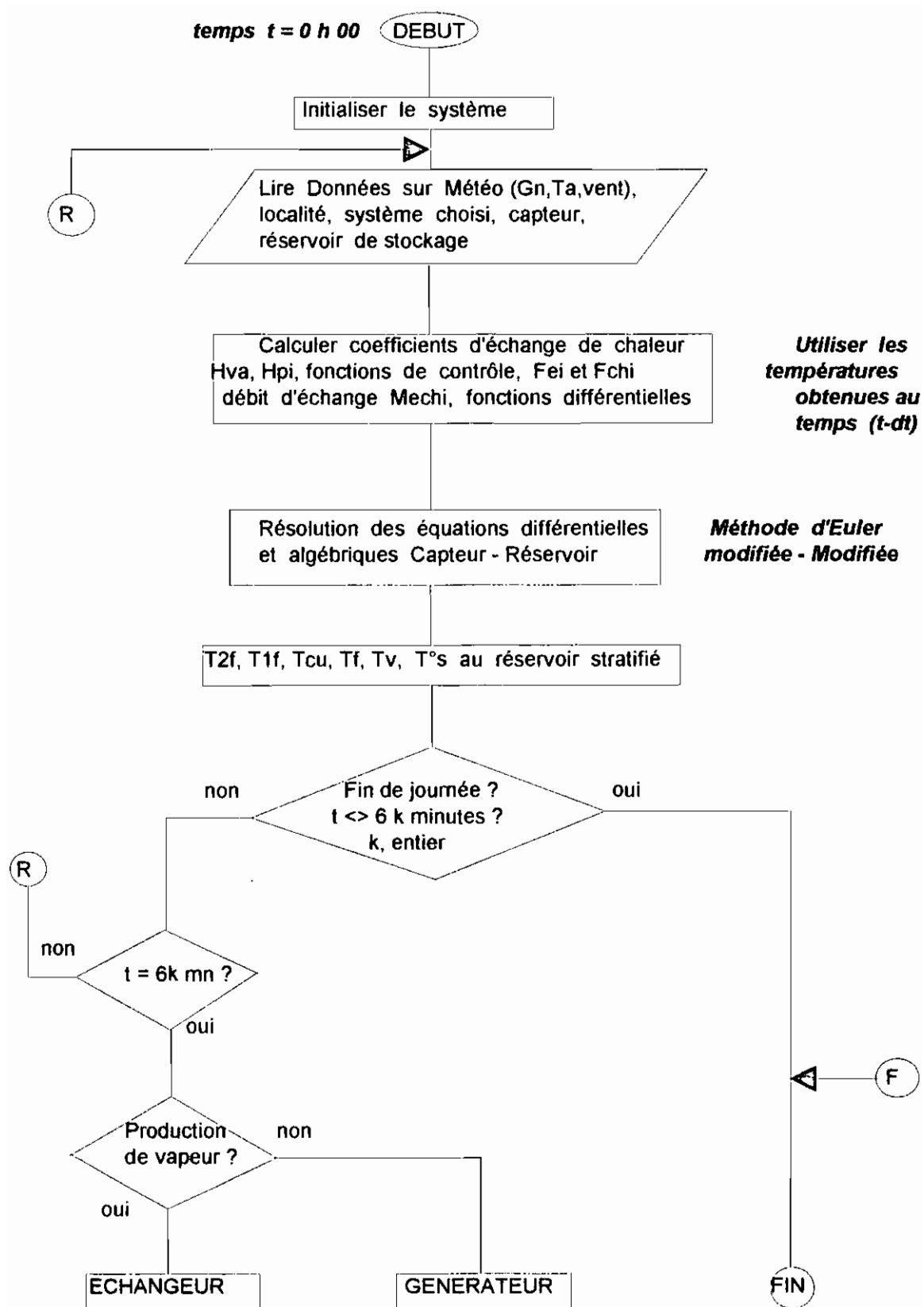


Figure 6.1 : Algorithme général [sur 24 heures]

