

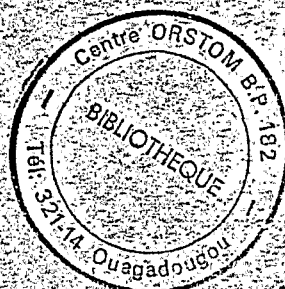
CENTRE O.R.S.T.O.M. DE OUAGADOUGOU

SECTION HYDROLOGIQUE DE OUAGADOUGOU

1493



no 86



6710

14

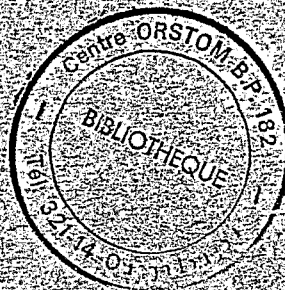
MH 71835

Note Technique

Description d'une installation pour la mesure continue de l'évaporation sur une grande nappe d'eau libre.

Application du lac de BAM

Par Bernard POUYAUD



Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: Bx 13835 Ex: 1

Fonds Documentaire ORSTOM



010013895

72

OUAGADOUGOU, MAI 1972

Introduction

I - Rappel théorique

I-A- Le bilan radiatif

I-B- Théorie de l'estimation de la chaleur sensible C

I-B-1- Utilisation du rapport de Bowen β

I-B-2- La formule de Penmann

I-B-3- Calcul approché de $e_w(T)$ et de sa dérivée $d_{ew}(T)/dT$

I-C- Approche de β par la méthode combinée : Bilan d'énergie et transfert turbulent.

II- Description du dispositif de mesure du lac de Bam

II-A- Situation du dispositif

II-B- Description du bati de mesure

II-C- Mesure des termes du bilan radiatif

II-C-1- Rayonnement net Q

II-C-2- Rayonnement global R_G : Diffus R_d et réfléchi $a.R_G$

II-C-3- estimation du rayonnement net Q par le terme composé $R_G + L\downarrow - aR_G - L\uparrow$ à partir du rayonnement global R_G :

II-C-3-a- le rayonnement réfléchi $a.R_G$

II-C-3-b- le rayonnement terrestre $L\uparrow$

II-C-3-c- le rayonnement atmosphérique $L\downarrow$.

II-C-4 - Mesure des températures nécessaires à la détermination de β

II-C-4-a- les sondes de mesures

II-C-4-b- l'enregistrement

II-C-4-c- servitudes des sondes de mesures

II-C-4-d- profils de températures et d'humidité dans la couche d'air perturbée.

II-C-5 - Mesure du flux S transmis à l'eau du lac.

II-C-5-a - les sondes de mesures

II-C-5-b- le dispositif de commande du profil de températures

II-C-5-c- évaluation du stock thermique du lac.

II-C-6 cablage de l'enregistreur MECI-SPEEDOMAX

II - D - La mesure du Vent.

III - Dépouillement des diagrammes

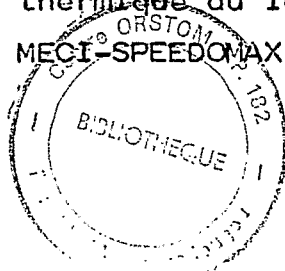
III-A- Rayonnement

III-B- Températures

III-C- Flux calorifique dans l'eau

III-D- Codification des données

IV - Dispositif autonome d'alimentation



I N T R O D U C T I O N

Nous nous proposons de suivre de façon continue l'évaporation d'une grande surface d'eau libre, le lac de Bam, située dans une région de climat présahélien, caractérisé par une évaporation intense (environ 2200 mm par an).

Nous avons mis au point pour cela un appareillage complexe permettant la mesure et l'enregistrement de tous les paramètres susceptibles d'intervenir dans l'estimation de cette évaporation par la méthode dite du bilan énergétique ainsi que par toute autre méthode qui en dérive.

Les grandeurs physiques suivantes sont mesurées et enregistrées en continu en un point du lac :

- le rayonnement net Q à 3 m au dessus de l'eau.
- le rayonnement global R_G et diffus R_d .
- le rayonnement réfléchi $a.R_G$.
- les températures sèches et humides T_s et T_w de l'air à 2,5 m.
- les gradients de températures sèches et humides ΔT_s et ΔT_w de l'air entre les niveaux 2,5 m et 0,3 m.
- la température de surface et en 8 niveaux des eaux du lac : T_{SURF}
 $T_1 = - 6,5$ cm, $T_2 = -12,5$ cm, $T_3 = -25$ cm, $T_4 = -50$ cm, $T_5 = -100$ cm, $T_6 = - 150$ cm,
 $T_7 = - 200$ cm, $T_8 =$ Température du fond.
- les vitesses moyennes du vent aux niveaux 2,5m et 0,3 m sur des pas de temps de 5,15, 30,60 ou 120 minutes.

Des profils de températures sèches et humides de la couche d'air au-dessus du lac ont été faits en plusieurs points du lac, de façon à préciser les variations de ce profil dans le temps et dans l'espace.

De même un appareil permet à heures fixes de faire un bilan thermique énergétique de l'eau du lac, sur un parcours de référence.

Ces deux dernières séries de mesures sont destinées à nous permettre de nous affranchir de l'aspect ponctuel de l'appareillage précédent.

I - Rappel théorique - Généralités sur les diverses méthodes

I - A - Le Bilan radiatif

Si, en première hypothèse, on écarte les autres sources d'énergie, (le rayonnement thermique terrestre naturel par exemple, qui est le plus souvent négligeable devant les autres termes du bilan radiatif), le soleil demeure la seule source énergétique.

Au cours de la pénétration de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire se transforme. Une partie traverse sans encombre l'atmosphère, c'est le rayonnement direct R_D ; une autre partie est simplement diffusée ou réfléchi par les nuages et les aérosols, sans changement de longueur d'onde, c'est le rayonnement diffus R_d . Une dernière partie est absorbée par l'atmosphère, qui en restituera une fraction vers le sol ; le rayonnement thermique atmosphérique $L\downarrow$, de grande longueur d'onde.

Le sol, en l'occurrence la masse d'eau du lac, émet lui-même vers l'atmosphère un rayonnement thermique de grande longueur d'onde $L\uparrow$.

La composante verticale de la somme des deux rayonnements R_D et R_d , par venant à l'eau est appelée rayonnement solaire global R_G .

Une partie de dernier rayonnement solaire global, réfléchi par la surface de l'eau, caractérisée par son albedo, a , est nommée rayonnement réfléchi $a.R_G$.

A un niveau donné, l'énergie résultante de ces différents rayonnements est le rayonnement net Q .

$$(I) Q = R_G(I - a) + L\downarrow - L\uparrow$$

si l'on compte positivement les rayonnements dirigés vers le bas.

L'énergie correspondant à ce rayonnement net Q est employée sous diverses formes.

- chaleur transmise à l'eau du lac, S , puis au sol sous-jacent.
- chaleur sensible C transmise à l'atmosphère au dessous du niveau de mesure du rayonnement Q .
- chaleur latente LE , dépensée pour l'évaporation E d'eau du lac.
- activité photosynthétique des algues (nombreuses dans les eaux chaudes du lac de Bam).
- condensation de la vapeur d'eau.

Nous admettrons en seconde hypothèse, l'insignifiance des deux derniers termes devant les autres.

il vient : $Q = S + C + LE$

Nous détaillerons par la suite les méthodes de mesure des différents termes de ce bilan.

-4-

I - La théorie de l'estimation de la chaleur sensible C

La tranche d'air surplombant les eaux du lac est sous son influence. La température et la tension de vapeur de cette couche d'air perturbée dépendent de la température de surface de l'eau du lac. Selon le vent et les autres phénomènes météorologiques locaux, la forme de cette masse d'air humide perturbée par le lac, vis à vis de l'air non perturbé l'entourant, est variable. L'épaisseur, ainsi que les gradients de température et de tension de vapeur qui la caractérisent, se modifient selon les circonstances micro-climatiques locales.

Retenons deux niveaux Z_I et Z_2 dans cette couche d'air sous l'influence du lac. On peut écrire entre ces deux niveaux :

$$(3) C = - c_p \cdot A_\theta \cdot \frac{d\theta}{dz}$$

ou : c_p est la chaleur spécifique de l'air humide à pression constante.

A_θ le coefficient d'échange thermique

$\frac{d\theta}{dz}$ le gradient de température au niveau Z

par intégration de (3) entre les niveaux Z_I et Z_2 il vient :

$$(4) C = c_p \cdot \int_{z_I}^{z_2} \frac{dz}{A_\theta} (\theta_2 - \theta_I)$$

où : θ_I et θ_2 sont les températures sèches aux niveaux Z_I et Z_2 , sous réserve qu'il y ait effectivement continuité du gradient $\frac{d\theta}{dz}$ entre les niveaux

Z_I et Z_2 , donc que le flux de chaleur sensible soit conservatif dans la couche d'air perturbée considérée.

De même, avec l'hypothèse que le flux de vapeur d'eau est conservatif on peut écrire :

$$(5) E = \int_{z_I}^{z_2} \frac{dz}{A_h} (h_2 - h_I)$$

où : h est l'humidité spécifique de l'air.

A_h le coefficient d'échange de vapeur d'eau.

On sait que l'humidité spécifique h est liée à la pression de vapeur d'eau e par :

$$(6) h \sim \frac{0,622 \cdot e}{P_a - 0,378 \cdot e}$$

P_a est la pression atmosphérique.

$0,378 \cdot e$ restant toujours très petit devant P_a , on peut écrire

$$(7) h \sim \delta \cdot e \quad \text{où } \delta \text{ ne dépend que de } P_a.$$

Il vient alors :

$$(8) \quad E = \delta \cdot \frac{e_2 - e_1}{z_2 - z_1} \cdot \frac{dz}{A_h}$$

e_1 et e_2 sont les pressions de vapeurs d'eaux niveaux Z_1 et Z_2 .

L'égalité des différents coefficients de transfert, A_e et A_h est généralement admise dans la couche d'air perturbée par le lac :

Il vient donc :

$$(9) \quad \frac{C}{LE} = \frac{c_p}{L \cdot \delta} \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{e_2 - e_1}$$

L est la chaleur latente de vaporisation, fonction de la température de la surface évaporante, mais ici pratiquement constante dans le domaine de variation de la température de surface du lac.

Nous nommerons $\gamma = \frac{c_p}{L \cdot \delta}$ qui peut être pris comme fonction de la seule pression atmosphérique P_a , soit :

$$(10) \quad \gamma = \frac{c_p}{L \cdot \delta} \sim \frac{0,665 \cdot P_a}{1000}$$

où P_a est exprimée en millibars

et

$$(11) \quad \frac{C}{LE} = \beta = \gamma \cdot \frac{\theta_2 - \theta_1}{e_2 - e_1}$$

Le rapport $\frac{C}{LE}$ est nommé rapport de Bowen et noté f .

I - B - I - Utilisation du rapport de Bowen

Nous allons choisir pour niveau I un niveau de référence de cote Z , et pour niveau 2 le niveau de cote Z_0 , définie comme la hauteur de rugosité où s'annule le vent au dessus de la surface évaporante, l'expression (II) devient :

$$(12) \quad \beta = \frac{\theta_0 - \theta_z}{e_0 - e_z}$$

θ_0 et e_0 sont les températures et pressions de vapeur au niveau Z_0

θ_z et e_z " " " " " " au niveau Z

Introduisons maintenant θ_s et e_s les température et pression de vapeur saturante correspondante de la surface du lac, par :

$$(13) \quad m_z^\theta = \frac{\theta_0 - \theta_z}{\theta_s - \theta_z}$$

$$(14) \quad m_z^e = \frac{e_0 - e_z}{e_s - e_z}$$

m_z^θ et m_z^e sont des paramètres géométriques des profils de températures et de vapeur d'eau entre la surface du lac et le niveau Z.

(I2) devient alors :

$$\beta = \gamma \cdot \frac{\theta_o - \theta_s}{\theta_s - \theta_z} \cdot \frac{\theta_s - \theta_z}{e_s - e_z} \cdot \frac{e_s - e_z}{e_o - e_z} = \frac{m_z^\theta}{m_z^e} \cdot \frac{\theta_s - \theta_z}{e_s - e_z}$$

Si l'on admet : $m_z^\theta = m_z^e$, soit la similitude géométrique des profils de chaleur et de pression de vapeur, il vient :

$$(I5) \quad \beta = \gamma \cdot \frac{\theta_s - \theta_z}{e_s - e_z}$$

Au prix de ces multiples hypothèses, la connaissance de la température θ_z et de la pression de vapeur e_z à un niveau z au-dessus du lac, ainsi que de la température superficielle θ_s de son eau, permettant de calculer la pression de vapeur saturante e_s qui lui correspond, donne une estimation de β .

