



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION



INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS
34100 TRIESTE (ITALY) - P.O. B. 586 - MIRAMARE - STRADA COSTIERA 11 - TELEPHONES: 224281/23456
CABLE: CENTRATOM - TELEX 460392-1

SMR/112 - 12

IV^e SEMINAIRE SUR L'ENERGIE SOLAIRE

(10 - 21 septembre 1984)

LES CAPTEURS (fin)
LA REFRIGERATION SOLAIRE

J. FLECHON

Laboratoire de Physique de Depots
Metalliques
Universite de Nancy I
B.P. 239
54506 Vandoeuvre les Nancy
France

Ces notes sont préliminaires. Vous trouverez les copies qui vous manquent et des supplémentaires au Bureau 231.

B) Mesures et calculs. 6

I Mesures:

- le direct \bar{I} : pyrhéliomètre.
- global G et diffus : le pyranomètre.
- durée d'insolation : héliographe Campbell - $I \rightarrow 1200 \text{ W m}^{-2}$
- Rayonnement total : $Q \downarrow$ pyrromètre
 $0,25 - 100 \mu$
 $Q' \downarrow - Q' \uparrow$: pyrromètre différentiel ou bilan

II Eclairement d'un plan incliné

a) le problème du capteur.

2 types de calcul { éclaircissement.
irradiation.

Rq: cas du direct arrivant sous incidence normale.
on a vu (loi de Beer) $\frac{dI}{I} = -k dn$ $I = I_0 e^{-kx}$

en fait: loi statistique: $I = a e^{b \sin(h+\alpha)}$ I_0 extra

ex: Perrin de Brichambaut: France ciel moyen
 $I = 1230 e^{-\frac{1}{4} \sin(h+\alpha)}$ (bleu clair)

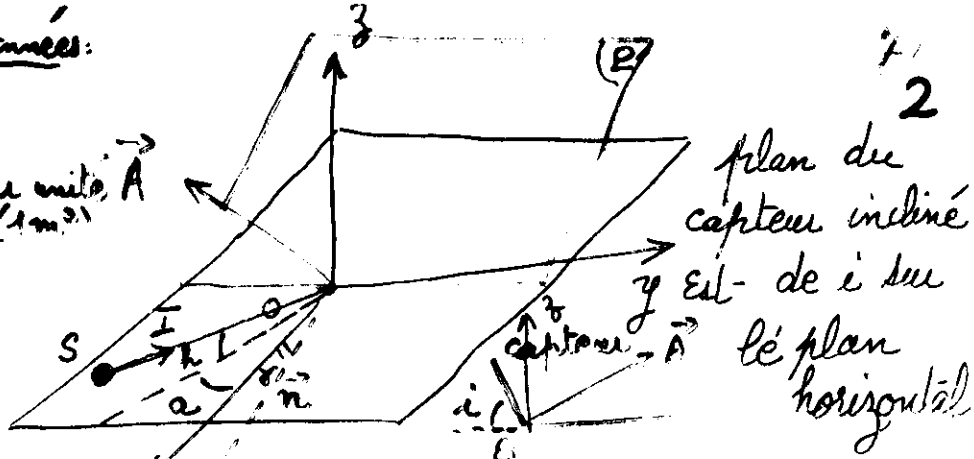
B) le direct: plan incliné, ciel clair

Problème pratique: P_{max} si $I \perp$ plan.
capteur (poursuite nécessaire)

Impossible pour les usages envisagés dans les PVD
donc plan incliné face au Sud (Nord) $i = \lambda - \delta$
latitude

données:

extens. unit. \vec{A}
P (1 m²)



Sud x

$$\vec{A} \cdot \vec{I} = I \cos \theta$$

$$\begin{array}{l|l} I \cos h \cos \alpha & \sin i \cos \gamma \\ I \cos h \sin \alpha & \sin i \sin \gamma \\ I \sin h & \cos i \end{array}$$

$$\varphi_{I/A} = I [\cos h \sin i (\cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma) + \sin h \cos i]$$

$$= I [\cos h \sin i \cos (\alpha - \gamma) + \sin h \cos i]$$

Cas particulier: (important en pratique)