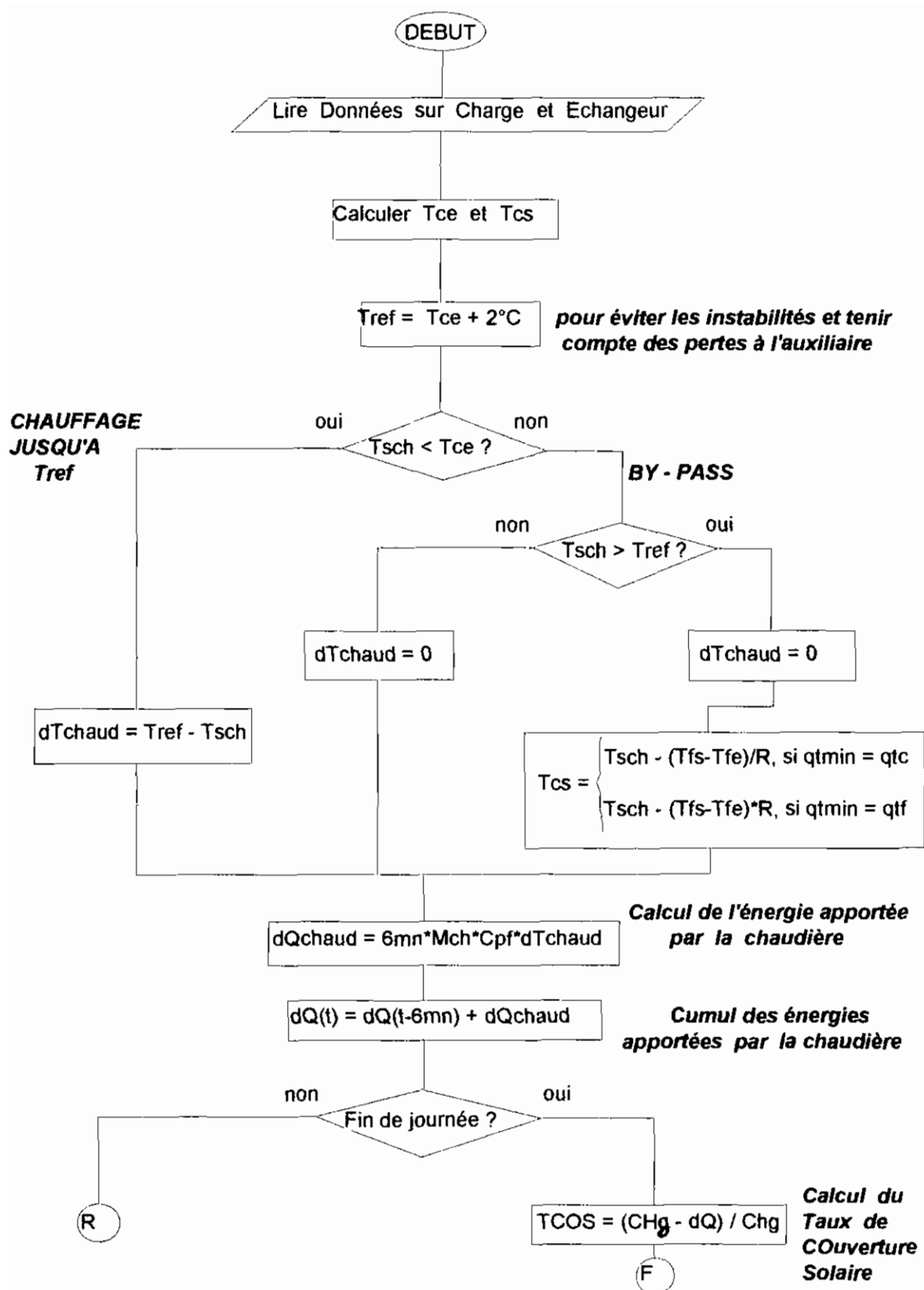


Figure 6.2 : Algorithme de la procédure ECHANGEUR

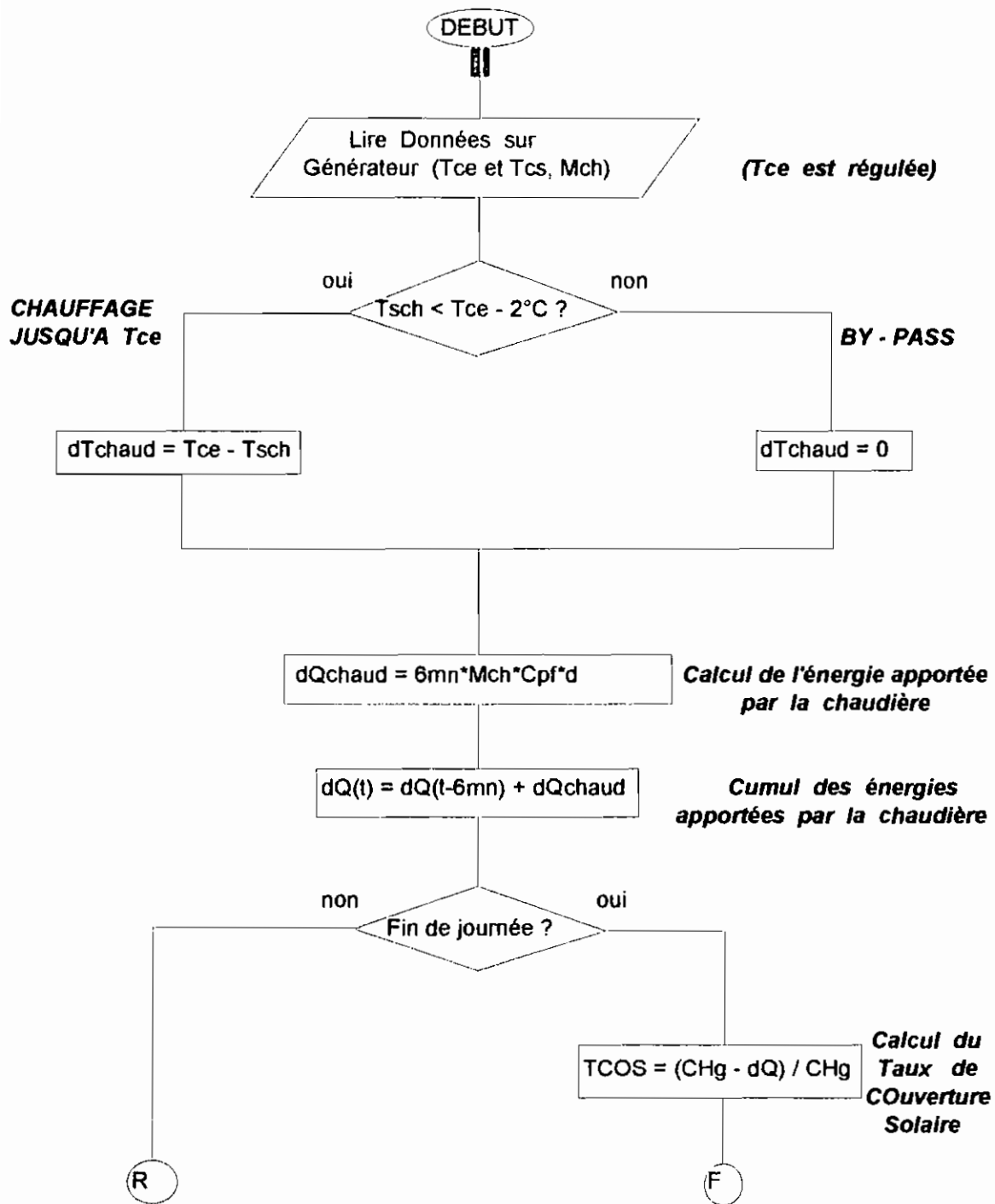


Figure 6.3 : Algorithme de la procédure GENERATEUR

6.1.1. Période initiale

Nous supposons que le système commencera à fonctionner pour la première fois un jour du mois de Janvier à partir de 0 h 00 TU.

6.1.2. Conditions initiales au capteur

Il s'agit des valeurs initiales des températures moyennes du vitrage, de l'absorbeur et du fluide dans le capteur. Nous les prendrons ainsi qu'il suit:

- Température du vitrage: $T_v = 30^{\circ}\text{C}$
- Température de l'absorbeur: $T_{cu} = 30^{\circ}\text{C}$
- Température du fluide: $T_f = 30^{\circ}\text{C}$

6.1.3. Conditions initiales au réservoir de stockage

Nous supposons qu'au sommet du réservoir, la température T_{sch} vaut 40°C et qu'il y'aura une baisse de 1°C par noeud dans le sens sommet-fond du réservoir. Ceci voudrait dire que $T_{fres} = T_{sch} - N = (40 - N)^{\circ}\text{C}$ où N est le nombre de noeuds (N devant être inférieur à 4, comme préconisé par Beckman/Duffie).

Pour rejoindre les conditions initiales de fonctionnement, nous ferons tourner "à vide" le système sous les conditions initiales ci-dessus pendant une journée entière de ce même mois de Janvier. Comprendre par "à vide" le fait qu'il n'y aura pas de calcul de taux de couverture solaire pour cette journée d'initialisation. Les conditions ainsi obtenues à minuit de ce jour seront prises comme conditions initiales de fonctionnement.

6.2. Lecture des données

Un ensemble de formulaires seront présentés à l'utilisateur pour lui permettre de fournir les différentes données nécessaires. Dans quelques cas, il devra faire des choix, dans certains autres, des valeurs par défaut seront fournies.

6.2.1. Conditions météorologiques

L'utilisateur a deux possibilités. Soit il utilise les valeurs par défaut que nous fournissons en choisissant une des stations proposées, et dans ce cas, il a la possibilité d'en changer certaines, soit il fournit ses propres données mensuelles.

Sont concernés:

- le rayonnement solaire global moyen mensuel
- la moyenne mensuelle des températures minimales
- la moyenne mensuelle des températures maximales
- la vitesse moyenne mensuelle du vent
- les heures moyennes mensuelles de lever et de coucher du Soleil.

Ces données permettent d'obtenir les modèles du rayonnement solaire global (**fonction Gn**) et de la température ambiante (**fonction Ta**) selon la théorie exposée au chapitre 2.

Les données sur la vitesse du vent nous permettent elles d'obtenir le coefficient d'échange vitre - milieu extérieur par conduction-convection forcée (**fonction h_{va}**).

6.2.2. Aire de capteur

Ici, l' on aura besoin du nombre **n** de modules en séries et du nombre **m** de séries parallèles choisis par l' utilisateur , tout simplement!

Le débit à travers une série sera supposé égal au débit nominal: **80 l/h** .

6.2.3. Réservoir de stockage

Les données sur le **nombre de noeuds N**, sur la géométrie (**volume, rapport hauteur / diamètre**) ainsi que sur les caractéristiques du matériau du réservoir et de l' isolant (épaisseur, conductivité thermique) nous permettent d' obtenir les **fonctions Fei , Fchi , Mechi , hpi et Ari** .

6.2.4. Charge à alimenter

Considérant que la charge peut varier tout au long de la journée, il est permis à l' utilisateur de fournir des données pouvant différer toutes les deux heures. Ces données sont :

***Production de vapeur**

- température d' entrée de l' eau à l' échangeur
- température d' ébullition de cette eau à sa pression
- débit de fluide caloporteur à l' évaporateur
- débit d' eau
- constante KS de l' évaporateur et type de circulation

***Machine à absorption**

- température d'entrée du Caloporteur au Générateur
- température de sortie de ce fluide du Générateur
- son débit dans le Générateur

6.3. Résolution des équations différentielles et algébriques

La méthode d' Euler modifiée nous est apparue comme l' algorithme le plus approprié pour la résolution des équations différentielles [F]. C' est une méthode du type prédicteur - correcteur dont l' organigramme est donné par la figure 6.4, en considérant une équation de la forme $\frac{dX}{dt} = f(t, X)$ [dans le cas d' un système de n équations différentielles, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$] et en notant par:

- h : le pas de temps
- X_{n+1P} : valeur prédite au temps t
- X_{n+1C} : valeur correcte au temps t
- X_n : valeur obtenue à l' étape de temps précédente (t-h)
- ε : l' erreur relative permise

Remarque: Considérant que plus la valeur prédite est proche du résultat final, plus la correction est aisée, nous avons modifié le prédicteur de la méthode. Ainsi ce prédicteur n' est plus la méthode simple d' Euler, mais la méthode plus précise de Runge - Kutta d' ordre 2 également appelée...méthode d' Euler modifiée.

L' algorithme de la figure 6.4 peut donc être appelé **méthode d' EULER modifiée-Modifiée.**