Si l'on fait apparaître alors β dans l'équation du bilan (2), il vient :

$$Q - S = (I + \beta) \cdot LE, \text{ soit:}$$

$$(I6) \quad E = \frac{Q - S}{L \cdot (I + \beta)}$$

qui permet l'estimation de E sur un intervalle de temps fixé.

Nous verrons par la suite que le choix du niveau z n'est pas indifférent. Il importe bien sur que z soit dans la couche d'air influencée par le lac, mais il faut également alors que Q soit mesuré à proximité du niveau z, afin que la chaleur sensible C de l'équation soit effectivement celle mise en jeu entre les niveaux 0 et z.

I - B - 2 - La formule de PENMANN.

PENMANN suppose que le niveau z est celui de l'abri météorologique de température θ_a et de pression de vapeur d'eau e_d , dans la plupart des cas l'abri météorologique n'est évidemment pas dans la couche d'air sous l'influence du lac.

On admet donc : $\theta_z = \theta_a$ et $e_z = e_d$.

Le rapport de BOWEN devient d'après l'équation (I5) :

$$(I7) \quad \beta = \gamma \cdot \frac{\theta_s - \theta_a}{e_s - e_d}$$

Posons $\Delta_s^a = \frac{e_s - e_d}{\theta_s - \theta_a}$, qui est peu différent de la dérivée:

$$\Delta = \frac{d(e_s(\theta))}{d\theta} \text{ de la pression de vapeur saturante en}$$

fonction de la température.

$$\text{Alors } \beta = \gamma \cdot \frac{(e_s - e_d) / \Delta}{e_s - e_d} = \frac{\gamma}{\Delta} \cdot \frac{(e_s - e_d) - (e_a - e_d)}{e_s - e_d} \quad (I7')$$

Penmann introduit alors la formule de Dalton, liant l'évaporation à la différence entre la pression de vapeur saturante e_s à la température de la surface évaporante, et la pression de vapeur sous abri e_d par l'intermédiaire d'une fonction de la composante horizontale u de la vitesse du vent.

$$(18) E = f(u) \cdot (e_s - e_d)$$

ce qui dans (17) permet d'écrire β sous la forme

$$(19) \beta = \frac{\gamma}{\Delta} \frac{E - f(u) \cdot (e_s - e_d)}{E}$$

D'après Dalton, $f(u) \cdot (e_s - e_d)$ est l'évaporation E_a d'une surface évaporante fictive à la température θ_a de l'abri.

alors (20) $\beta = \frac{\gamma}{\Delta} \cdot \frac{E - E_a}{E}$ qui avec la formule (16) conduit à *

$$(21) E = \frac{Q-S}{L} + \frac{\gamma}{\Delta} \cdot E_a$$

* formule de Penmann qui peut être appliquée sur un pas de temps déterminé.

I - B - 3 - Calcul approché de $e_w(T)$ et de sa dérivée $d(e_w(T))/dT$

Nous avons réalisé un ajustement de la fonction $e_w(T) = f(T)$ à une cubique, basée sur les 4 couples de valeurs :

$$T = 10^\circ\text{C} \quad e_w = 12,27 \quad \text{mb}$$

$$T = 20^\circ\text{C} \quad e_w = 23,37 \quad \text{mb}$$

$$T = 30^\circ\text{C} \quad e_w = 42,43 \quad \text{mb}$$

$$T = 40^\circ\text{C} \quad e_w = 73,78 \quad \text{mb}$$

L'ajustement est :

$$(a) e_w(T) = 0,00072167 T^3 - 0,00350000 T^2 + 0,70973333 T + 4,000000$$

Il en découle une valeur de la dérivée $\frac{d(e_w(T))}{dT}$

$$(b) \frac{d(e_w(T))}{dT} = 0,00216501 T^2 - 0,00700000 T + 0,70983333$$

Cependant nous avons également ajusté à la fonction $\frac{d(e_w(T))}{dT} = f(T)$ une conique, basée sur les 3 couples de valeurs.

$$T = 10^\circ\text{C} \quad \frac{d(e_w)}{dT} = 0,825$$

$$T = 25^\circ\text{C} \quad \frac{d(e_w)}{dT} = 1,890$$

$$T = 40^\circ\text{C} \quad \frac{d(e_w)}{dT} = 3,940$$

L'ajustement est

$$(c) \frac{d(e_w(T))}{dT} = 0,00219 T^2 - 0,00561 T + 0,66220$$

La comparaison entre ces différents ajustements et les valeurs exactes a été rassemblée dans le tableau suivant.

T °C	valeurs exactes:		calculé	calculé	calculé	écart de %	écart de %	écart de %
	e_w/mb	$\frac{de_w}{dt}$	par(a) e_w/mb	par(b) $\frac{de_w}{dI}$	par (e) $\frac{de_w}{dI}$			
5	6,108	-	4,800	-	-	-21,4	-	-
8	8,719	0,560	8,352	0,729	-	- 4,2	-30,2	-
10	10,72	-	10,62	-	-	- 0,9	-	-
12	12,27	0,825	12,27	0,856	0,825	0,0	- 3,7	0,0
15	14,02	0,937	-	0,925	-	-	+ 1,3	-
18	17,04	1,095	17,10	1,092	1,071	+ 0,3	+ 0,2	+ 2,2
20	23,37	1,450	23,37	1,436	1,426	0,0	+ 0,9	+ 1,7
25	31,67	1,890	31,63	1,888	1,890	- 0,1	+ 0,1	0,0
30	42,43	2,430	42,43	2,448	2,465	0,0	- 0,7	- 1,4
35	56,24	3,110	56,30	3,117	3,149	+ 0,1	- 0,2	- 1,2
40	73,78	3,940	73,78	3,894	3,940	0,0	+ 1,1	0,0
45	95,36	-	95,42	4,779	-	- 0,4	-	-
50	123,4	-	121,75	-	-	- 1,3	-	-

Où l'on voit que l'ajustement (a) est satisfaisant à mieux que 1% entre 5°C et 45°C, ce qui couvre largement notre champ d'expérience.

L'ajustement (c) est satisfaisant à 2% entre 10°C et 40°C alors que l'ajustement (b) l'est à 1% entre 12°C et 40°C, ce qui est en général suffisant pour ces températures couramment rencontrées sur le lac.

I - C - Approche de β par la méthode combinée :

Bilan d'énergie et Transfert turbulent

La méthode repose sur la connaissance, en plusieurs niveaux de la couche d'air au-dessus de l'influence du lac, des températures et pressions de vapeur d'eau.

A la condition d'avoir des flux conservatifs, nous étions parvenus à l'expression suivante (II) :

$$(II) \beta = \gamma \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{e_1 - e_2}$$

On suppose l'égalité des coefficients de transfert de chaleur et de vapeur $A_\theta = A_h$ qui est le cas dans des conditions d'équilibre de l'atmosphère, mais devient beaucoup plus critiquable en régime perturbé.

Soit maintenant :

$$\Delta\theta_s = \theta_1 - \theta_2$$

$$\Delta\theta_w = \theta_{w1} - \theta_{w2}$$

θ_{w1} et θ_{w2} sont les températures humides aux niveaux I et 2
 $\Delta\theta_s$ la différence entre les températures sèches des niveaux I et 2
 $\Delta\theta_w$ la différence entre les températures humides des niveaux I et 2

On sait par ailleurs :

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= e_{w1} - \gamma \cdot (\theta_1 - \theta_{w1}) \\ e_2 &= e_{w2} - \gamma \cdot (\theta_2 - \theta_{w2}) \end{aligned} \right\} (22)$$

e_{w1} et e_{w2} étant les pressions de vapeur saturante en fonction de la température. La valeur $\theta_{w1} - \frac{\Delta\theta_w}{2}$ de la température humide, Δ_w dérivée de la pression de vapeur saturante en fonction de la température, est voisin de $\Delta_w = \frac{e_{w1} - e_{w2}}{\theta_{w1} - \theta_{w2}}$

De (22) on peut extraire :

$$\begin{aligned} e_1 - e_2 &= (\Delta_w + \gamma) \cdot (\theta_{w1} - \theta_{w2}) - \gamma \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\ &= (\Delta_w + \gamma) \cdot \Delta\theta_w - \gamma \cdot \Delta\theta_s \end{aligned}$$

soit en reportant dans (II) :

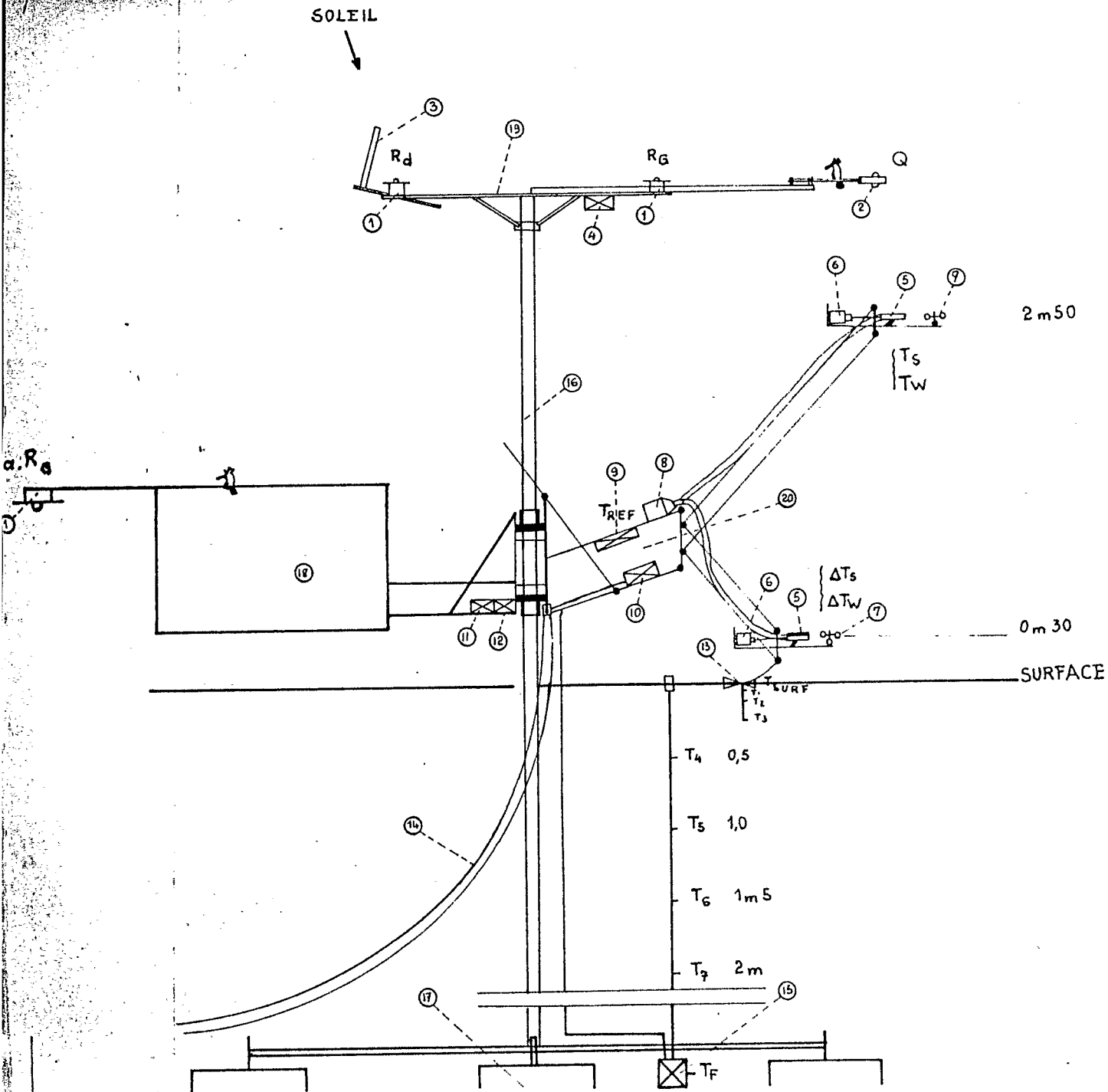
$$\beta = \frac{\gamma \cdot \Delta\theta_s}{(\Delta_w + \gamma) \Delta\theta_w - \gamma \cdot \Delta\theta_s} \quad \text{et} \quad 1 + \beta = \frac{(\Delta_w + \gamma) \cdot \Delta\theta_w}{(\Delta_w + \gamma) \cdot \Delta\theta_w - \gamma \cdot \Delta\theta_s}$$

et en remplaçant $1 + \beta$ par cette valeur dans (I6) :

$$(23) \quad E = \frac{Q - S}{L} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{\Delta_w + \gamma} \cdot \frac{\Delta\theta_s}{\Delta\theta_w} \right)$$