\vec{A} dans le plan méridien. $\gamma = 0$

$$\varphi_{I/A} = I (\cos h \sin i \cos \alpha + \sin h \cos i)$$

Rq: si $i=0$ $\varphi_{I/A} = I \sin h$ (partie verticale du direct)

si $i=\frac{\pi}{2}$, $\gamma=0$: mur vertical sud $\varphi_{I/A} = I \cos h \cos \alpha$

la normale fait un angle γ avec le méridien du lieu.

c) Eclaircissement diffus:

1) albedo du sol néglige: estimation

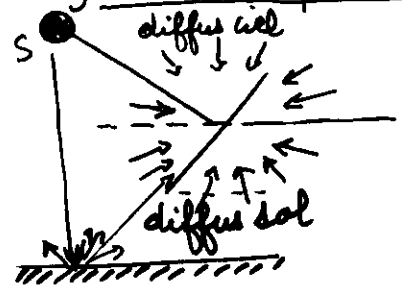
$$D_{\downarrow} \approx \frac{1}{2} (I_1 + I) \sin h \text{ avec } I_1 = \frac{I_0}{1350 \text{ Wm}^{-2}} \sin h$$

$w = 1 \text{ m}^2$ en été
albédo par vapeur d'eau

formule empirique:

$$D_{\downarrow} = 125 (\sin h)^{0,4} \text{ Wm}^{-2}$$

2) on tient compte de l'albedo du sol: (plan incliné: i/ Horiz.)



$$D(i) = D_{\text{ciel}} + D_{\text{sol}}$$

$$= D_H \left(\frac{1 + \cos i}{2} \right) + \alpha G_H \left(\frac{1 - \cos i}{2} \right)$$

albedo sol

d) Global oblique: $G_{\text{ob}} = I(i) + D(i)$

$$G_{\text{ob}} = I (\cos h \sin i \cos \alpha + \sin h \cos i) + D_H \left(\frac{1 + \cos i}{2} \right) + \alpha G_H \left(\frac{1 - \cos i}{2} \right)$$

| h | ciel moyen | très pur | zone indist. |
|-----|------------|----------|--------------|
| 50° | 42 | 37 | 44 |
| 90° | 133 | 97 | 173 |

Wm⁻²

Rq: - diffus par ciel couvert (en Europe)
 $G_H = D_H$ si $h > 20^\circ$ $D_H \approx \frac{1}{4} G_H \text{ ciel clair}$

- durée d'insolation et global (important pour les capteurs à concentration)

$$\frac{G}{G_0} = \frac{a}{f(\lambda_{\text{atit}})} + b \left(\frac{S}{S_0} \right) \text{ facteur d'insolation.}$$

- Capteur horizontal (i=0)

$$G_H = I \sin h + D_H \approx 1080 (\sin h) \text{ Wm}^{-2}$$

ciel moyen

III Irradiations quotidiennes - ciel clair - ⑨

a) directe 1) I_{dec} : \int les éclairissements calculés
1 jour

ou:

Climatologie: données ayant recours aux
méth. adv. statistiques.

on attend: { moyenne
extrêmes
distribution de
météo

évaluation des
30 ans
(météo) climatologique

ex. 18: 4° à 10 jours à l'équinoxe \rightarrow intervalle décadaire
régions intertropicales — mensuel.

on donne: résultat journalier par mois

Rq: le mois mal choisi (22 à 21 \rightarrow sym/équinoxes)

2) l' \int ne prend pas en compte les

variations des paramètres météo.

ex: facteur de trouble $T_L = 1,6 + 1,6/\beta_A + 0,5 \ln e$

e: tension vap. eau en hPa \sim millibars.

eau condensable $w = 0,17 e$ ($g \cdot cm^{-2}$)

3) $\frac{\bar{I}_{oi}}{I_{oH}}$ varie peu avec T_L (indice 0 \rightarrow FEDE
 \rightarrow jour

ex: mur face au sud: $\frac{\bar{I}_{o90}}{I_{oH}} = e^{[1,6 \lg(1,25) - 1,458 - 56,5 + 0,04(2 \cdot 90)]}$

b) diffuse et globale:

1) D_o non atteint par \int car T_L et a (du sol) difficiles
à apprécier.