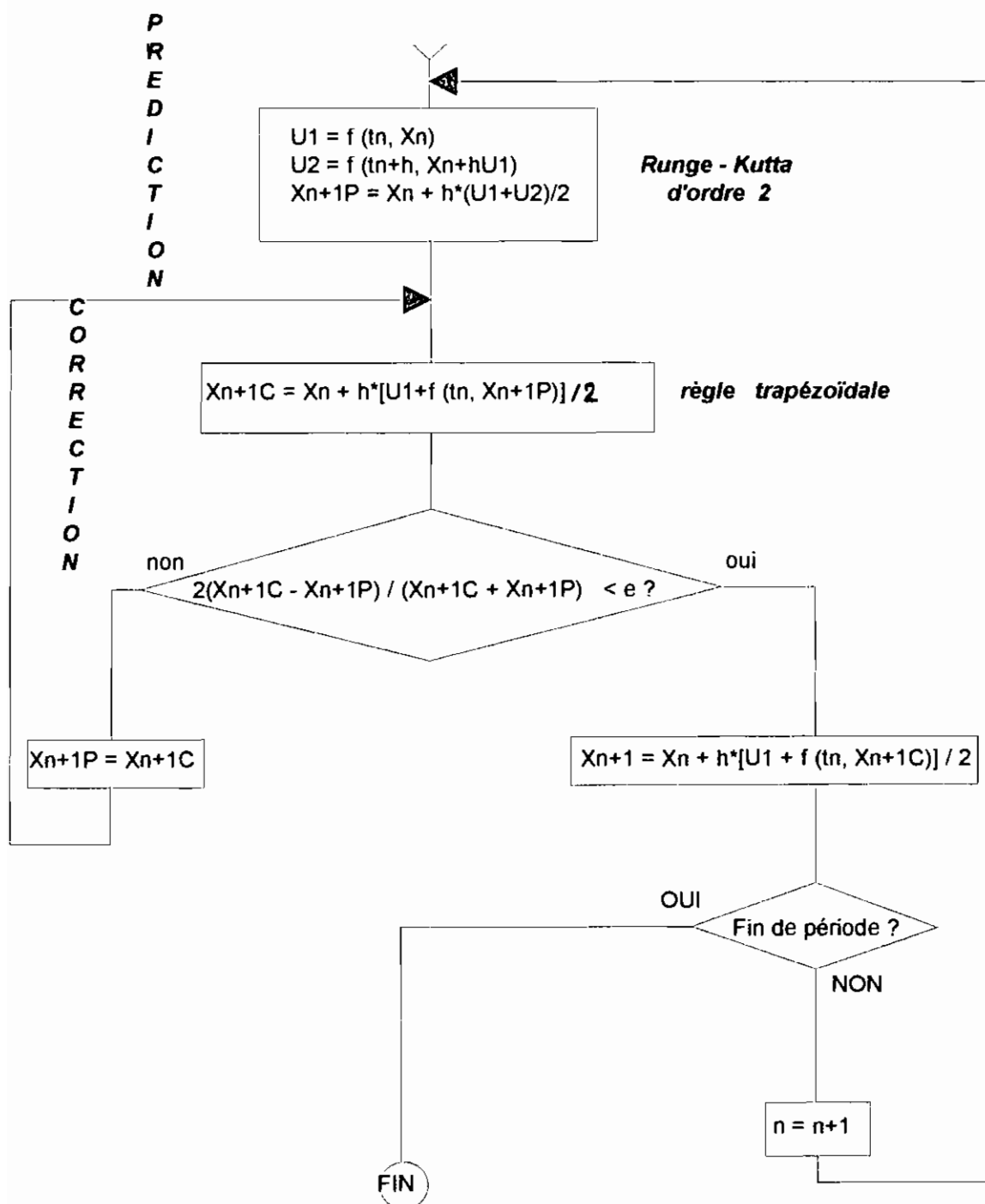


Figure 6.4 : Algorithme de la méthode d'Euler modifiée - Modifiée

La **procédure RESOL** résoud les équations algébriques et différentielles combinées et fournit au temps t les différentes températures au capteur et au réservoir.

6.4. Résultats

Afin de permettre à l'utilisateur de faire un choix autant proche de l'Optimal que possible, nous lui fournissons à partir des formulaires qu'il a remplis:

1. le taux de couverture solaire

On le prend égal à 1 si l'énergie fournie par le système Capteur - Réservoir est supérieure à la charge.

2. l'aire utile du capteur

Cette information découle du produit ($n \cdot m \cdot 1,13 \text{ m}^2$).

3. la température maximale notée au sommet du réservoir

On donne ainsi à l'utilisateur un moyen de voir si la température d'ébullition du Caloporteur sera atteinte ou non. Cette information lui est utile dans le choix du matériau du réservoir relativement à sa tenue à la température.

4. la température de référence maximale

C'est la température maximale qui a été atteinte à la chaudière. Son utilité n'est pas évidente, mais nous pensons que l'utilisateur peut en avoir besoin.

5. la différence de température maximale à la chaudière

le débit de Caloporteur correspondant

la température de référence correspondante

Ces informations peuvent servir au dimensionnement de la chaudière.

Toutes ces fonctions et procédures sont définies dans le **programme SOLARSYS** (Système solaire) que nous annexons à ce rapport (Appendice B - page 81).

CONCLUSION

Quelle fiabilité accorder à ce modèle ? En l' occurrence, celle qui résulte du produit des différentes fiabilités des modèles physiques qui le composent. Or, ceux-ci sont viables, car élaborés et testés avec satisfaction sur des systèmes réels avant d' être exposés par leurs concepteurs. Nous n' avons eu dans cette étude qu' à en assurer l' adaptation et l' adéquate combinaison. Nous pouvons par conséquent estimer que ce modèle-ci est fiable.

Il n' empêche néanmoins que certaines parties de cette étude pourraient être revues tel le modèle du rayonnement solaire global. En outre, notre plus grand souhait est que ce modèle puisse être confronté avec des expérimentations physiques afin d' en tester la portée réelle et de préciser son degré de fiabilité.

Cependant, et vu les raisons exposées dans ce premier paragraphe, ce programme peut être utilisé d' ores et déjà et avec confiance pour l' optimisation dans la conception de systèmes solaires.

Cette étude s' est voulue une contribution au développement des applications de l' Héliothermique, surtout dans nos pays, et nous espérons fermement que ce but a été atteint.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [A] : "Les capteurs héliothermiques", **Jacques DESAUTEL**
EDISUD, Collection "Technologies douces", 1979
- [B] : "Applied Solar Energy - An Introduction" **Aden B. MEINEL**
 Marjorie P. MEINEL
Addison-Wesley Publishing Co. 4^o ed., 1979
- [C] : "Solar Engineering of Thermal Processes" **John A. DUFFIE**
 William BECKMAN
John Wiley & Sons, Inc. 1980
- [D] : "Le rayonnement solaire - Conversion thermique et applications"
 Roger BERNARD - Gilbert MENGUY - Marcel SCHWARTZ
Technique et Documentation Lavoisier, 2^o ed. 1980

[E] : "Transmission de la chaleur et Thermodynamique"

Frank KREITH - Masson et Cie. Editeurs . 1967

[F] : "A first course in Numerical analysis" , **Anthony RALSTON**

Mc Graw-Hill Book Company , 1965

[G] : "Les problèmes de la filière énergétique et les perspectives de solution"

Premier symposium national sur l' Energie

EPT, 31 Mai - 02 Juin 1995

[H] : "Les fluides caloporteurs dans la conversion de l' énergie solaire"

M. de MONCUIT - Note technique

[I] : "Programmer en Turbo Pascal 7.0" , **Claude DELANNOY**

Eyrolles . 1995

[J] : "Energie solaire: le présent et le futur" , **P. LEMEUNIER**

Electronique applications n° 24 . Juin-Juillet 1982 , pp 5-17

[K] : "INFORMATIQUE 1 - Notes de cours 3.307"

J.C. BERNARD, R. GUARDO, J. LAVOIE, P. SAVARD

EPM - Septembre 1988

ANNEXES

APPENDICE A

**Fichiers météorologiques - Moyennes
mensuelles des valeurs moyennes des
années 1981 à 1990**

SITUATION GEOGRAPHIQUE			
STATION	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
Louga	15°37' N	16°13' W	39 m
Bambey	14°42'	16°28'	20
Tamba	13°46'	13°41'	48.68
Podor	16°38'	14°56'	5.73
Ziguinchor	12°33'	16°16'	19.30
Linguère	15°23'	15°07'	19.60
Matam	15°39'	13°15'	15.35
Dakar -Yoff	14°44'	17°30'	24.5
Nioro du Rip	13°44'	15°47'	18

TABLEAU A - 1.1

Station	<i>Durée moyenne mensuelle d'insolation (heures)</i>											
	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Louga	7.5	7.8	8.3	8.8	8.1	7.9	8.1	8.3	7.6	8.6	8.4	7.7
Bambey	7.2	7.6	8.2	8.3	7.7	7.1	7.2	7.0	7.6	7.9	7.9	7.2
Tamba	8.6	8.8	9.1	9.3	8.9	8.6	8.0	7.9	8.3	8.8	9.3	3.4
Podor	6.9	7.4	7.7	8.6	8.1	7.6	8.2	8.4	7.7	8.2	8.0	7.6
Ziguinchor	8.3	8.6	9.1	9.3	9.0	7.9	6.4	5.8	6.7	8.0	8.7	8.1
Linguère	7.9	8.2	8.8	9.1	8.8	8.6	8.7	8.5	8.2	8.9	8.7	8.0
Matam	8.0	8.2	8.9	9.1	8.8	8.4	8.7	8.4	8.3	8.9	8.9	8.4
Dakar - Yoff	6.8	7.6	8.6	8.8	8.4	7.8	7.2	7.0	7.2	8.0	7.8	7.1
Nioro du Rip	7.5	7.9	8.4	8.6	8.1	7.4	7.5	6.8	6.9	8.0	8.0	7.2