Cette équation peut être utilisée de deux manières :

SCHEMA GENERAL DE L'EVAPOTRON



- 1 PYRANOMETRES
- 2 PYRRADIOMETRE
- 3 BANDE PARE SOLEIL DE SCHUEPP
- 4 SERVITUDES PYRRADIOMETRE
- 5 TURBINES SONDES $T_s T_w \Delta T_s \Delta T_w$
- 6 RESERVES EAU POUR MOUSSELINES
- 7 ANEMOMETRES
- 8 VENTILATEUR DES TURBINES
- 9 ENCEINTE DE T REF
- 10 BOITE RELAIS
- 11 AMPLIFICATEURS VENTS
- 12 BATTERIES VENTS
- 13 FLOTTEUR $T_{SURF} T_1 T_2 T_3$
- 14 3 CABLES LIAISON AVEC ENREGISTREURS
- 15 ENCEINTE SOUDURE FROIDE

- 16 MAT Ø 9cm
- 17 CROIX SUPPORT
- 18 DERIVE
- 19 SUPPORT RAYONNEMENTS
- 20 BATI DEFORMABLE

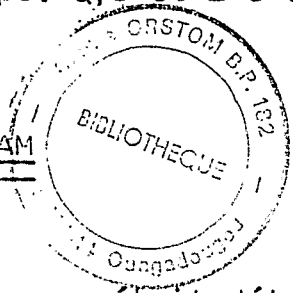
- Ponctuellement dans le temps : Q, S et LE sont alors des flux et s'expriment en watts. cm⁻² ou en calories. seconde⁻¹. cm⁻²

$\Delta \theta_s$ et $\Delta \theta_w$ sont les gradients de températures sèches et humides instantanées.

Δp_w est la pente de la pression de vapeur saturante, fonction de la température, pour la température humide moyenne de celles des deux niveaux. L'équation nous donne alors une valeur instantanée du flux d'évaporation.

- On peut également considérer que cette expression s'applique aux valeurs moyennes de ces différents flux sur un pas de temps Δt à déterminer. On effectue alors véritablement un bilan énergétique sur ce pas de temps. Q, S et E s'exprimeront alors en Joules. cm⁻² ou en calories. cm⁻²

II - DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE MESURE DU LAC DE BAM



II - A - Situation du dispositif

Le choix de l'emplacement où seraient effectuées les mesures était déterminant et le site retenu est au milieu du bras principal du lac. En hautes eaux les rives (inondées) sont à plus de 250 m du dispositif, ce qui assure une bonne homogénéisation des caractéristiques thermiques de l'air et de l'eau en cet endroit, que l'on peut donc considérer comme représentatif de l'ensemble du lac. Des vérifications des différentes températures de l'air et de l'eau seront d'ailleurs effectuées de temps à autres sur le reste du lac. Toutefois par vent d'harmattan particulièrement sévère, il arrive que le niveau supérieur soit baigné d'air de continental non influencé par le lac.

Le bâti de mesure est relié à la rive par un câble multiconducteur de 250 m longueur.

II - B - Description du bâti de mesure

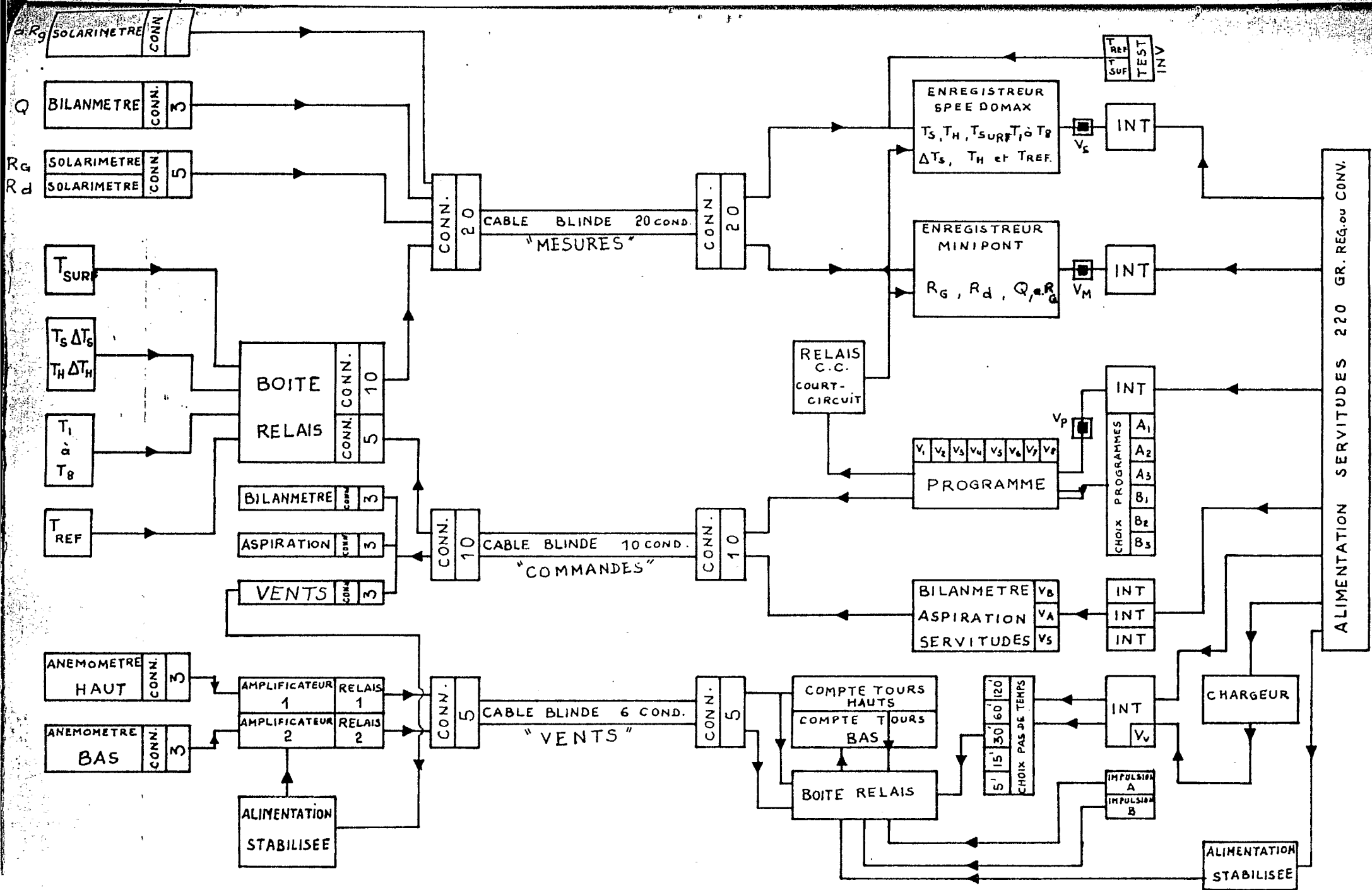
La totalité des instruments de mesure est portée par un mât en acier tubulaire de $\varnothing 9$ cm, scudé sur une croix métallique, dont chaque bras de 2 m de développement s'appuie sur un bloc de béton d' $\frac{1}{2}$ m² de section, reposant directement sur le fond de vase argileuse. Le mât mesure 6 m et permet de suivre la totalité des variations d'amplitude du lac.

Sur le sommet du mât un bâti en profilés d'aluminium supporte les appareils de mesure (de rayonnement) :

- 1 pyrromètre pour le rayonnement net
- 2 pyrranomètres pour les rayonnements global et diffus. Ainsi que les vitesses du Pyrradiomètre (soufflerie pour le gonflage des coupelles et anneau soufflant).

Un autre pyrranomètre, dirigé vers le bas, mesure le rayonnement réfléchi R_G , qui permet une bonne évaluation de α , selon la hauteur du soleil, la couleur de l'eau et sa turbulence. Cet appareil est fixé sur le bâti tournant.

Autres sondes de mesures (températures sèches et humides aux deux niveaux, température superficielle du lac, Profil thermique de l'eau, Vitesses du vent, mêmes deux niveaux) sont regroupées sur un bâti en profilés d'aluminium, rotatif grâce à un dérive de rester toujours face au vent, en pivotant sur du mât sur des supports à roulements à bille.



SCHEMA DU DISPOSITIF DE MESURE ET DE COMMANDE

Ces supports peuvent se déplacer verticalement le long du mât selon les hauteurs d'eau. De plus la structure en métal léger est déformable et suit facilement la baisse progressive du lac. Elle est prolongée vers l'avant par deux bras mobiles articulés, aux extrémités réglables en hauteur de 0 à 3 m, qui supportent les sondes de mesure. La température superficielle et les 3 premiers niveaux du profil thermique ($T_1 = -6,5\text{cm}$, $T_2 = -12,5\text{cm}$, $T_3 = -25\text{cm}$) sont mesurés par des sondes fixées à un flotteur, qui suivent les rotations du bati métallique. Les 5 niveaux profonds du profil thermique ($T_4 = -50\text{cm}$, $T_5 = -100\text{cm}$, $T_6 = -150\text{cm}$, $T_7 = -200\text{cm}$, $T_8 = \text{Température du fond}$) sont assujettis sur un support isolant en un point fixe, voisin du mât, afin d'éviter des variations de températures causées par un brassage dû à la rotation du bati.

Initialement, le niveau du support déformable était fixé par un flotteur de bonnes dimensions, qui devait permettre aux différentes sondes de demeurer à un niveau constant par rapport à la surface du lac, malgré les oscillations de ce dernier (montée brutale du plan d'eau après une tornade); Malheureusement, la très mauvaise tenue aux vagues de ce perfectionnement nous a contraints à le supprimer; le réglage est donc désormais manuel et on a donc l'obligation de prévoir les montées du plan d'eau, souvent très violentes en début de saison des pluies, lorsque le lac est au plus bas.

Nous allons donc reprendre tour à tour chaque terme du bilan, et suivre sa mesure des sondes jusqu'à l'enregistrement.

II - C - Mesures des termes du bilan radiatif

II - C - I - Rayonnement net Q

Il est mesuré par un Pyrradiomètre différentiel à deux coupelles opposées, fabriqué par MIDDLETON AND CO. Sa sensibilité à 20°C est de 0,398 mV par mW. cm^{-2} pour les ondes de "courtes longueurs" (visibles 0,2 à $4\mu\text{m}$) et de 0,397 mV par mW. cm^{-2} pour les ondes de "grandes longueurs" (infra-rouge) 4 à $100\mu\text{m}$).

Les coupelles de protection sont en polyéthylène, gonflées à une pression de quelques cm d'eau par un courant d'air sec produit par une petite pompe à air. Afin de réduire les échanges convectifs des deux surfaces sensibles avec l'air ambiant un anneau chauffant livré par le constructeur, constitué d'une fine résistance électrique circulaire, dans le plan de symétrie de l'appareil a été également installé. Les deux câbles de mesure sont reliés par un cordon blindé du connecteur principal à 20 contacts du câble de liaison, dit "câble mesures" à 20 conducteur. Ce câble, long de 250 m, est immergé en compagnie des câbles "commandes et servitudes" long de 250 m, et "vents". A leur arrivée dans la salle d'enregistrement, les deux câbles réservés au pyrradiomètre, sont repris et dirigés sur deux des six directions d'un enregistreur MECI Mini-Pont type D dans la gamme de sensibilité 0-50 mV. Le zéro de l'appareil est réglé de façon à admettre les différences de potentiel de -10 à 40 mV, ce qui permet donc l'enregistrement d'une gamme de rayonnement net R_N allant de

allant de $-25,2 \text{ mw, cm}^{-2}$ à $+ 100 \text{ mw. cm}^{-2}$, soit une sensibilité de $1,05 \text{ mw.cm}^{-2}$ par mm de diagramme.

Un dispositif annexe créateur de top, permet de déterminer des pas de $\frac{1}{2}$ heure automatiquement sur l'enregistrement par mise à zéro d'une direction.

L'alimentation de la pompe à air et de l'anneau chauffant se fait en 220 volt transformés sur le bati en 12 volts pour la résistance chauffante, par l'intermédiaire du câble "commandes et servitudes". Elle est directement commandée depuis la salle des enregistreurs.