On utilise souvent des stations moyennes de diffuse (Nantes)

2) G_o : on \int et on compare à
(plan orienté sud) $\bar{I}_{oi}(i) + D_o(i)$ correspondance $\approx 10\%$ ⑩

Rq: 1) $D_o = f(T_L)$ mais $\frac{D_o}{G_o}$ varie peu avec T_L

2) $\frac{G_{oH \text{ couvert}}}{G_{oH \text{ clair}}} \approx 0,22$ (été) $0,30$ (hiver)

3) Statistiquement: Les mesures ≈ 10 à 12%

c) Résultats:

Gisement - Capteurs (6)

I Le gisement solaire

généralités (astonomie, énergie nucléaire)
rayonnements solaire et terrestre (caractères)
mesures
évaluation des ressources énergétiques.

II Un exemple: capteurs à tube sous vide sans concentration. (M. Baudouin - La Vallée)

a) Un fait: Si $\theta_{\text{capt}} > 50^\circ\text{C}$ fuites thermiques $\uparrow p \downarrow$

b) Réduction des pertes:

IR. de l'absorbeur \rightarrow couche sélective sur face avant
convection de l'air entre $\rightarrow 0$ vide 10 torr
conduction vitre et absorbeur $\rightarrow 0$ — 10^{-4} —
calorifugeage isoler face arrière par évacuation à air.

ex $\theta_{\text{amb}} = 15^\circ\text{C}$ $\theta_{\text{abs}} = 75^\circ\text{C}$ Pertes $\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

capt. plan non sélectif 8
— sous vide non isolé 4,5
— — — — 1,7
— — — — 1,1

c) Ponctuelle: capt. plan = $a - \frac{b(\theta_{\text{eff}} - \theta_{\text{amb}})}{E_{\text{ng}} \text{ W m}^{-2}}$
— sous vide = $a_1 - \frac{b_1(\theta_{\text{eff}} - \theta_{\text{amb}})}{E_{\text{ng}}} - \frac{b_2(\theta_{\text{eff}} - \theta_{\text{amb}})}{E_{\text{ng}}}$

d) Exemples de c. sous vide.

1) Heliotube, (Mazda)

direction Mazda Marseille 36 panneaux 54 m^2
+ machine abs. ARKIA W35
casse d'épargne Euro 300 m^2 + (75000 fr/h)

2) Cortec, (Coming, France) capt: $1,13 \text{ m}^2$

pyrex - chrome noir 10^{-6} Tribolux
Caserie Finistère 315 m^2 (AFME)

3) Télévision (Batin) \rightarrow abandonné

4) Giordano

5) CENG (Grenoble) $\rho = 0,4$ à $0,6$ (entobell: $0,9 - 1 \text{ Kw m}^{-2}$)
 $\Delta\theta = 120^\circ\text{C}$

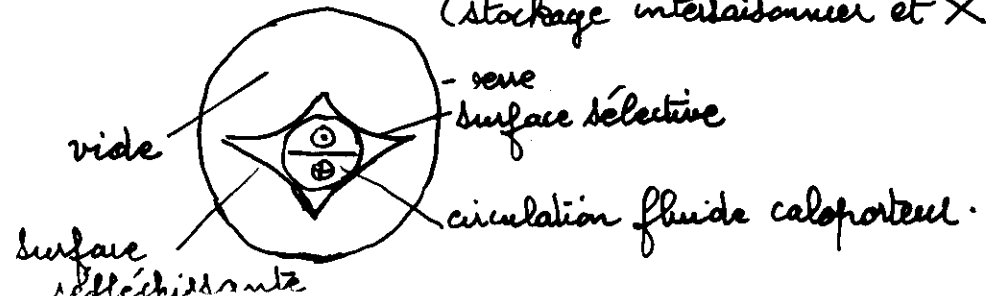
e) Appréciation:

prise

durée de vie: fragile
efficacité: couche sélective $\downarrow \Delta\theta$

sécurité: implosion possible (choc)

applications: climatisation (P.V.D.)
eau chaude agro-alim ($60-80^\circ\text{C}$)
stockage inter saisonnier et X