TABLEAU A - 1.2

	Rayonnement global mensuel moyen (Wh/m².jour)											
Station	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Louga	4283	4706	5294	5978	5992	5769	5578	5453	5403	5350	4594	4367
Bambey	4356	5214	6164	6478	6150	5717	5625	5603	5172	5303	4867	4281
Tamba	4178	4989	5464	5817	5394	5217	4967	4869	5192	4764	4231	3631
Podor	4261	4294	5431	5322	5164	5386	5567	5411	5233	5244	4511	4250
Ziguinchor	4314	4469	5503	5367	4944	5178	4572	4719	5117	5072	4444	4125
Linguère	4753	5297	6478	6489	6311	6022	6072	5839	5567	5578	4953	4708
Matam	4428	4947	5758	5958	5475	5556	5589	5542	5453	5214	4769	4147
Dakar - Yoff	4681	5453	6400	6614	6250	6019	5578	5417	5303	5442	4811	4286
Nioro du Rip	5194	5819	6519	7156	7131	6417	5864	5789	6061	5847	5447	5339

TABLEAU A - 2

	<i>Température minimale mensuelle moyenne (°C)</i>											
Station	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Louga	16.4	17.8	18.9	19.1	20.6	22.6	24.4	23.5	24.2	23.1	20.3	17.7
Bambey	17.3	17.9	19.0	19.5	21.0	22.9	24.3	23.8	23.5	22.5	19.4	17.3
Tamba	17.7	20.2	22.9	25.7	26.8	25.5	23.5	23.0	22.6	22.7	19.6	17.4
Podor	15.9	18.3	20.3	22.2	24.9	25.2	25.3	25.3	25.5	24.6	20.8	17.1
Ziguinchor	16.6	17.7	19.4	20.3	22.0	23.7	23.6	23.6	23.5	23.2	20.6	17.2
Linguère	16.7	18.9	18.9	22.3	24.2	24.6	24.6	24.5	24.2	23.3	20.1	17.4
Matam	16.4	19.2	22.2	25.3	28.4	28.0	26.3	25.5	24.9	24.9	20.8	17.1
Dakar - Yoff	17.2	17.4	18.3	19.0	20.6	23.3	24.5	25.0	25.0	25.0	22.8	19.9
Nioro du Rip	15.5	17.0	19.2	20.8	22.5	23.8	23.9	23.9	23.0	22.7	18.1	14.9

TABLEAU A - 3

	<i>Température maximale mensuelle moyenne (°C)</i>											
Station	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Louga	31.0	34.0	36.3	37.0	37.5	35.9	34.2	33.9	34.5	37.7	35.5	31.7
Bambey	31.8	34.9	36.8	37.6	37.9	36.5	34.3	33.0	32.8	36.3	36.0	33.0
Tamba	33.1	36.3	38.6	40.4	39.9	36.7	32.8	31.8	32.7	35.7	35.8	33.7
Podor	29.9	33.7	36.4	39.1	41.1	40.5	37.7	37.0	37.4	39.5	35.8	31.3
Ziguinchor	33.3	35.8	37.3	37.3	36.0	34.1	32.0	31.4	32.1	33.4	33.9	32.6
Linguère	31.8	35.0	37.4	39.6	40.9	38.9	35.8	34.7	34.8	37.0	35.8	32.8
Matam	31.7	35.8	38.9	41.9	43.0	39.9	37.2	35.6	35.8	39.0	37.5	32.8
Dakar - Yoff	24.1	24.3	25.2	24.5	25.5	28.1	29.5	29.9	30.3	30.6	28.9	26.3
Nioro du Rip	33.5	36.6	38.3	39.9	39.0	36.6	33.9	32.1	32.4	34.2	36.3	33.9

TABLEAU A - 4

	<i>Vitesse moyenne mensuelle du vent (m/s)</i>											
Station	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Louga	4.9	4.4	4.0	3.7	3.1	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.8
Bambey	2.7	2.7	2.6	2.5	2.4	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6
Tamba	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8
Podor	2.8	2.8	2.8	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0
Ziguinchor	1.4	1.6	1.8	2.0	2.1	2.1	2.2	2.4	2.5	2.6	2.8	3.0
Linguère	3.3	3.3	3.3	3.4	3.5	3.6	3.6	3.6	3.7	3.7	3.8	3.8
Matam	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	4.0	4.0	4.1	4.1	4.2	4.4	4.4
Dakar - Yoff	5.1	4.4	4.4	4.2	4.1	3.9	4.0	4.0	4.2	4.6	5.1	5.4
Nioro du Rip	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2

TABLEAU A - 5

APPENDICE B

Listing du programme SOLARSYS

```
PROGRAM SOLARSYS;
  {$N+}
```

```
Uses CRT,CHERS;
```

```
(*****
(* L'unité CHERS contient une quinzaine de procédures      *)
(* et de fonctions destinées à la gestion de l'Interface   *)
(* Utilisateur dont 6 ont été obtenues à partir de la      *)
(* bibliothèque FORMULR.LIB créée par Mr Robert GUARDO, *)
(* EPM, pour les besoins du cours d'Informatique 3.307    *)
(* de cette école [K].                                     *)
(*****)
```

```
CONST
```

```
  MOS : Array[1..12] of string[10]
    =('Janvier','Fevrier','Mars','Avril','Mai','Juin','Juillet',
      'Aout','Septembre','Octobre','Novembre','Decembre');
```

```
VAR
```

```
  Choix_Systeme,Choix_Station,iJ_D,Nn: byte;
  Fcp : boolean;
  TresMax,TrefMax,Dtchaud,DtchaudMax,MchCorr,Trf,
  TrefCorr,dQchaud,dQ,TCOS,Chg,Trch,TvIN,TculIN,
  TfIN,Tr1IN,Tr2IN,Tr3IN : extended;
```

```
PROCEDURE Ecran2;
```

```
(* pour le choix du système: Vapeur ou Absorption *)
```

```
BEGIN
```

```
  REPEAT
```

```
    Clrscr;
    Fond_Ecran(2,1,1,80,25);
    Cadre(2,WHITE,2,2,2,79,24);
    Trait(WHITE,1,0,3,6,78,6);
    Trait(WHITE,1,0,3,22,78,22);
    GotoXY(4,3);
    Write('ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES');
    GotoXY(68,3);
    Write('JANT-BI');
    GotoXY(68,4);
    Write('Version 1');
    GotoXY(25,5);
    Write('(C) Demba NDIAYE');
    GotoXY(68,5);
    Write('10/06/96');
    GotoXY(20,8);
    Write('Vous pouvez utiliser ce programme si');
    GotoXY(15,9);
    Write('vous êtes dans l'un des cas suivants:');
    GotoXY(30,16);
    Write('1.PRODUCTION DE VAPEUR D"EAU");
    GotoXY(30,18);
    Write('2.CLIMATISATION PAR MACHINE A ABSORPTION');
    GotoXY(40,23);
    TextColor(Yellow+BLINK);
    Write('Entrez votre choix (1 ou 2):');
```

```

    Read(Choix_Systeme);
UNTIL Choix_Systeme IN [1,2];
TextBackground(0);
TextColor(15);
END; {of Ecran2}

```

PROCEDURE Choix_du_Lieu;

```

(* Présente les stations météorologiques sénégalaises et *)
(* permet le choix de l'une d'elles OU d'une toute autre. *)

```

```

BEGIN
REPEAT
    Clrscr;
    Fond_Ecran(6,1,1,80,25);
    Cadre(6,WHITE,2,2,2,79,24);
    GotoXY(30,4);
    TextBackground(4);
    TextColor(BLUE);
    Write('CHOIX DE LA STATION');
    TextBackground(6);
    TextColor(WHITE);
    GotoXY(35,9);
    Write('0 - DAKAR-YOFF');
    GotoXY(35,10);
    Write('1 - BAMBEY');
    GotoXY(35,11);
    Write('2 - LOUGA');
    GotoXY(35,12);
    Write('3 - LINGUERE');
    GotoXY(35,13);
    Write('4 - MATAM');
    GotoXY(35,14);
    Write('5 - PODOR');
    GotoXY(35,15);
    Write('6 - TAMBACOUNDA');
    GotoXY(35,16);
    Write('7 - ZIGUINCHOR');
    GotoXY(35,17);
    Write('8 - NIORO DU RIP');
    GotoXY(35,18);
    Write('9 - Autre');
    GotoXY(41,22);
    TextColor(YELLOW+BLINK);
    Write('Entrez votre choix (0 à 9) : ');
    Read(Choix_Station);
UNTIL Choix_Station IN [0..9];
    TextColor(WHITE);
    TextBackground(0);
END; {of Choix_du_Lieu}

```

PROCEDURE Station;

```

(* Inscit le nom de la station choisie à l'endroit *)
(* adéquat sur les Formulaires. *)

```

```

CONST
    Stat: Array [0..8] of String[12]
        = ('DAKAR-YOFF', 'BAMBEY', 'LOUGA', 'LINGUERE', 'MATAM',