La valeur mesurée de Q par le pyrromètre peut être comparée avec la valeur calculée :

$$R_G + L\downarrow - aR_G - L\uparrow$$

Cette comparaison est rendue particulièrement intéressante par les difficultés d'étalonnage et le manque de précision d'un tel appareil. Nous verrons par la suite comment le terme $R_G + L\downarrow - aR_G - L\uparrow$ peut être estimé.

II - C - 2 Le rayonnement global R_G , le rayonnement diffus R_d et le rayonnement réfléchi aR_G ;

Ces trois rayonnements, qui sont du domaine du visible, sont mesurés par des pyrromètres KIPP à thermopiles de MOLL. La thermopile est protégée par une double coupelle de verre. La sensibilité de ces appareils est d'environ $0,096 \text{ mV}$ par mw. cm^{-2} . Contrairement au pyrromètre, l'étalonnage des pyrromètres est simple et relativement précis. Il s'effectue à l'aide d'un pyrromètre étalon de LINKE-FEUSSNER :

La thermopile, mesurant le rayonnement diffus R_d , est surmontée d'une bande arc-soleil, portion de cylindre de révolution dont l'axe, parallèle à l'axe du monde, passe par le centre de la surface sensible de la thermopile. Nous avons adopté le modèle dit de SCHUEPP (diamètre 90 cm, largeur 6 cm).

Les six câbles de mesure sont reliés par un cordon blindé au connecteur à 20 contacts du câble "mesures". Dans la salle des enregistreurs les six câbles réservés aux rayonnement global, diffus et réfléchi sont injectés sur 4 des directions du même enregistreur MECI Mini-Pont type D, dans la même gamme de sensibilité 0-50 m V. Le zéro de ces 4 directions étant cependant le même que celui des 2 directions réservées au Pyrromètre, la gamme de mesure s'étale de -10 mV à 40 mV .

Une mesure négative étant sans signification pour les rayonnements diffus et global, l'appareil permet donc, pour ces deux rayonnements, l'enregistrement d'une gamme de rayonnement R_G et R_d allant de 0 à 416 mV.cm^{-2} sur un diagramme de 9,6 cm, soit avec une sensibilité de $4,33 \text{ mw. cm}^{-2}$ par mm.

Le rayonnement réfléchi étant avec nos conventions négatif, l'appareil permet donc l'enregistrement d'une gamme de rayonnement $a.R_G$ allant de 0 à -104 mw.cm^{-2} sur un diagramme de 2,4 cm, ce qui dans le plus mauvais des cas permet la mesure

un albedo a de 25% pour un rayonnement R_G maximum donc une hauteur du soleil maximale, au moment où a est donc minimum. Comme pour le pyrromètre, il convient de régler parfaitement l'horizontalité des surfaces sensibles des pyrromètres, afin d'éviter toutes erreurs d'azimut, préjudiciables à un étalonnage satisfaisant. Enregistrés sur le même diagramme que le rayonnement net R_N , avec une direction pour R_d , 2 directions pour R_G et 1 direction pour $a.R_G$, les rayonnements global, diffus et réfléchi R_G, R_d et $a.R_G$ bénéficient de l'inscription automatique du pas de temps de $\frac{1}{2}$ heure choisi.

II - C - 3 - Estimation du rayonnement net Q par le terme composé

$$R_G + L\downarrow - aR_G - L\uparrow \text{ à partir du rayonnement global } R_G$$

II - C - 3 - a le rayonnement réfléchi $a.R_G$

L'albedo a de l'eau est variable en fonction de la hauteur du soleil mais aussi de l'état plus ou moins agité de la surface de l'eau, ainsi éventuellement de sa couleur et de sa propreté. On admet néanmoins les chiffres suivants dans le cas de l'eau calme et propre.

hauteur du soleil	albedo a
90° à 40°	0,02
30°	0,06
20°	0,13
10°	0,35
5°	0,59

On voit donc que le rayonnement réfléchi est dans une très large part fonction de la hauteur du soleil. Cependant l'essentiel du rayonnement étant obtenu pour des valeurs de la hauteur du soleil suffisantes, l'influence sur l'évaporation terme du bilan, n'est guère importante.

Ces valeurs très variables de l'albedo en fonction de la hauteur du soleil nous ont conduit à installer un dispositif permettant la mesure directe du rayonnement réfléchi aR_G , donc de a, et son enregistrement. Cependant durant la première année de mesure, a n'étant pas mesuré devait être estimé. En fait les données de mesures à venir devraient nous permettre une bonne définition de a en toutes circonstances.

II - C - 3 - b - Le rayonnement terrestre $L\uparrow$

Si l'on réfute le pyrromètre comme moyen de mesure des grandes longueurs d'onde il est nécessaire d'évaluer le rayonnement terrestre $L\uparrow$ par une formule. Dans le cas de grandes surfaces d'eau libre, cela est rendu aisé par la connaissance de la température superficielle T_{surf} de la nappe d'eau, qui est de plus

caractérisée par une émissivité bien déterminée maximale pour la normale à la surface où elle atteint 0,96. Cependant il serait très instructif de bien vérifier la valeur de cette émissivité dont on admet, peut-être imprudemment, la constance à 0,96.

Le rayonnement terrestre peut alors être évalué d'après la loi de STEFAN :

$$L \uparrow = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{surf}^4$$

ou : émissivité de l'eau, sans dimension = 0,96

σ : constante dimensionnelle = $5,7 \cdot 10^{-2} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ok}^{-4}$

T_{surf} : température de la surface de l'eau en ok.

III - C - 3 Le rayonnement atmosphérique $L \downarrow$

Il est très délicat de chiffrer le rayonnement atmosphérique $L \downarrow$ par une formule convenable. Deux types de formules coexistent : celles dérivées de la formule de LANGSTROM :

$$L \downarrow = \sigma \cdot T^4 (a - b \cdot 10^{-c \cdot e_d})$$

et celles dérivées de la formule de BRUNT :

$$L \downarrow = \sigma \cdot T^4 \cdot (a' + b' \sqrt{e_d})$$

ou a, b, c, a' et b' sont des constantes, et e_d la pression de vapeur d'eau sous abri. Les valeurs adoptées généralement sont actuellement :

$$a = 0,82, b = 0,25, c = 0,07$$

$$a' = 0,61, b' = 0,06$$

Dans les domaines habituels de e_d , ces deux formules donnent des résultats voisins, l'émissivité de l'atmosphère variant ainsi grossièrement de 0,67 pour $e_d = 4 \text{ mb}$, à 0,80 pour $e_d = 25 \text{ mb}$.

En fait, connaissant R_G , $a \cdot R_G$ et $L \uparrow$ ainsi que T et e_d , il sera particulièrement intéressant de déterminer $L \downarrow$ et la valeur des coefficients a, b, c, ou a', b'.

En pratique l'estimation du rayonnement atmosphérique au sol par ciel clair est assez correctement rendue par ces formules basées sur la seule tension de vapeur d'eau e_d au sol. Mais l'emploi en lieu et place de e_d de l'épaisseur d'eau condensable dans l'atmosphère est préférable. On fait intervenir en fait une épaisseur corrigée, l'épaisseur efficace u, qui permet de nouvelles formules basées au point par LONNQVIST :

$$L \downarrow = \sigma \cdot T^4 (0,85 - 0,29 \cdot 10^{-0,030 u})$$

et $L \downarrow = \sigma \cdot T^4 (0,54 + 0,05 \sqrt{u})$

Il va sans dire que l'application de ces formules n'est jamais aisée, et qu'elle devient peu sûre et critiquable dès qu'il devient nécessaire d'introduire des corrections dues à la couverture nuageuse.

Les estimations que nous avons fournies des différents termes du bilan radiatif : R_G , aR_G , $L\downarrow$ et $L\uparrow$, permettent néanmoins une évaluation de Q , rayonnement net, qu'il sera toujours valable de comparer, ne serait-ce que pour des cas particuliers, (faible nébulosité, nuit...), au rayonnement net mesuré par le pyrromètre.

II - C - 4 - Mesure des températures nécessaires à la détermination du rapport de BOWEN

II - C - 4 - a- Les Sondes de mesure

Le dispositif, installé sur le lac de Bam, permet la mesure des températures suivantes :

T_s température sèche au niveau supérieur

T_w température humide au niveau supérieur

ΔT_s différence entre les températures sèches du niveau supérieur et du niveau inférieur.

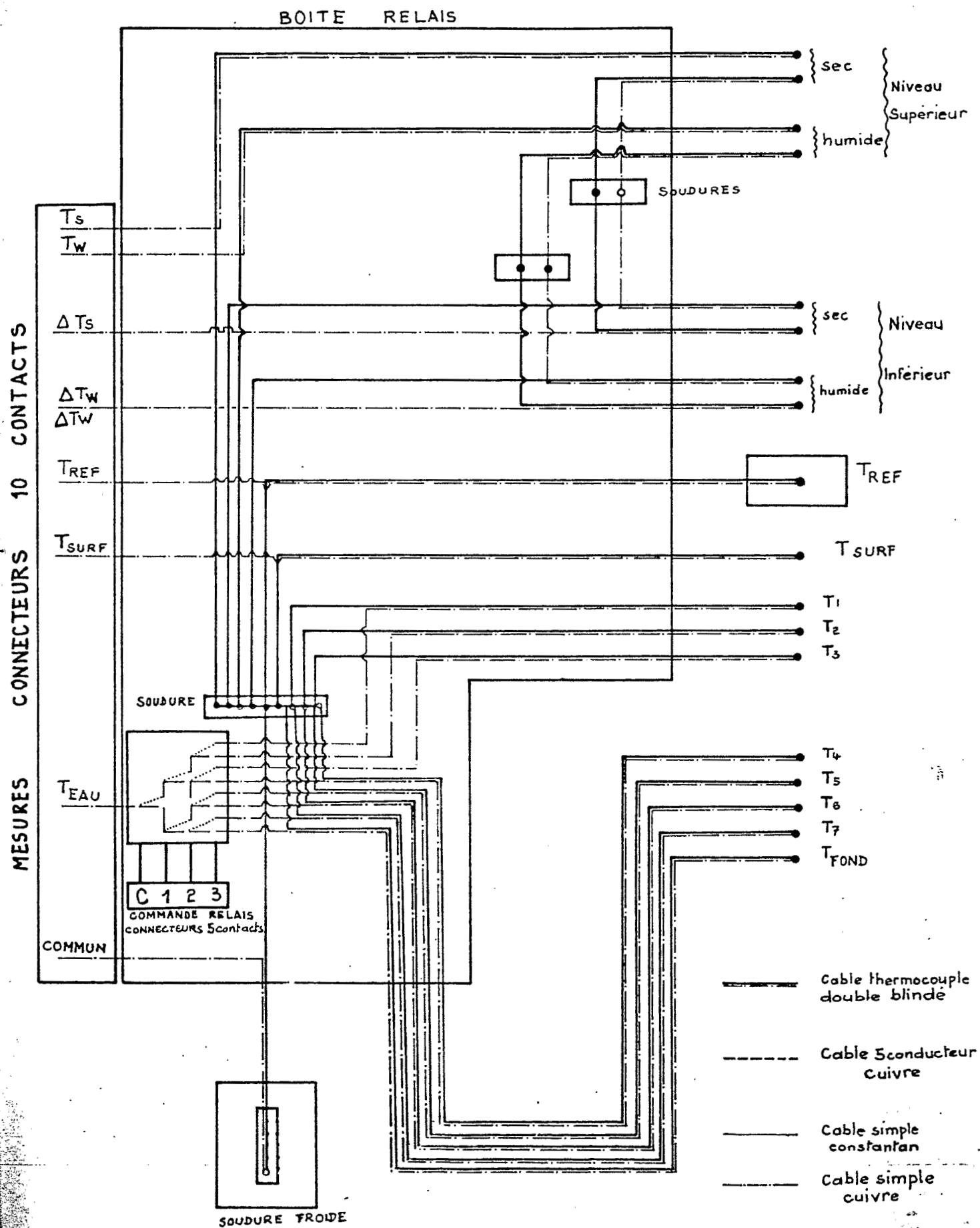
ΔT_w différence entre les températures humides du niveau supérieur et du niveau inférieur

T_{surf} température superficielle de l'eau du lac.

Les températures sont mesurées grâce à des sondes à thermocouples Cuivre-Constantan, donnant une différence de potentiel proportionnelle à la température dans la gamme des températures atmosphériques (15 à 45°C) d'environ 40 mV par °C. Les soudures "chaudes" de ces thermocouples constituent les sondes, les soudures "froides", toutes assemblées en une seule soudure, sont noyées dans une enceinte de grande inertie thermique, immergée au fond du lac. Un autre thermocouple, dont l'une des soudures est la soudure "froide" précédente, et l'autre placée dans une deuxième enceinte fixée du bati, dont on peut lire la température T_{ref} sur un thermomètre classique, donne un d.d.p. proportionnelle à la différence entre la température de référence T_{ref} et celle de l'enceinte immergée des soudures froides. Ce qui permet de déterminer la température des soudures "froides" sans hisser à l'air libre l'enceinte immergée, donc sans perturber cette température de comparaison.