La Réfrigération solaire (24)

Cahier AFEDS n°5

différentes possibilités
d'emploi de l'E.S.
pour le refroidissement

Bibliog: J. Bonnin et al.
Réfrigération Solaire (SCM:1980)

refrigération par absorption (1)
refroidissement par évaporation
cycle mécanique: compression de vapeur
cycle (Rankine: Fier 113-12)
deshumidification
radiation du ciel nocturne
refroidissement thermoelectrique
ventilation naturelle

On se limitera à (1) avec emploi
de collecteurs plans → Zone tropicale (sans électricité)
ou semi-concentrés

A) Généralités

I Faire le point:

1) Conceptions précédentes
2) climatologie
3) collecteurs plan
thermostatique T_c
thermodynamique: $T \rightarrow T_{limite}$
(4 à 5 h d'insolation efficace)
 $P_{collect} \rightarrow Q_{utilisable}$

B) Que faire de Q_u :

1) chauffage: études nombreuses → paramètres connus
→ idées générales dégagées → problème résolu dans son principe → industrialisation: cf: chauffe eau Japon, Israël, France

chauffage domestique: EDI = Aramon

2) réfrigération: on en est encore au stade de la recherche
certaines expériences réalisées { thermoméca: Rankine
absorption: LiBr-H₂O
pas de réalisations industrielles de ces.

II Principe de la réfrigération à absorption (25)

a) le phénomène physique: Lois de Dalton et de Raoult

1) mélange de gaz: (Dalton) $P_t = P_{g1} + P_{g2}$
2) mélange de vapeurs (Raoult) ex: NH₃ + H₂O
 $P_{NH_3} < P_{(NH_3+H_2O)} < P_{NH_3}$

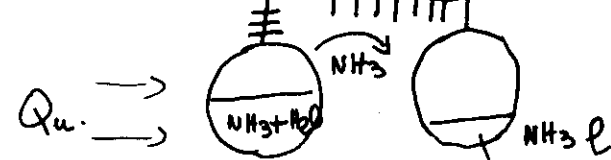
La Pression au-dessus d'un mélange, binaire (ex: NH₃ + H₂O)
est << Pression du corps le plus volatil.

3) Traduction de cette propriété:

Les diagrammes ($\frac{1}{T}$, log P)
ex: diagramme de Dobryjankovic et Uchener (NH₃ + H₂O)

(IIF)

B) Exemple: 1) montage Condenseur



Générateur { bouilleur / absorbeur } évaporateur
T, P_{sol}, P_{NH3}

2) opérations:
- e. i: 35% NH₃ 20°C 1 bar 9 bar
- ch(Q) 85° 9 → 9
- e. f. 20% 20° 0,35 → 20°
(fin 20%) 120° 20 → liq (+ Qp)
NH₃ l s'évapore en prenant Q_c à l'évap. dont T
NH₃ l se dissout - dégageant Q_{iss} dans le bouilleur - T

IV Thermostatique et thermocinétique. 10

a) Analogie avec l'étude des capteurs

La brièveté de la durée de l'insolation conditionne la mise en œuvre de toutes les applications de l'énergie solaire.

b) Conséquences en réfrigération:

2 stades d'étude nécessaires:

Thermostatique de la réfrigération:

Etablissement préalable des diagrammes ($\frac{1}{T}$, $\log P$) pour le couple frigorigène. (diagrammes thermodynamiques)

But: Connaître les limites des possibilités des couples. (Analogie avec les capteurs plans $G=5, T_c$)

Thermocinétique de la réfrigération.

On ne peut jamais atteindre les limites prévues par les diagrammes.