```

```

        'PODOR', 'TAMBACOUNDA', 'ZIGUINCHOR', 'NIORO DU RIP');

VAR
    iStat,jStat: byte;

BEGIN
    IF Choix_Station IN [0..8] THEN
        BEGIN
            FOR iStat:=1 TO 4 DO
                BEGIN
                    Afficher_Formulaire(iStat);
                    WITH CF [iStat,2] DO
                        BEGIN
                            FOR jStat:= 0 TO LENGTH(Stat[Choix_Station]) DO
                                Tampon[|_Rep+jStat|]:=
                                    Stat[Choix_Station][jStat];
                            END; {of WITH}
                        END; {of FOR iStat}
                    END; {of IF}
                END; {of Station}
            END;
        END;

PROCEDURE Valeurs_Default_Meteo;

(* Affiche au Formulaire n° 1 à 4 les valeurs météorologiques *)
(* telles qu'obtenues du Fichier METEO pour la station choisie. *)

CONST
    Météo: Array [0..8,1..4,1..12] of extended
    = (((4681,5453,6400,6614,6250,6019,5578,5417,5303,5442,4811,4286),
        (17.2,17.4,18.3,19.0,20.6,23.3,24.5,25.0,25.0,25.0,22.8,19.9),
        (24.1,24.3,25.2,24.5,25.5,28.1,29.5,29.9,30.3,30.6,28.9,26.3),
        (5.1,4.4,4.4,4.2,4.1,3.9,4.0,4.0,4.2,4.6,5.1,5.4)),
        ((4358,5214,6184,6478,6150,5717,5625,5603,5172,5303,4867,4281),
        (17.3,17.9,19.0,19.5,21.0,22.9,24.3,23.8,23.5,22.5,19.4,17.3),
        (31.8,34.9,36.8,37.6,37.9,36.5,34.3,33.0,32.8,36.3,36.0,33.0),
        (2.7,2.7,2.6,2.5,2.4,2.5,2.5,2.5,2.6,2.6,2.6,2.6)),
        ((4283,4706,5294,5978,5992,5769,5578,5453,5403,5350,4594,4367),
        (16.4,17.8,18.9,19.1,20.6,22.6,24.4,23.5,24.2,23.1,20.3,17.7),
        (31.0,34.0,36.3,37.0,37.5,35.9,34.2,33.9,34.5,37.7,35.5,31.7),
        (4.9,4.4,4.0,3.7,3.1,3.0,3.0,3.0,2.9,2.9,2.9,2.8)),
        ((4753,5297,6478,6489,6311,6022,6072,5839,5567,5578,4953,4708),
        (16.7,18.9,18.9,22.3,24.2,24.6,24.6,24.5,24.2,23.3,20.1,17.4),
        (31.8,35.0,37.4,39.6,40.9,38.9,35.8,34.7,34.8,37.0,35.8,32.8),
        (3.3,3.3,3.3,3.4,3.5,3.6,3.6,3.6,3.7,3.7,3.8,3.8)),
        ((4428,4947,5758,5958,5475,5556,5589,5542,5453,5214,4769,4147),
        (16.4,19.2,22.2,25.3,28.4,28.0,26.3,25.5,24.9,24.9,20.8,17.1),
        (31.7,35.8,38.9,41.9,43.0,39.9,37.2,35.6,35.8,39.0,37.5,32.8),
        (3.9,3.9,3.9,3.9,3.9,4.0,4.0,4.1,4.1,4.2,4.4,4.4)),
        ((4261,4294,5431,5322,5164,5386,5567,5411,5233,5244,4511,4250),
        (15.9,18.3,20.3,22.2,24.9,25.2,25.3,25.3,25.5,24.6,20.8,17.1),
        (29.9,33.7,36.4,39.1,41.1,40.5,37.7,37.0,37.4,39.5,35.8,31.3),
        (2.8,2.8,2.8,2.7,2.8,2.8,2.9,2.9,2.9,3.0,3.0,3.0)),
        ((4178,4989,5464,5817,5394,5217,4967,4869,5192,4764,4231,3631),
        (17.7,20.2,22.9,25.7,26.8,25.5,23.5,23.0,22.6,22.7,19.6,17.4),
        (33.1,36.3,38.6,40.4,39.9,36.7,32.8,31.8,32.7,35.7,35.8,33.7),
        (2.5,2.5,2.5,2.5,2.6,2.6,2.6,2.7,2.7,2.7,2.8,2.8)),
        ((4314,4469,5503,5367,4944,5178,4572,4719,5117,5072,4444,4125),
        (16.6,17.7,19.4,20.3,22.0,23.7,23.6,23.6,23.5,23.2,20.6,17.2),
        (33.3,35.8,37.3,37.3,36.0,34.1,32.0,31.4,32.1,33.4,33.9,32.6),
        (1.4,1.6,1.8,2.0,2.1,2.1,2.2,2.4,2.5,2.6,2.8,3.0))
    );

```

```

((5194,5819,6519,7156,4131,6417,4864,5789,6061,5847,5447,5339),
(15.5,17.0,19.2,20.8,22.5,23.8,23.9,23.9,23.0,22.7,18.1,14.9),
(33.5,36.6,38.3,39.9,39.0,36.6,33.9,32.1,32.4,34.2,36.3,33.9),
(1.4,1.4,1.4,1.4,1.4,1.3,1.2,1.1,1.1,1.1,1.1,1.2)));

VAR
  iMet1,iMet2: byte;

BEGIN
  IF Choix_Station IN [0..8] THEN
    BEGIN
      FOR iMet1:=1 TO 4 DO
        BEGIN
          Afficher_Formulaire(iMet1);
          FOR iMet2:=1 TO 12 DO
            BEGIN
              CF [iMet1,iMet2+2].Valeur:=
                Meteo[Choix_Station,iMet1,iMet2];
              Actualiser_Reponse(iMet1,iMet2+2);
            END; {of FOR iMet2}
          END; {of FOR iMet1}
        END; {of IF}
      END; {of Valeurs_Default_Meteo}

PROCEDURE Ecran3;

(* Gère l'affichage et l'édition des Formulaires *)
(* et des écrans d'aide et de message. *)

LABEL
  BCL1,BCL2,BCL3;

VAR
  iForm,iChamp: byte;
  Form_Actuel : Limites_Num_F;
  Choix      : char;

BEGIN
  Clrscr;
  Form_Actuel:=1;
  Station;
  Valeurs_Default_Meteo;
BCL1: REPEAT
  Editer_Formulaire(Form_Actuel,choix);
  CASE choix OF
    PgDn: IF (Form_Actuel < Nb_Max_Form) THEN
      Form_Actuel:= Form_Actuel + 1;
    PgUp: IF (Form_Actuel > 1) THEN
      Form_Actuel:= Form_Actuel - 1;
    F1 : Aide;
    F2 : CASE Choix_Systeme OF
      1: Schema1;
      2: Schema2;
      END; {of CASE}
    END; {of CASE Choix}
  UNTIL (Choix = F10);
  FOR iForm:=1 TO Nb_Max_FORM DO
    BEGIN
      FOR iChamp:=1 TO Nb_Max_CpF DO
        BEGIN

```

```

        IF NOT Reponse_Valide(iForm,iChamp) THEN
            Goto BCL2;
        END; {of FOR iChamp}
    END; {of FOR iForm}
    IF (CF [8,8].Valeur >= 4) OR
        (CF [8,8].Valeur = 0) THEN
        Goto BCL2;
    IF (Choix_Systeme = 1) AND
        ((CF [13,6].Valeur >= 4) OR
        (CF [13,6].Valeur = 0)) THEN
        Goto BCL2
    ELSE
        Goto BCL3;
    BCL2: Message;
        Goto BCL1;
    BCL3: Clrscr;
    END; {of Ecran3}

FUNCTION Gn(iRay:byte; tRay:extended):extended;

(* Retourne la valeur du rayonnement au temps tRay (en heures) et *)
(* pour le mois de numéro iRay [numéro de Janvier = 1].          *)

VAR
    Gmax: array[1..12] of extended;

BEGIN
    IF (CF [5,iRay+2].Valeur <= tRay) AND
        (tRay <= CF [6,iRay+2].Valeur) THEN
        BEGIN
            Gmax[iRay]:= (Pi*CF [1,iRay+2].Valeur)/(2*
                (CF [6,iRay+2].Valeur -
                CF [5,iRay+2].Valeur));
            Gn:= Gmax[iRay]*SIN(Pi*(tRay-CF [5,iRay+2].Valeur)
                /(CF [6,iRay+2].Valeur
                -CF [5,iRay+2].Valeur));
        END {of IF}
    ELSE
        Gn:= 0;
    END; {of Gn}

FUNCTION Ta(iAmb:byte; tAmb:extended):extended;

(* Retourne la valeur de la température ambiante *)
(* à l'heure tAmb et pour le mois de numéro iAmb *)

BEGIN
    Ta:= ((CF [3,iAmb+2].Valeur+CF [2,iAmb+2].Valeur)
        /2)+(0.5*(CF [3,iAmb+2].Valeur -
        CF [2,iAmb+2].Valeur)*SIN(Pi*(tAmb-9)/12))+273;
    END; {of Ta}

FUNCTION Hva(iVent:byte; Tvent:extended):extended;

(* Retourne la valeur du coefficient d'échange par *)
(* convection forcée VITRE-AIR pour une température *)
(* ambiante Tvent et pour le mois de numéro iVent. *)