Les mesures T_s , T_w , T_{surf} , T_{ref} sont obtenues avec un thermocouple unique, sa sensibilité est donc de 40 mV par °C. Par contre deux thermocouples en série sont utilisées pour les gradients ΔT_s , et ΔT_w , les deux soudures "chaudes" au niveau supérieur et les deux "froides" au niveau inférieur, et ΔT_w sont donc positifs si les températures hautes sont supérieures aux températures basses. La sensibilité est alors de 80 mV par °C.

SCHEMA DE CABLAGE DES THERMOCOUPLES



II - C - 4 - b - L'enregistrement

Ces différentes d.d.p. sont alors injectées, selon un schéma que nous détaillerons ultérieurement, à un enregistreur MECI SPEEDOMAX G I3 dans les gammes 1 mV ou 2 mV, ce qui avec un diagramme de 25 cm autorise une sensibilité de 1 ou 2 cm par °C pour les gradients ΔT_s et ΔT_w , et 0,5 cm par °C pour les températures T_s , T_w , T_{surf} , T_{ref} .

On obtient ainsi une précision allant, selon la grandeur mesurée et la gamme de sensibilité de 1/5 de °C à 1/20 de °C.mm⁻¹. Les variations rapides de ces diverses grandeurs sont en général telles qu'il serait illusoire d'augmenter la sensibilité (par un accroissement du nombre de thermocouples, ou par un appareil enregistreur de classe supérieure).

II - C - 4 - c - Servitudes des sondes de mesure.

Afin de mesurer effectivement des températures semblables à celle des différentes couches d'air étudiées, les sondes sont placées dans des tuyères, du type déjà mis au point à Brazzaville. Ces tuyères, protégées par un écran brillant de façon à réduire l'effet du rayonnement, sont reliées à un aspirateur, qui y crée un courant d'air de l'ordre de 1m/s, suffisant pour assurer une bonne représentativité des températures mesurées mais insuffisant pour modifier l'équilibre des couches d'air stratifiées. Ajoutons que, du moins pour les journées venteuses, l'aspiration n'est guère nécessaire, la disposition à l'avant du dispositif-girolette des turbines, leur assurant une très bonne ventilation naturelle. La mise en marche est le fonctionnement du ventilateur sont commandés depuis la salle des enregistreurs par l'intermédiaire du câble "commandes et servitudes".

Les sondes sèches et humides sont réunies dans une même tuyère, contrairement à Brazzaville, où nous conservions une tuyère pour chaque sonde. La sonde sèche plus longue que la sonde humide est de plus située au-dessus. Dans le cas inverse, la sonde sèche pourrait être humidifiée par des fuites de la sonde humide, ou plus simplement être baignée par de l'air déjà refroidi par son passage sur la mousseline humide de la sonde sèche.

L'humidification des mousselines est assurée par les mousselines elles-mêmes torsadées dans 2 tuyaux plastiques souples de ϕ 4 mm pour chaque sonde, et dont l'extrémité baigne dans un réservoir plastique. La surface de l'eau dans ce réservoir est d'environ 5 cm supérieure à la position de la mousseline.

La longueur des tuyaux souples plastiques est d'environ 30 cm. En pinçant plus ou moins ces tuyaux il est facile de régler à sa convenance le débit d'arrivée d'eau aux mousselines.

Les mousselines doivent enrober 4 à 5 cm de la hampe support des sondes, les thermocouples de mesures étant tout au bout de la hampe. Ceci est extrêmement important, sinon la température d'équilibre des mousselines ne serait pas la température humide représentative de la tension de vapeur de l'air, mais une température supérieure, intermédiaire entre cette dernière et la température plus élevée de l'eau dans le réservoir. De même le débit de l'arrivée d'eau doit être réglé de telle sorte que la mousseline soit imbibée correctement. A la limite il est préférable d'avoir une mousseline qui goutte un peu (si on a respecté les 4 à 5 cm de longueur indispensable à la bonne mise en température) à une mousseline insuffisamment humectée.

On doit également porter un soin particulier au centrage des hampes support de sondes dans le corps de la tuyère ; cela est relativement moins important pour les sondes sèches, car la paroi intérieure de la tuyère ventilée est

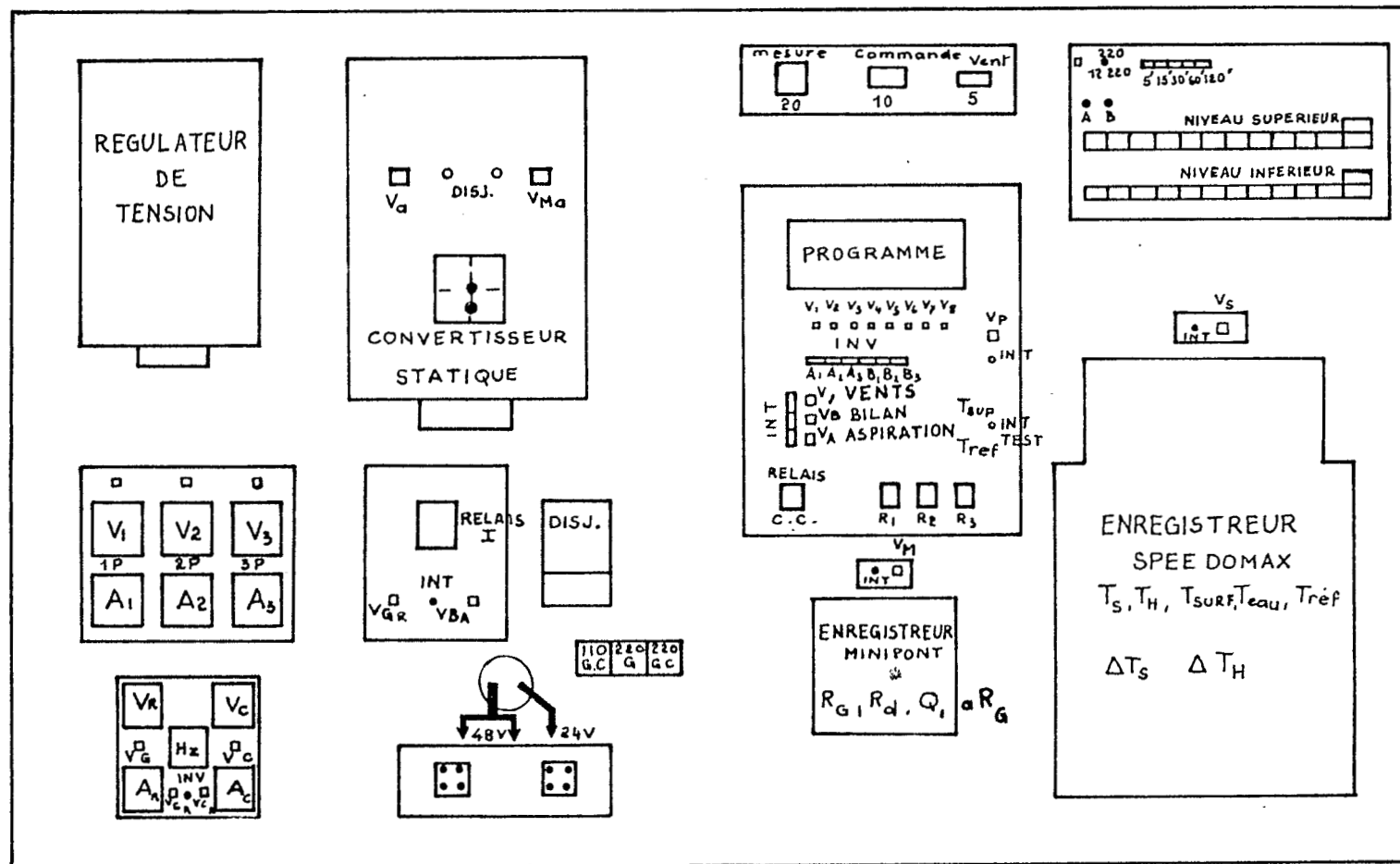


TABLEAU DE COMMANDE

protégée des différents rayonnements par un écran en alluminium poli, est en gros à la température de l'air ; on n'introduit guère de la sorte qu'une inert parasite de la sonde sèche. Par contre un contact entre la sonde humide et la paroi est catastrophique, surtout en climat sec, la paroi étant à une température souvent supérieure de 10 à 15°C à celle de la mousseline.

Le mieux pour remédier à ces inconvénients est encore de prévoir des ergots de guidage solidaires des hampes de sondes. Sur nos premières réalisations, nous avions prévu un système d'alimentation des mousselines caractérisé par un réservoir à niveau constant. L'expérience nous a par la suite prouvé que cette précaution était totalement superflue.

Telles quelles les tuyères psychromètres, représentées sur le graphique joint nous donnent toutes satisfactions.

II - C-4 - d - Profils de températures et d'humidités de la couche d'air au-dessus du lac

Nous avons vu que nous mesurons et enregistrons en continu les températures sèches et humides en deux points de cette couche d'air. Il est intéressant de tracer la totalité du profil de la couche dans diverses circonstances climatiques afin de vérifier la valeur de nos hypothèses, concernant notamment le conservatisme des différents flux de chaleurs ou de vapeur.

De même il est bon de vérifier la représentativité du point phoisi pour bâtir l'évapotron, par des investigations sur l'ensemble du lac, à plus ou moins grandes distances des berges, coté au vent ou sous le vent, en présence ou non de végétation flottante.

Pour ce faire nous avons mis au point un dispositif, permettant par simple commutation la mesure des températures sèches et humides aux côtes suivantes : 10 cm, 20-30-40-50-60-80-100-125-150-175-200-250-300-400-500.

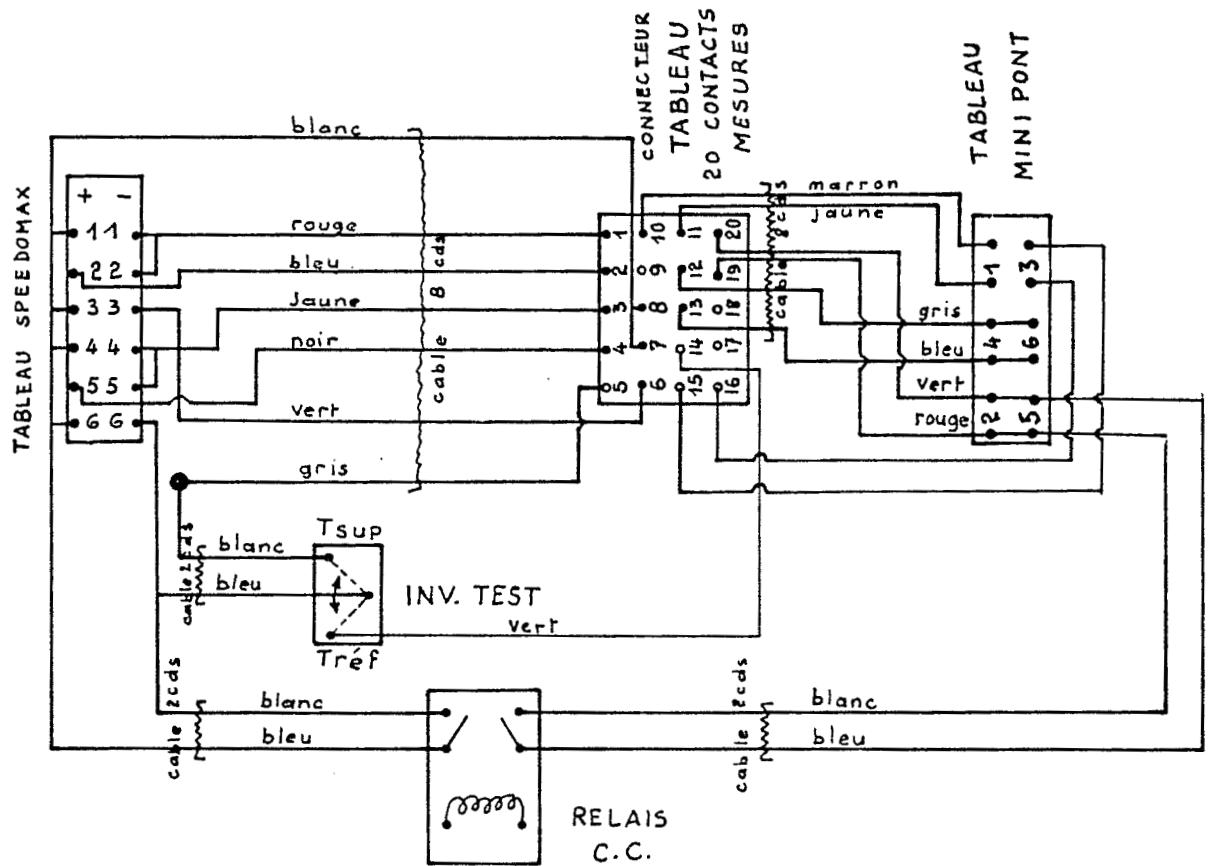
Ce dispositif est fixé sur un zodiac qui en assure le transport..L'organe de mesure est un microvoltmètre AOIP type UVA à alimentation autonome. Il ne s'agit bien sur pas là de mesures en continu, mais on pourrait envisager à un programme et d'un enregistreur à l direction de visualiser les profils de températures sèches ou humides.