2 types de cinétique

{ celle de la libération de frigorigène (jour)
— réabsorption — (nuit)

B) Un exemple d'étude de réfrigération solaire par absorption sèche

I Les données du problème.

a) les besoins: pays subtropicaux en voie de développement
dans ces pays: régions désertiques - raison - la conservation des denrées périssables

ex: Normes OMS: vacins (-30 + 8°) ambiance 43°C jour
30°C nuit.

ou: réalisations actuelles:

photovoltaïques (ind.) pour
adsorption zeolites-eau (recherche)

Problèmes économiques.

b) choix du couple: $\text{CaCl}_2, \text{NH}_3$
utilisé industriellement en Allemagne (1920-40)

Caractères physico-chimiques:

| CaCl_2 | 8NH_3 | 4NH_3 | 2NH_3 | 0 |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------|
| P 16 bars | 95°C | 106°C | | |
| (cond. 40°C) | 32 | 42 | 180 | conclure |
| 1 | | 7 | 126 | |
| 0,13 | -2 | | | |

Tracé du réseau ($\log P, \frac{1}{T}$)

montage labo

obtention d'une concentration (vannes)

les équilibres $P, T \rightarrow \rightarrow$

12 28

I) Conséquences :

3l faut $\theta \rightarrow$ capteur plan : semi-concentration
pas d'échangeur (gr)
 $P \rightarrow$ enveloppe résistante

NH_3 tonique : étanchéité
agressivité : Cu ? \rightarrow acier

But :
prix < tous les autres
prix matériel usuel
"quincaillerie"
concurrence les autres appareils.

pas d'intervention de l'utilisateur
autonomie : automatisation totale
(pas de pièces mobiles : pannes)
pas d'entretien.

II) L'appareil de recherche en vraie grandeur.

a) paramètres : $2m^2$ - $12kg$ $CaCl_2$ - $13kg$ NH_3
 $250l$ - éclairage : spots $E_{moyen} 1kWm^{-2}$

($l: 140^\circ C$) 9-15h horloges - mesures NH_3
nous proposons facteur de qualité $Q = \frac{F \times \Delta a_{amb}}{F_0 \times \Delta r_{rechauff}}$

$$F = M(\theta_i - \theta_f) \quad F_0 = M_{NH_3} \times L_{vNH_3}$$

$$\eta_{co} = \frac{F}{F_0} \quad \eta_{net} = \frac{F}{W_e} = \frac{F}{F_0} \times \frac{F_0}{W_e} = \eta_{co} \times \eta_{général}$$

ex : $3l NH_3 \approx 2kg \rightarrow 700Kcal$
 $6h \times 2kW \times 3600$
 $\frac{4}{7} \times 0,065 \rightarrow 3,7\%$

b) Construction
c) Résultats.

13 29

II) Le prototype industriel :

a) But : Conservation des vaccins, de la viande du lait, en ambiance tropicale.

b) Conception : cuve isolante $300l$ (OHS: $12cm$ polyéthylène)
en fait : congélateur suisse $9,5cm$ au lieu de $6,5$

autonomie conditionnée par le cycle solaire.
générateur $6m^2$
condenseur : ailettes - air ($2m$)
réservoir NH_3

c) Schéma

d) Réalisation industrielle (Brevet déposé à Paris le 5 juillet 1974 par l'ANVAR)

Conclusion :

14 (31/2)

a) le choix d'un couple frigorigène :
f(conditions climatiques)

b) Cas des Z. Tropicales privées d'électricité

S'absorption sèche semble + prometteuse

conditions : TMB \nearrow

interface S-L : étendue (cinétique)

volume important de liquide frigorigène.

c) Chinatisation : le point essentiel \rightarrow

obtenir 1 production importante de légumes nocturnes.

avec isolation diurne.
possibilité : évaporateur en plaques ~ collecteur

comme en Z. tempérée : chauffage central

- Z. Tropicale : réfrigération centrale

d) Caractères d'un réfrigérateur solaire thermodynamique

encombrant : par les capteurs - l'isolation (faibles thermiques)
: - le volume important du liquide

frigorigène (C.O.P faible) 15 l NH_3 (5 l utiles)

- nuits chaudes - cas du désert.
ne se justifie qu'en brasse : loin de toute forme
d'énergie.

service attendu : conservation des denrées périssables

problème de l'appoint énergétique { Boissons
médicaments, vaccins, sérums.

Réfrigérateur { électrique : compact, le besoin
solaire : encombrant, le soleil } commande