```

```

BEGIN
  IF Tvent <= 293 THEN
    Hva:= 12.061*EXP(0.6*LN(CF [4,iVent+2].Valeur))
  ELSE IF Tvent <= 303 THEN
    Hva:= 11.946*EXP(0.6*LN(CF [4,iVent+2].Valeur))
  ELSE
    Hva:= 11.829*EXP(0.6*LN(CF [4,iVent+2].Valeur));
END; {of Hva}

FUNCTION Hcuf(Tcuf:extended):extended;

(* Retourne la valeur du coefficient d'échange par convection forcée *)
(* ABSORBEUR-CALOporteur pour la température Tcuf de l'absorbeur. *)

BEGIN
  IF Tcuf < 373 THEN
    Hcuf:= 600
  ELSE
    Hcuf:= 1000;
END; {of Hcuf}

FUNCTION Fe(iNd:byte; Teres1,Tfc1,Tfc2:extended):byte;

(* Elle représente la fonction de contrôle *)
(* Fei définie pour le réservoir. *)

BEGIN
  IF (iNd = 0) OR (iNd= Nn+1) THEN
    Fe:= 0
  ELSE IF (iNd = 1) AND (Teres1 > Tfc1) THEN
    Fe:= 1
  ELSE IF (Teres1 > Tfc1) AND (Teres1 <= Tfc2) THEN
    Fe:= 1
  ELSE
    Fe:= 0;
END; {of Fe}

FUNCTION Fch(iNd:byte; Trch1,Tfc1,Tfc2:extended):byte;

(* Elle représente la fonction de contrôle *)
(* Fchi définie pour le réservoir. *)

BEGIN
  IF (iNd = 0) OR (iNd= Nn+1) THEN
    Fch:= 0
  ELSE IF (iNd = Nn) AND (Trch1 < Tfc1) THEN
    Fch:= 1
  ELSE IF (Trch1 > Tfc1) AND (Trch1 <= Tfc2) THEN
    Fch:= 1
  ELSE
    Fch:= 0;
END; {of Fch}

FUNCTION Mech(iNd1,iH:byte; Teres1,Trch1,Tfc1,Tfc2:extended):extended;

(* Correspond au débit d'échange Mech défini pour le réservoir. *)

```



```

VAR
  jF,Fej,Fchj: byte;

BEGIN
  IF (iNd1 = 1) OR (iNd1 = Nn+1) THEN
    Mech:= 0
  ELSE
    BEGIN
      Fej:= 0;
      FOR jF:=1 TO (iNd1 - 1) DO
        Fej:= Fej + Fe(jF,Teres1,Tfc1,Tfc2);
      Fchj:=0;
      IF iNd1 < Nn THEN
        BEGIN
          FOR jF:=(iNd1 + 1) TO Nn DO
            Fchj:= Fchj + Fch(jF,Trch1,Tfc1,Tfc2);
          END; {of IF}
          Mech:= 0.019*CF [7,3].Valeur*Fej*ORD(Fcp) -
            CF [11,iH+2].Valeur*Fchj;
        END; {of ELSE}
      END; {of Mech}
    END;

FUNCTION Hpi(TNd:extended):extended;

(* Retourne la valeur du coefficient d'échange global *)
(* conduction-convection-rayonnement Réservoir-extérieur *)
(* pour le noeud de température TNd. *)

VAR
  Hpi1,Hpi2,Hpi3: extended;

BEGIN
  Hpi1:= 5.67E-8*(SQR(TNd)+91809)*(TNd+303);
  Hpi2:= 1/(Hpi1+17.4);
  Hpi3:= Hpi2+(CF [8,5].Valeur*0.001/CF [8,4].Valeur)
    +(CF [8,7].Valeur*0.001/CF [8,6].Valeur);
  Hpi:= 1/Hpi3;
END; {of Hpi}

FUNCTION Ari(iNd:byte):extended;

(* Retourne l'aire du réservoir concernée par les *)
(* pertes vers l'extérieur pour le noeud iNd. *)

VAR
  dRes,hRes: extended;

BEGIN
  dRes:= (4*CF [8,2].Valeur)/(Pi*CF [8,3].Valeur);
  dRes:= EXP(LN(dRes)/3);
  hRes:= dRes*CF [8,3].Valeur;
  IF (iNd = 1) OR (iNd= Nn) THEN
    Ari:= ((Pi*dRes*hRes)/Nn) + Pi*0.25*SQR(dRes)
  ELSE
    Ari:= (Pi*dRes*hRes)/Nn;
  END; {of Ari}

FUNCTION f1(imois:byte; t1,Tv2,Tcu2:extended):extended;

```

(* C'est la fonction correspondant à l'équation 1 du capteur. *)

VAR

Text: extended;

BEGIN

Text:= Ta(imois,t1);

f1:= 9.43E-3*Gn(imois,t1)+9.976E-10*(SQR(SQR(Tcu2))
-SQR(SQR(Tv2)))-1.779E-9*(SQR(SQR(Tv2))-9.284E-6

*SQR(SQR(Text))*SQR(Text))-0.628*Hva(imois,Text)*(Tv2-Text);

END; {of f1}

FUNCTION f2(imois:byte; t1,Tv2,Tcu2,Tf2:extended):extended;

(* C'est la fonction correspondant à l'équation 2 du capteur. *)

BEGIN

f2:= 0.748*Gn(imois,t1)-4.854E-9*(SQR(SQR(Tcu2))
-SQR(SQR(Tv2)))-0.561*Hcuf((Tcu2+Tf2)/2)*(Tcu2-Tf2);

END; {of f2}

FUNCTION f3(t,Tcu2,Tf2:extended):extended;

(* C'est la fonction correspondant à l'équation 3 du capteur. *)

BEGIN

f3:= 0.856*Hcuf((Tcu2+Tf2)/2)*(Tcu2-Tf2)-ORD(Fcp)
(63.72/CF [7,2].Valeur)(Tf2 - 0.99*Trf);

END; {of f3}

FUNCTION f4(iNd: byte;VAR iH:byte; Teres1,Trch1,Tfc1,Tfc2,Tfc3:extended):
extended;

(* Fonction correspondant au noeud iNd du réservoir pour l'heure *)

(* n°iH (0-1h --> n°1) avec Tfc1: température du noeud i; *)

(* Tfc2: température du noeud(i-1); Tfc3: température du noeud (i+1). *)

VAR

Fcd1,Fcd2: boolean;

f41,f42,f43,f44 : extended;

BEGIN

f42:= Mech(iNd,iH,Teres1,Trch1,Tfc1,Tfc2);

f43:= Mech(iNd+1,iH,Teres1,Trch1,Tfc3,Tfc1);

IF f42 > 0 THEN

Fcd1:= TRUE

ELSE {fonction de contrôle du débit noeuds (i-1) --> i}

Fcd1:= FALSE;

IF f43 < 0 THEN

Fcd2:= TRUE

ELSE {fonction de contrôle du débit noeuds i --> (i+1)}

Fcd2:= FALSE;

f41:= Hpi(Tfc1);

f44:= Ari(iNd);

f41:= 4.6E-4*f41*f44*(303-Tfc1);

f44:= Fe(iNd,Teres1,Tfc1,Tfc2);

f41:= f41+f44*0.019*CF[7,3].Valeur*(Teres1-Tfc1)*ORD(Fcp);

```

f44:= Fch(iNd,Trch1,Tfc1,Tfc2);
f41:= f41+f44*CF[11,iH+2].Valeur*(Trch1-Tfc1);
f41:= f41+ORD(Fcd1)*f42*(Tfc2-Tfc1);
f41:= f41+ORD(Fcd2)*f43*(Tfc1-Tfc3);
f4 := (3600*f41*Nn)/(860*CF[8,2].Valeur);
END; {of f4}

```

PROCEDURE Echangeur(jH:byte; Tpech:extended);

(* Traite la partie Alimentation de l'Evaporateur. *)

VAR

qtMin : boolean;
Rq,Eech,NUT,Tce,Tcv,Tcs,Tref,Tpech2: extended;

BEGIN

IF (CF [11,jH+2].Valeur > 0) AND
(CF [12,jH+2].Valeur > 0) THEN

BEGIN {charge présente}

IF (CF [11,jH+2].Valeur*2174) <
(CF [12,jH+2].Valeur*4180) THEN

BEGIN

qtMin:= TRUE; {qtmin = qtc}

NUT := CF [13,7].Valeur/

(CF [11,jH+2].Valeur*2174);

Rq := (CF [11,jH+2].Valeur*2174)/

(CF [12,jH+2].Valeur*4180);

END {of IF}

ELSE

BEGIN

qtMin:= FALSE; {qtmin = qtf}

NUT := CF [13,7].Valeur/

(CF [12,jH+2].Valeur*4180);

Rq := (CF [12,jH+2].Valeur*4180)/

(CF [11,jH+2].Valeur*2174);