Etant donné la nécessaire légèreté du dispositif, il n'a pas été fait de système d'aspiration. Nous comptons pour cela sur le vent qui est généralement suffisant.

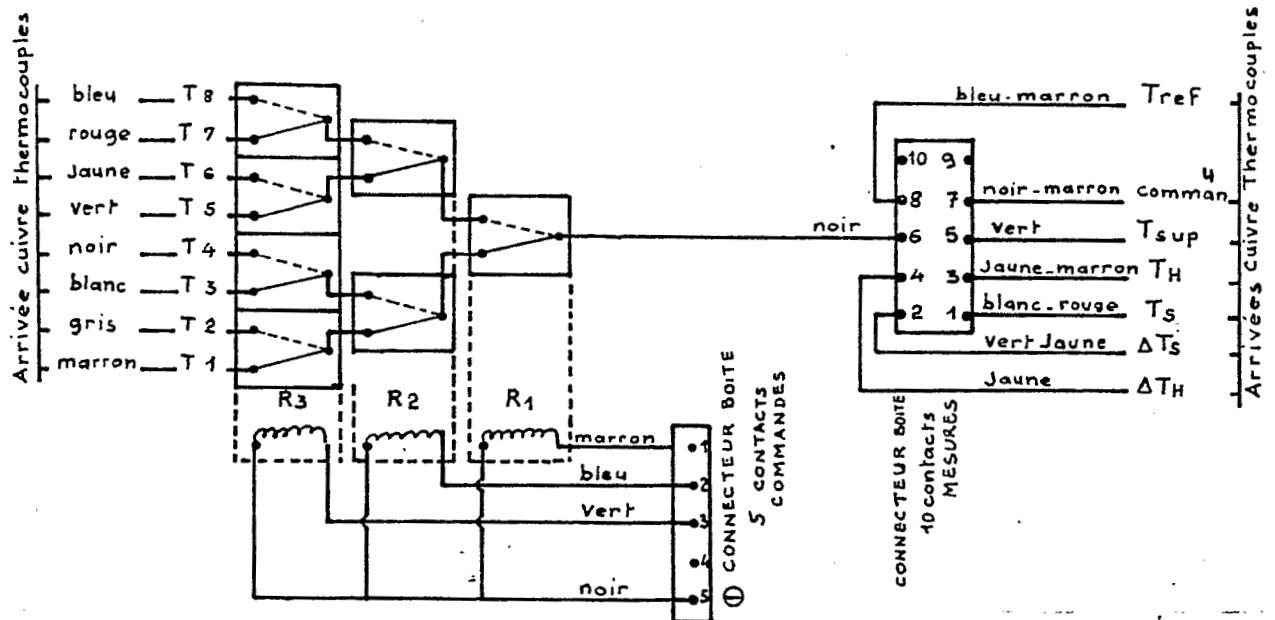
Les mesures étant brèves, l'humectation des mousselines est assurée par trempage direct.

Cet ensemble rustique permet toutefois une approche qualitative de la forme des profils, ce qui est suffisant dans le but fixé.

CIRCUIT MESURE - RACCORDEMENT AUX ENREGISTREURS



BOITE RELAIS - PROFIL DE TEMPERATURES



II - C-5-Mesure de S, chaleur transmise à l'eau du lac

II - C § - a - Les sondes de mesures

Deux approches sont possibles :

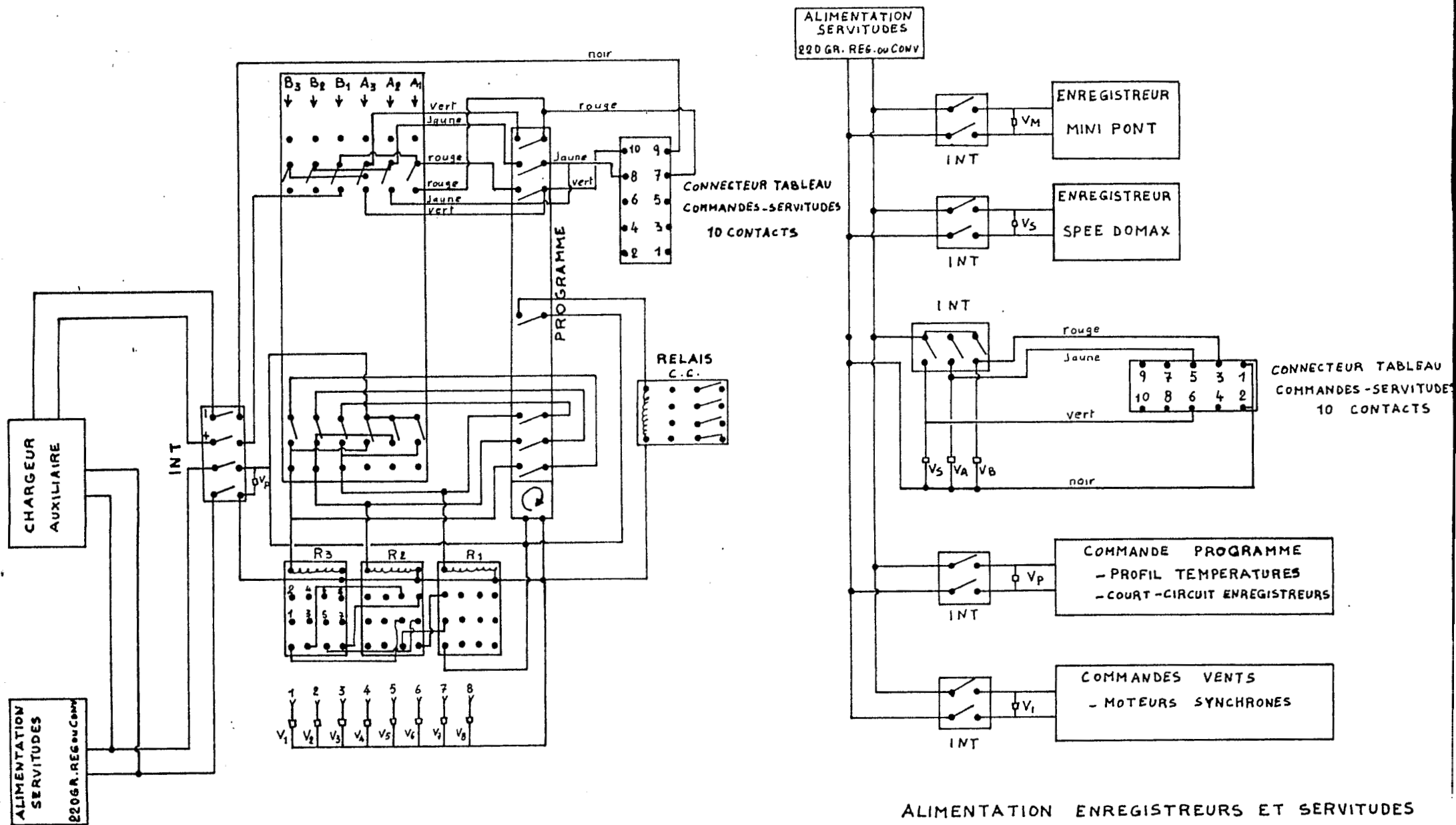
- Mesurer instantanément le flux calorifique pénétrant la surface du lac (à l'aide d'un fluxmètre), et en faire la moyenne sur le pas de temps considéré.

- Etablir un profil de température au début et à la fin de chaque pas de temps, et tirer de leur comparaison la quantité de chaleur accumulée par le lac entre ces deux mesures. La première possibilité est fort peu précise, et nous a donné bien des déboires ; nous avons donc adopté la seconde, qui n'est d'ailleurs guère meilleure, ainsi que nous le verrons par la suite.

Nous avons retenu 8 niveaux, les 3 premiers sont solidaires du support flottant supportant déjà la sonde de mesure de T_{surf} . Leurs profondeurs sont fixées à $T_1 = -6,5 \text{ cm}$, $T_2 = -12,5 \text{ cm}$, $T_3 = -25 \text{ cm}$,. Les 5 derniers sont $T_4 = -50 \text{ cm}$, $T_5 = -100 \text{ cm}$, $T_6 = -150 \text{ cm}$, $T_7 = -200 \text{ cm}$, $T_8 = \text{fond}$.

* Les huit soudures froides sont rassemblées en une seule confondue avec celle des sondes précédentes - les huit sorties cuivre sont injectées aux bornes d'un montage de relais qui sélectionne l'une d'entre elles, selon les ordres d'un programme, transmis par 4 câbles de commandes 12 V du câble noyé "commande et servitudes".

La direction sélectionnée, nommée T_{eau} , emprunte un câble de liaison qui avec les câbles correspondants à T_s , T_w , T_s , T_w parvient au connecteur à 20 contacts du câble "mesures", puis à l'enregistreur Speedomax.



COMMANDES PROFIL TEMPERATURES EAU

ALIMENTATION ENREGISTREURS ET SERVITUDES

Si par temps calme, il est relativement aisé d'estimer la chaleur emmagasinée entre deux profils thermiques successifs (l'eau, non perturbée, peut se stratifier, laissant paraître un gradient thermique vertical négatif sensible), il n'en va pas de même en cas de vent, car les vagues brassent alors la couche superficielle de l'eau sur une profondeur qui peut atteindre le mètre par grand vent, uniformisant les températures, ce qui interdit un bilan de S à l'échelle du pas de temps, c'est-à-dire de la demi-heure.

Dans ce cas, on peut cependant admettre, qu'à rayonnement net Q et température de surface T_{surf} égaux, correspond un flux S approximativement identique. Il conviendrait donc d'étalamer en fonction de Q et de T_{surf} les flux S correspondants, et de vérifier si le bilan de S sur plusieurs heures ou la journée, généralement assez précis, correspond à la somme des S successifs estimés, par cet étalonnage, et dans le cas contraire, partager le S journalier mesuré proportionnellement aux S estimés à partir de Q et de T_{surf} . Dans le cas où le flux S est négatif (refroidissement de la surface de l'eau), il se produit des mouvements convectifs très importants qui portent à la surface les eaux devenues plus chaudes et légères du fond, ce qui rend alors toute estimation de S totalement illusoire. Dans le cas d'utilisation de l'appareil sur pelouse à la mesure de l'E.T.R., cet ennui n'existait évidemment pas. De plus la capacité thermique du sol étant de 3 à 5 fois plus faible que celle de l'eau le gradient thermique était beaucoup mieux marqué et donc mesuré. Enfin la part de S dans le bilan était moindre.

II - C - 5 - b - Le dispositif de commande du profil de température.

La direction T_{eau} est partagée par trois étages de relais R_1, R_2, R_3 en 3 directions, chacune reliée dans l'ordre aux 8 sondes du profil. Les étages de relais (ouvert = O, fermé = I) sont commandés par l'intermédiaire des 4 câbles du câble "commandes et servitudes" en 12 V continu (1 neutre négatif et 3 commandes positives), par un programme à 3 cames C_1, C_2, C_3 , ouvrant ou fermant 3 interrupteurs (O=interrupteur ouvert, I interrupteur fermé) selon le schéma suivant. Le programme effectue un cycle en une demi-heure.

Fonctionnement des cames en régime normal.