END; {of ELSE}

CASE ROUND(CF [13,6].Valeur) OF

1: Eech:= (1-EXP(-(1-Rq)*NUT))/(1-Rq*EXP(-(1-Rq)*NUT));

2: Eech:= (1-EXP(-(1*Rq)*NUT))/(1+Rq);

3: Eech:= 2/((1+Rq)+(SQRT(1+SQR(Rq))*(1+EXP(-NUT*
SQRT(1+SQR(Rq)))))/(1-EXP(-NUT*SQRT(1+SQR(Rq))))));

END; {of CASE}

IF qtMin = TRUE THEN

BEGIN

Tcv:= ((CF [10,jH+2].Valeur-CF [9,jH+2].Valeur)

/(Rq*Eech))+CF [9,jH+2].Valeur;

Tcv:= Tcv + 273; {degrés Kelvin}

Tce:= (Tcv-CF[10,jH+2].Valeur-273)/EXP(-CF[13,7].Valeur

/(CF[11,jH+2].Valeur*2174))+273+CF[10,jH+2].Valeur;

Tcs:= Tce - ((CF [10,jH+2].Valeur-

CF [9,jH+2].Valeur)/Rq);

END {of IF}

ELSE

BEGIN

Tcv:= ((CF [10,jH+2].Valeur-CF [9,jH+2].Valeur)

/Eech)+CF [9,jH+2].Valeur;

Tcv:= Tcv + 273; {degrés Kelvin}

Tce:= (Tcv-CF[10,jH+2].Valeur-273)/EXP(-CF[13,7].Valeur

/(CF[11,jH+2].Valeur*2174))+273+CF[10,jH+2].Valeur;

Tcs:= Tce - ((CF [10,jH+2].Valeur-

```

        CF [9,jH+2].Valeur)*Rq);
END; {of ELSE}
        { calcul de la charge: cumul }
Chg:= Chg + 782496*CF [11,jH+2].Valeur*(Tce-Tcs);
Tref:= Tce + 2;
IF Tpech < Tce THEN      {chauffage jusqu'à Tref}
    Dtchaud:= Tref - Tpech
ELSE                      {BY-PASS de l'Auxiliaire}
BEGIN
    IF Tpech <= Tref THEN
        Dtchaud:= 0
    ELSE
    BEGIN
        Dtchaud:= 0;
        Tpech2:= CF[10,jH+2].Valeur+273+(Tpech-CF[10,jH+2].
            Valeur-273)*EXP(-(CF[13,7].Valeur/
            (CF[11,jH+2].Valeur*2174)));
        IF qtMin = TRUE THEN
            Tcs:= Tpech2 - ((CF [10,jH+2].Valeur-
                CF [9,jH+2].Valeur)/Rq)
        ELSE
            Tcs:= Tpech2 - ((CF [10,jH+2].Valeur-
                CF [9,jH+2].Valeur)*Rq);
        END; {of ELSE Tr > Tref}
    END; {of ELSE BY-PASS}
    IF Tpech > TresMax THEN      { Température maximale notée}
        TresMax:= Tpech;        { au sommet du Réservoir }
    IF Dtchaud > DtchaudMax THEN
    BEGIN                        {différence de température max.}
        DtchaudMax:= Dtchaud;    {comblée par l'Auxiliaire }
        TrefCorr := Tref;        {Temp. de référence correspondante}
        MchCorr := CF [11,jH+2].Valeur; {débit de}
        {Caloporteur correspondant}

    END; {of IF DtchaudMax}
    IF Tref > TrefMax THEN
        TrefMax:= Tref;        {Température de référence maximale}
        dQchaud:= 782496*CF [11,jH+2].Valeur*Dtchaud;
        dQ := dQ + dQchaud;    {Cumul de l'Energie-Chaudière}
        Trch := Tcs;          {Température de retour de charge}
    END {of charge présente}
    ELSE {aucune charge}
        Trch:= 0;
    END; {of Echangeur}

```

PROCEDURE Generateur(jH:byte; Tpgen:extended);

(* Traite la partie Alimentation du Générateur de la Machine à Absorption *)

```

BEGIN
    IF CF [11,jH+2].Valeur > 0 THEN
    BEGIN {charge présente}
        IF Tpgen < (CF [9,jH+2].Valeur+271) THEN      {chauffage }
            Dtchaud:= CF [9,jH+2].Valeur + 273 - Tpgen {jusqu'à Tce}
        ELSE {BY-PASS de l'Auxiliaire}
            Dtchaud:= 0;
        IF Tpgen > TresMax THEN      { Température maximale notée}
            TresMax:= Tpgen;        { au sommet du Réservoir }
        IF Dtchaud > DtchaudMax THEN
        BEGIN {différence de température max.}
            DtchaudMax:= Dtchaud;    {comblée par l'Auxiliaire }

```

```

TrefCorr := CF [9,jH+2].Valeur+273;      {T° réf. corr.}
MchCorr  := CF [11,jH+2].Valeur;          {débit de}
                                              {Caloporteur correspondant}

END; {of IF DtchaudMax}
IF (CF [9,jH+2].Valeur+273) > TrefMax THEN
  TrefMax:= CF [9,jH+2].Valeur+273;        {T° de réf. max.}
  dQchaud:= 782496*CF [11,jH+2].Valeur*Dtchaud;
  dQ      := dQ + dQchaud;                  {Cumul de l'Energie-Chaudière}
  Trch    := CF [10,jH+2].Valeur+273;      {T° retour de charge}
  Chg:= Chg + 782496*CF [11,jH+2].Valeur
         *(CF [9,jH+2].Valeur-CF [10,jH+2].Valeur);
END {of charge présente}
ELSE {aucune charge}
  Trch:= CF [10,jH+2].Valeur+273;
END; {of Generateur}

```

PROCEDURE RESOL(im:byte; VAR Tv1,Tcu1,Tf1,Tr1,Tr2,Tr3: extended);

```

(* Résoud les équations différentielles et algébriques *)
(* combinées sur une période de 24 heures (0 - 24h). *)

```

```

CONST
  e = 1e-5;

```

```

VAR
  i,j,iHR,k,l,h1 : byte;
  h,TvX,TvY,TcuX,TcuY,TfX,TfY,U1,U2,V1,V2,W1,W2,t,Trs: extended;
  Tv,Tcu,Tf : array [0..25] of extended;
  U,TrX,TrY : array [0..4] of extended;
  V : array [1..3] of extended;
  Trr : array [0..4] of extended;

```

Procédure Reservoir(VAR Talim: extended);

```

(* Traite le modèle du réservoir *)

```

```

VAR
  i0:byte;

```

```

BEGIN
  IF Nn < 3 THEN
    BEGIN
      FOR i0:= (Nn+1) TO 3 DO
        TrX[i0]:= 0;
      END; {of IF Nn < 3}

      (*****
      (*          PREDICTION          *)
      (*****

      FOR i0:= 1 TO Nn DO
        U[i0]:= f4(i0,iHR,Talim,Trch,Trr[i0],
                  Trr[i0-1],Trr[i0+1]);
      FOR i0:= 1 TO Nn DO
        V[i0]:= f4(i0,iHR,Talim,Trch,Trr[i0]+h*
                  U[i0],Trr[i0-1]+h*U[i0-1],Trr[i0+1]+h*U[i0+1]);

```

```

(*****)
(*          VALEURS PREDITES          *)
(*****)

FOR i0:= 1 TO Nn DO
  TrY[i0]:= Trr[i0] + 0.5*h*(U[i0]+V[i0]);

(*****)
(*          CORRECTION          *)
(*****)

REPEAT
  FOR i0:= 1 TO Nn DO
    TrX[i0]:= TrY[i0];
  FOR i0:= 1 TO Nn DO
    TrY[i0]:= Trr[i0]+0.5*h*(U[i0]+f4(i0,iHR,
      Talim,Trch,TrX[i0],TrX[i0-1],TrX[i0+1]));
  IF Nn < 3 THEN
    BEGIN
      FOR i0:= (Nn+1) TO 3 DO
        BEGIN
          TrX[i0]:= 1;      {Mise en TRUE de la }
          TrY[i0]:= TrX[i0]; {condition de sortie}
        END; {of FOR}      { pour les noeuds }
      END; {of IF}        { fictifs si N < 3 }
    UNTIL
      (2*ABS((TrY[1]-TrX[1])/(TrY[1]+TrX[1])) < e) AND
      (2*ABS((TrY[2]-TrX[2])/(TrY[2]+TrX[2])) < e) ;

(*****)
(*          VALEURS FINALES          *)
(*****)

FOR i0:= 1 TO Nn DO
  Trr[i0]:= Trr[i0]+0.5*h*(U[i0]+f4(i0,iHR,
    Talim,Trch,TrY[i0],TrY[i0-1],TrY[i0+1]));
Trf:= Trr[Nn];
END; {of Reservoir}

BEGIN

t:= 0;
Nn:= ROUND(CF [8,8].Valeur);
IF Nn=1 THEN h1:=1
ELSE h1:=2;
h:= 1E-3/h1;
Tv[0] := Tv1;           { I }
Tcu[0] := Tcu1;          { N }
Tf[0] := Tf1;            { I }
Tr[1]:= Tr1;             { T }
Tr[2]:= Tr2;             { I }
Tr[3]:= Tr3;             { A }
U[0]:= 0;                { L }
Trf:= Tr[Nn];            { I }
FOR i:= (Nn+1) TO 4 DO    { S }
  U[i]:= 0;               { A }
iHR:= 1; {numéro de l'heure} { T }
Tr[0]:= 1E+4000;          { I }
FOR j:= (Nn+1) TO 4 DO    { O }

```

```

Trf[j]:= 0;                                { N }
TrX[0]:= 1E+4000;
TrY[0]:= 1E+4000;
TrX[4]:= 0;
TrY[4]:= 0;
TextColor(YELLOW);
GotoXY(3,1);
Write('heure');
GotoXY(16,1);
Write('Tv(°C)');
GotoXY(29,1);
Write('Tcu(°C)');
GotoXY(42,1);
Write('Tf(°C)');
GotoXY(54,1);
Write('Tsom(°C)');
GotoXY(67,1);
Write('Tfond(°C)');
TextColor(WHITE);
FOR l:= 1 TO (6*h1) DO
BEGIN
FOR k:= 1 TO 8 DO
BEGIN
FOR j:= 1 TO 20 DO
BEGIN
IF (FRAC(j/(5*h1)) = 0) OR (j = 1) THEN
BEGIN
CASE Choix_Systeme OF
1: Echangeur(iHr,Trf[1]);
2: Generateur(iHr,Trf[1]);
END; {of CASE}
END; {of IF j/5}
FOR i:= 0 TO 24 DO
BEGIN
t:= t+h;

(*****
(*          PREDICTION          *)
*****)

U1 := f1(im,t-h ,Tv[i],Tcu[i]);
V1 := f2(im,t-h ,Tv[i],Tcu[i],Tf[i]);
W1 := f3(t-h ,Tcu[i],Tf[i]);
U2 := f1(im,t,Tv[i]+h *U1,Tcu[i]+h *V1);
V2 := f2(im,t,Tv[i]+h *U1,Tcu[i]+h *V1,Tf[i]+h*W1);
W2 := f3(t,Tcu[i]+h *V1,Tf[i]+h *W1);

(*****
(*          VALEURS PREDITES          *)
*****)

TvY := Tv[i]+0.5*h *(U1+U2);
TcuY:= Tcu[i]+0.5*h *(V1+V2);
TfY := Tf[i]+0.5*h *(W1+W2);

(*****
(*          CORRECTION          *)
*****)

REPEAT
TvX := TvY;

```

```

TcuX:= TcuY;
TfX := TfY;
TvY := Tv[i]+0.5*h *(U1+f1(im,t,TvX,TcuX));
TcuY:= Tcu[i]+0.5*h *(V1+f2(im,t,TvX,TcuX,TfX));
TfY := Tf[i]+0.5*h *(W1+f3(t,TcuX,TfX));
UNTIL (2*ABS((TvY - TvX)/(TvY + TvX))<e) AND
      (2*ABS((TcuY-TcuX)/(TcuY+TcuX))<e) AND
      (2*ABS((TfY - TfX)/(TfY + TfX))<e) ;

(*****)
(*          VALEURS FINALES          *)
(*****)

Tv[i+1] := Tv[i]+0.5*h *(U1+f1(im,t,TvY,TcuY));
Tcu[i+1]:= Tcu[i]+0.5*h *(V1+f2(im,t,TvY,TcuY,TfY));
Tf[i+1] := Tf[i]+0.5*h *(W1+f3(t,TcuY,TfY));
Trs:= 0.33*((4*Tf[i+1])-Trf);
IF Trs < 0 THEN
  Trs:= 0;
Reservoir(Trs);
IF Tcu[i+1] < (Trf/0.99) THEN
  Fcp:= FALSE
ELSE
  Fcp:= TRUE;          {fonction de contrôle
                        {du débit capteur }
END; {of FOR i}
Tv[0] := Tv[25];
Tcu[0]:= Tcu[25];
Tf[0] := Tf[25];
Gotoxy(3,j+2);Write(t:5:3);
Gotoxy(16,j+2);Write((Tv[25]-273):5:1);          { R }
Gotoxy(29,j+2);Write((Tcu[25]-273):5:1);          { E }
Gotoxy(42,j+2);Write((Tf[25]-273):5:1);          { I }
Gotoxy(55,j+2);Write((Tr[1]-273):5:1);          { N }
Gotoxy(68,j+2);WriteLn((Tr[Nn]-273):5:1);          { I }
END; {of FOR j}          { T }
IF FRAC(k/(4*h1)) = 0 THEN          { I }
  iHr:= iHr + 1;          { A }
END; {of FOR k}          { L }
END; {of FOR l}          { I }
TvIN := INT(Tv[25]);          { S }
TcuIN:= INT(Tcu[25]);          { A }
TfIN := INT(Tf[25]);          { T }
Tr1IN:= INT(Tr[1]);          { I }
Tr2IN:= INT(Tr[2]);          { O }
Tr3IN:= INT(Tr[3]);          { N }
END; {of Resol}

```

```

(*****)
(*          PROGRAMME PRINCIPAL          *)
(*****)

```

```

BEGIN
  Ecran1;
  Ecran2;
  CASE Choix_système OF
    1: Schema1;
    2: Schema2;
  END; {of CASE}

```



```

Choix_du_Lieu;
Aide;
CASE Choix_Systeme OF
  1: Lire_Formulaires('FORMUL1.DAT');
  2: Lire_Formulaires('FORMUL2.DAT');
END; {of CASE}
REPEAT
  Ecran3;
  ClrScr;
  TextBackground(1);
  GotoXY(20,11);
  Write('Calculs en cours,...Veuillez patienter');
  Clrscr;
  dQ:= 0;
  TresMax:= 313;
  TrefMax:= 0;           { Initialisation des }
  DtchaudMax:= 0;       { variables globales }
  Chg:= 0;
  TvIN := 303;
  TcuIN:= 303;
  TfIN := 303;
  Tr1IN:= 313;
  Tr2IN:= 312;           {conditions}
  Tr3IN:= 311;           {initiales }
  Fcp:= FALSE;           {de départ}
  Clrscr;
  GotoXY(10,24);
  TextColor(GREEN);
  Write('INITIALISATION AUX CONDITIONS REELLES DE FONCTIONNEMENT');
  Resol(1,TvIN,TcuIN,TfIN,Tr1IN,Tr2IN,Tr3IN);
  Clrscr;
  Fond_Ecran(0,1,1,80,25);
  GotoXY(18,12);
  Write('Initialisation terminée ... Calculs amorcés');
  Delay(3000);
  Clrscr;
  Fond_Ecran(BLUE,1,1,80,25);
  dQ:= 0;
  TresMax:= 313;         { Réinitialisation des variables }
  TrefMax:= 0;           { globales après obtention des }
  DtchaudMax:= 0;       { Conditions initiales de }
  Chg:= 0;               { fonctionnement en permanent }
  FOR iJ_D:= 1 TO 12 DO
  BEGIN
    Clrscr;
    GotoXY(36,24);
    TextColor(GREEN);
    Write(MOS[iJ_D]);
    Resol(iJ_D,TvIN,TcuIN,TfIN,Tr1IN,Tr2IN,Tr3IN);
  END; {of FOR iJ_D}
  Sound(900);
  Delay(1000);
  NoSound;
  IF dQ = 0 THEN
    TCOS:= 1
  ELSE IF Chg < dQ THEN
    TCOS:= 0
  ELSE
    TCOS:= (Chg-dQ)/Chg;
  readln;
  Clrscr;

```

```

Fond_Ecran(5,1,1,80,25);
GotoXY(20,5);
TextColor(Yellow);
Write('Le Taux de couverture solaire est: ',TCOS:4:2);
GotoXY(20,6);
Write('pour une aire de Capteur : ',(CF [7,2].Valeur
*CF [7,3].Valeur*1.13):6:1, ' m²');
GotoXY(10,8);
TextColor(White);
Write('La Température maximale notée au Réservoir est: '
,(TresMax-273):5:1);
GotoXY(10,10);
Write('La Température de référence maximale est: '
,(TrefMax-273):5:1);
GotoXY(10,12);
Write('La différence de température max. à l'AUXILIAIRE est: '
,DtchaudMax:5:1);
GotoXY(10,14);
Write('La Température de référence correspondante est: '
,(TrefCorr-273):5:1);
GotoXY(10,16);
Write('Le débit Mch de Caloporteur correspondant est: '
,MchCorr:5:3);
GotoXY(1,23);
TextColor(Yellow+BLINK);
Write('Appuyez sur <ESC> pour sortir ou une autre touche ',
'pour reprendre les données...');
UNTIL Readkey = #027;
Fond_Ecran(0,1,1,80,25);
END.

```