0	T/8	T/4	3T/8	T/2	5T/8	3T/4	7T/8	T	T=30 minutes
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
O	O	O	O	I	I	I	I	I	- relais R _I ou came C _I
O	O	I	I	O	O	I	I	I	- relais R ₂ ou came C ₂
O	I	O	I	O	I	O	I	I	- relais R ₃ ou came C ₃

T _I	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	:	- niveau des sondes
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
=====									

Le programme permet donc à chacun des 8 niveaux de profil de température d'être tout à tour injecté par T_{eau} dans l'enregistreur Speedomax pendant $\frac{30}{8}$ minutes. Afin de donner une meilleure souplesse au dispositif, nous avons introduit 3 interrupteurs B₁, B₂, B₃, sur les 3 circuits de relais, les ouvrant (O), ou les fermant (I), ainsi que 3 autres interrupteurs A₁, A₂, A₃, en parallèles sur les interrupteurs commandés par les cames C₁, C₂, C₃, qu'ils court-circuitent (I) ou laissent libres (O) d'ouvrir ou fermer les 3 circuits de relais. Nous avons regroupé dans un tableau les différentes combinaisons de A₁, A₂, A₃, B₁, B₂, B₃, conduisant à des cycles distincts des 8 niveaux T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆, T₇, T₈, durant le même pas de temps de $\frac{1}{2}$ heure.

Position des Interrupteurs

Cycle résultant

Position des Interrupteurs						Cycle résultant							
A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	0 30							
O	O	O	I	I	I	I	2	3	4	5	6	7	8
O	O	O	O	I	I	I	2	3	4	I	2	3	4
I	O	O	I	I	I	5	6	7	8	5	6	7	8
O	O	O	O	O	I	I	2	I	2	I	2	I	2
O	I	O	O	I	I	3	4	3	4	3	4	3	4
I	O	O	I	O	I	5	6	5	6	5	6	5	6
I	I	O	I	I	I	7	8	7	8	7	8	7	8
O	O	O	O	O	I	I	2	I	2	5	6	5	6
O	I	O	I	I	I	3	4	3	4	7	8	7	8
O	O	O	I	I	O	I	I	3	3	5	5	7	7
O	O	I	I	I	I	2	2	4	4	6	6	8	8
O	O	O	O	I	O	I	I	3	3	I	I	3	3
O	O	I	O	I	I	2	2	4	4	2	2	4	4
I	O	O	I	I	O	5	5	7	7	5	5	7	7
I	O	I	I	I	I	6	6	8	8	6	6	8	8
O	O	I	I	O	I	I	I	I	I	5	5	5	5
O	O	I	I	O	I	2	2	2	2	6	6	6	6
O	I	O	I	I	O	3	3	3	3	7	7	7	7
O	I	I	I	I	I	4	4	4	4	8	8	8	8
O	O	O	O	O	O	I	I	I	I	I	I	I	I
O	O	O	O	O	I	2	2	2	2	2	2	2	2
O	I	O	O	I	O	3	3	3	3	3	3	3	3
O	I	I	O	I	I	4	4	4	4	4	4	4	4
I	O	O	I	O	O	5	5	5	5	5	5	5	5
I	O	I	I	O	I	6	6	6	6	6	6	6	6
I	I	O	I	I	O	7	7	7	7	7	7	7	7
I	I	I	I	I	I	8	8	8	8	8	8	8	8

Ce programme comporté également une came qui à chaque fin de cycles ferme un relais R_T. Ce relais R_T court-circuite toutes les I/2 heures certaines directions des enregistreurs, inscrivant ainsi des tops simultanés sur les deux diagrammes, permettant de définir des pas de temps correspondants sur les différents enregistreurs.

II-C-5-c- Evaluation du stock thermique du lac

Nous avons déjà vu qu'il était très délicat de mesurer le flux de chaleur pénétrant ponctuellement l'eau du lac.

La solution de la mesure directe du flux par des fluxmètres ne semble pas satisfaisante, car elle ne tient guère compte que des transmissions de chaleur par conduction, et peu ou pas du tout des transmissions par rayonnement et convection, qui ne sont pourtant pas négligeables. Ce qui ne permet donc pas de préciser la représentativité de la valeur mesurée.

La solution adoptée à Brazzaville de mesure d'un profil thermique ponctuel au sol est ici bien décevante. Dans l'eau, entre deux profils successifs, il est souvent délicat de déterminer de quel côté est passée la quantité de chaleur manquante, vers le haut ou vers le bas, ou pire si ce n'est encore des courants convectifs latéraux qui poussent à l'emplacement des mesures une masse d'eau à température différente, enlevant toute valeur à la méthode. Dans le meilleur des cas ce procédé est donc réservé aux journées sans vents, calmes, à bon ensoleillement, où la stratification thermique des eaux du lac est stable, avec un gradient assez important pour être mesuré avec précision.

A l'échelle de la journée la connaissance de S est relativement aisée, et de toutes façons sur 24 heures, S est d'un ordre de grandeur nettement plus petit que Q , le lac restituant à l'atmosphère pratiquement autant de calories qu'il en a amassé durant la journée.

Afin de suivre les variations de S dans la journée, il convient de quitter le stade ponctuel, et d'aborder le stock global du lac, c'est à dire de raisonner sur des moyennes.

On détermine donc un itinéraire inchangé sur le lac, que l'on parcourt toutes les demi-heures ou toutes les heures en zodiac, précédé d'un dispositif intégrant à une profondeur P les profils de températures du lac sur ce parcours. Le dispositif est constitué de n thermocouples, montés en série dont les soudures froides sont rassemblées dans une même enceinte calorifugée. Chacun de ces thermocouples concerne une tranche d'eau d'épaisseur P/n . Ils sont donc aux profondeurs $P/2, P/2n, (2n-1) P/2n$.

La d.d.p. V , obtenue aux bornes de la série de thermocouples, est donc la somme de chacune des ddp de chaque thermocouple.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

Mais si α est le coefficient d'étalonnage des thermocouples, et T_0 la température de la soudure de référence :

$$V_1 = \alpha (T_1 - T_0), V_2 = \alpha (T_2 - T_0), \dots, V_n = \alpha (T_n - T_0)$$

$$\text{d'où } V = \alpha (T_1 + T_2 + \dots + T_n) - n \cdot \alpha T_0 = n \alpha \left(\frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{n} - T_0 \right)$$

où l'on voit bien apparaître la température moyenne $T_m = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{n}$ de la tranche d'eau d'épaisseur p .

On obtient donc ainsi pour un parcours et un instant donnés, une valeur représentative de la température moyenne T_m de la couche d'eau de profondeur p . Il convient de choisir la profondeur p assez grande pour que la température des couches d'eau plus profonde demeure constante, au moins à l'échelle de la journée.

Si V_m est la d.d.p. moyenne aux bornes de la série de thermocouples lors de ce parcours, T_{mo} la température moyenne de l'enceinte froide de référence et $A = n \cdot \alpha$ le coefficient d'étalonnage du dispositif à thermocouples, il vient :

$$V_m = A (T_m - T_{mo})$$

Le stock calorifique S de l'eau du lac peut s'écrire par unité de surface : $S = C \cdot p \cdot T_m$ où C est la capacité calorifique volumique de l'eau.

Si l'on compare les résultats de deux parcours, indicés (') et ("), il vient :

$$V'_m = A (T'_m - T'_{mo})$$

$$V''_m = A (T''_m - T''_{mo})$$

$$\text{soit } T''_m - T'_m = \frac{V''_m - V'_m}{A} + T''_{mo} - T'_{mo}$$

la variation ΔS du stock calorifique entre les états (') et (") est donc :

$$\Delta S = C \cdot p \cdot (T''_m - T'_m) = \frac{C \cdot p}{A} (V''_m - V'_m) + C \cdot p (T''_{mo} - T'_{mo})$$

Cette méthode permet donc une évaluation relativement précise du flux de chaleur S transmis à l'eau du lac.

II - C - Câblage de l'enregistreur MECI-SPEEDOMAX

Sur le schéma de montage des thermocouples de mesure parviennent à l'enregistrement par le câble "mesures" les câbles suivants :

- Commun - en provenance de la soudure froide de l'enceinte immergée
- T_s
 T_w) en provenance des sondes du niveau supérieur
- T_{surf} en provenance de la sonde température de surface
- T_{eau} en provenance des 3 étages de relais
- T_{ref} en provenance de l'enceinte de référence.



- ΔT_s)
- ΔT_w) - en provenance des sondes du niveau inférieur

L'enregistreur comporte 12 entrées, groupées deux par deux, (+ et -) correspondant aux 6 directions, notées I + , I - ; à 6+, 6-

Le tableau de câblage est alors :

Directions	+	-
I	Commun	T_s
2	ΔT_s	T_s
3	Commun	T_{eau}
4	Commun	T_w
5	ΔT_w	T_w
6	Commun	Inverseur TEST T_{surf} ou T_{ref}

La borne 6 - est mise en communication, par l'inverseur TEST avec T_{surf} ou T_{ref} au choix.

De plus les bornes 6- et 6+ ainsi que 2 -et 2+ sont reliées aux bornes R_T qui les court-circuite chaque $\frac{1}{2}$ heure en début et fin de pas de temps.

L'enregistreur Speedomax comporte 2 parties P_I et P_2 disposant chacune d'un sélecteur de gamme propre, ainsi que d'un dispositif de déplacement du zéro indépendant et réglable en continu. Les directions I-2-3-6 sont sur P_I , elles concernent des températures relatives. Commutée sur la gamme 2 m V, P_I permet l'enregistrement de 50°C sur toute l'échelle. L'inverseur TEST étant en position T_{surf} , Il suffit de faire correspondre la température lue sur le diagramme pour la direction 6 par l'intermédiaire du réglage de déplacement du zéro, avec celle relevée dans l'enceinte de référence sur un thermomètre à mercure ordinaire, pour que, de ce fait les directions, I-3-4-6- fournissent des températures diagrammes correctés pour T_s , T_{eau} , T_w , et T_{surf} .

Ce réglage sera bon tant que la température de l'enceinte de la soudure froide commune, immergée du fond du lac, n'aura pas variée, Aussi est-il bon de faire plusieurs tests de vérification chaque jour. Lorsque le relais R_T court-circuite la direction 6, cette dernière marque 0 mV, ce qui avec le décalage du zéro introduit par le réglage TEST, correspond en fait sur le diagramme à la température de la soudure commune froide de référence. Cette astuce permet le réglage global de toutes les températures, ainsi que la connaissance de toutes les températures utiles. Mais le fait de court-circuiter 6+ et 6- a un effet secondaire, en effet la température de soudure froide correspondant à T_s , T_w , T_{eau} est alors la moyenne des températures de la soudure froide de l'enceinte immergée, et de la température de surface T_{surf} (voir schéma de câblage).

Ce qui n'est pas un inconvénient, vu la brièveté du court-circuit, et visualise au contraire par un décalage de T_s , T_w et T_{eau} , les limites du pas de temps.

Les directions 2 et 5 sont pour leur part branchées sur P_2 dans la gamme I ou 2 mV. Leur zéro est réglé à 20 ou 40% du diagramme à partir de la gauche, à la position optimum pour qu'il n'y ait pas de débordement du diagramme pour les ΔT positifs, ou pour les ΔT négatifs, ni mélange des pointés correspondant aux directions 1-3-4-6- et 2-5.

Le relais R_T court-circuite également la direction 2 ce qui permet de visualiser le zéro des ΔT_s et ΔT_w . Ainsi sont réunis sur un seul diagramme les enregistrements de grandeurs permettant l'évaluation de :

- La température sèche et humide aux deux niveaux, donc de la pression de vapeur correspondante.
- La température de surface de l'eau, et la tension de vapeur saturante lui correspondant.
- Les températures de l'eau sur tout un profil, et donc une estimation de la quantité de chaleur S cédée à l'eau, avec les réserves mentionnées précédemment.

Nous nous devons ici d'insister sur le fait que ces mesures portant sur quelques dizaines de mV ne sont rendues possibles que par utilisation d'enregistreurs potentiométriques, dont les mesures de zéro nous affranchissent des pertes de potentiel dues au câble dans des appareils galvanométriques.

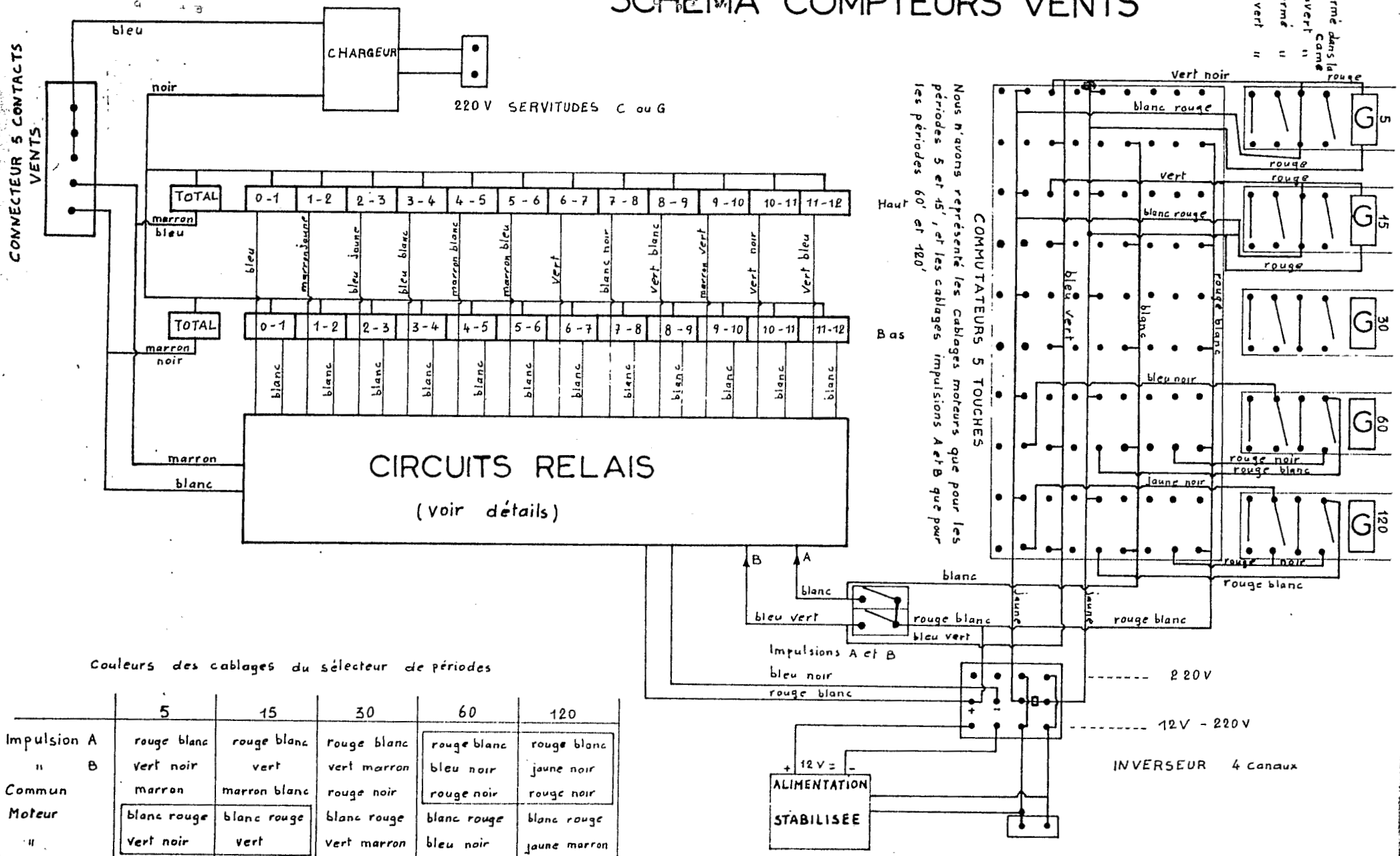
II - D - La mesure du Vent.

Nous disposons à chacun des deux niveaux d'un anémomètre sensible CASELLA. Le principe de ces anémomètres à 3 coupelles est le suivant : une lampe émet un rayon lumineux qui est occulté par un disque, muni d'une étroite fente, fixé à la hampe tournante de l'anémomètre. Lorsque la fente le permet le rayon lumineux éclaire une cellule photo-électrique. Les frottements sont donc réduits ainsi à leur plus simple expression. Les tops électriques fournis par la cellule photo-électrique sont ensuite amplifiés et mis en forme de façon à entraîner un compteur d'impulsion. Dans notre installation l'intensité des ces tops, même amplifiée, n'était pas suffisante pour leur faire franchir les 250 m du câble de liaison immergé, que nous nommerons câble "vents" ; de plus des effets de selfs parasites sur ces 250 m de câbles multipliaient les tops. Aussi utilisons nous ces impulsions pour fermer un micro-relais qui commande ensuite un circuit attaquant les compte-tours.

L'extrême fragilité des circuits électroniques de comptage et d'amplification, exige sur le bati une alimentation continue de 12 volts extrême stable, qui ne peut être assurée en fait que par une alimentation stabilisée assez élaborée.

Afin de libérer l'observateur de la tâche fastidieuse de noter au début et à la fin de chaque pas de temps le nombre de tours d'anémomètre nous avons réalisé un dispositif original permettant de répartir automatiquement sur 12 compteurs de tops, les vents correspondant à 12 pas de temps successifs, avec retour automatique au 1er compteur au 13ème pas de temps. Le dispositif fonctionne au choix avec 5 périodes sélectionnables de 5, 15, 30, 60 et 120 minutes synchronisées avec les pas de temps des enregistreurs. La fidélité de ces périodes est assurée par des moteurs synchrones, et est donc égale à la fidélité de la fréquence alimentant l'appareil. Afin d'augmenter la précision et la reproductibilité des différents pas de temps nous avons créé un dispositif à relais dans le schéma suit.

SCHEMA COMPTEURS VENTS



Couleurs des cablages du sélecteur de périodes

	5	15	30	60	120
Impulsion A	rouge blanc	rouge blanc	rouge blanc	rouge blanc	rouge blanc
" B	vert noir	vert	vert marron	bleu noir	jaune noir
Commun	marron	marron blanc	rouge noir	rouge noir	rouge noir
Moteur	blanc rouge	blanc rouge	blanc rouge	blanc rouge	blanc rouge
"	vert noir	vert	vert marron	bleu noir	jaune marron

Les cablages encadrés sont représentés sur le schéma suivant

Les impulsions, sont envoyées d'un compteur à l'autre par l'intermédiaire de relais en cascades, qui basculant les uns après les autres à la fin de chaque période T.

L'ordre A de basculement de ces relais est produit par un interrupteur actionné par la minuterie du bout du temps T. Cette impulsion A doit transiter par un autre relais qui devra être fermé par un ordre B préalable. Cet ordre B est également donné par la minuterie avant l'ordre A, et ne doit pas être simultané.

Lorsque tous les relais ont été fermés, un nouvel ordre A a pour effet de les rouvrir et de repasser ainsi au compteur I. Deux interrupteurs A' et B' en parallèle sur les interrupteurs A et B de la minuterie permettant de faire sauter l'impulsion d'un compteur à l'autre, pour une remise à l'heure par exemple. Le choix de l'une des 5 périodes possibles se fait par un commutateur à 5 touches. Un dispositif spécial permet de plus que les diverses minuteries soient toujours stoppées en début de cycle.

L'ensemble du dispositif qui ne comporte pas moins de 65 relais est composé de micro-relais, montés sur 4 circuits imprimés. Les minuteries sont alimentées en 220 V -50 Hz, le dispositif de relais, et l'alimentation des compteurs sur deux circuits 12 V continus indépendants composés pour l'un d'une alimentation stabilisée pour l'autre d'un chargeur de batterie. Tel quel, le système est très fiable, et nous a donné toutes satisfactions. Il est évidemment essentiel de faire correspondre les passages d'un compteur à l'autre avec les pas de temps des différents diagrammes.

III - Dépouillements des diagrammes

III - A - Rayonnements

Les dépouillements consistent à attribuer, pour chaque pas de temps, une valeur moyenne à $Q, R_G, R_d,$ et aR_G . Ce dépouillement est fait avec 3 chiffres significatifs et exprimé en I/IO mV plus. Ces mV seront ensuite transformés en mV/cm² d'après l'étalonnage des différents appareils de mesure. Si Q est négatif on ne garde que deux chiffres significatifs précédés de -.

III - B - Températures

On attribue également ici une valeur moyenne pour le pas de temps aux diverses températures. T_s, T_w, T_{surf} , sont lues au I/IO de degré, ΔT_s et ΔT_w lues au I/IO de degré, précédées du signe + ou - .

III - C - Flux calorifique dans l'ég

Le cas du flux calorifique est traité à part. Dans l'état actuel d'avancement de nos appareillages, il n'est pas possible de traiter automatiquement le calcul du flux sur chaque pas de temps. Nous préférons reporter sur une carte perforée journalière les diverses valeurs du flux de la journée, après évaluation manuelle.

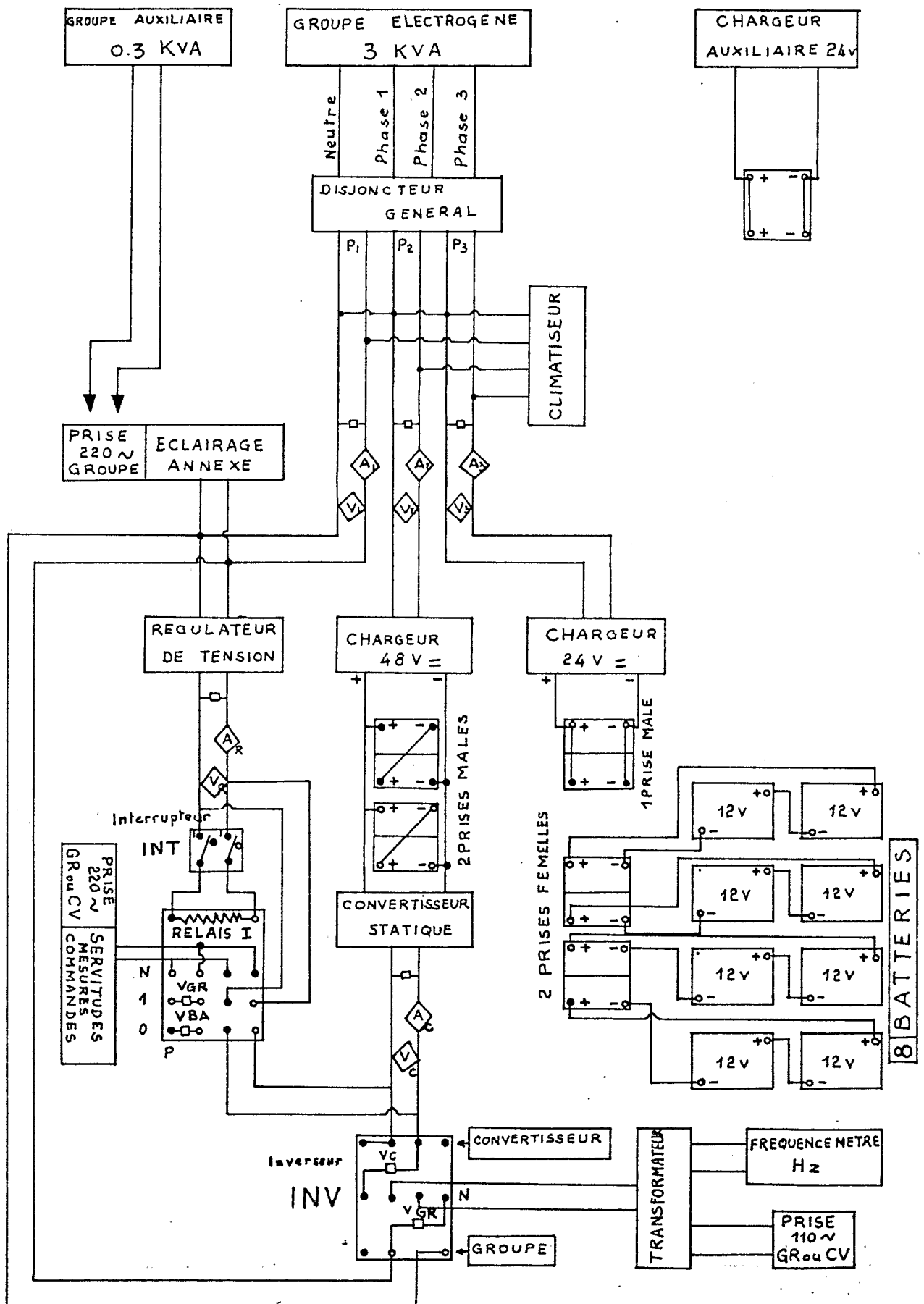
III - Codification des données de dépouillement

Ces valeurs moyennes, brutes de dépouillements, directement inscrites sur les diagrammes, face aux pas de temps correspondant, sont ensuite reportées sur des feuilles à 80 colonnes afin d'être perforées sur des cartes classiques, dont le dessin est le suivant, chaque carte regroupant tous les renseignements fournis par 2 pas de temps :

- colonnes I à 4 : Date : jours et mois
- colonnes 5 à 8 : Heure: heures et minutes
- colonnes 9 à 11 : T_s en I/IO de °C sans virgule - 3 chiffres
- colonnes 12 à 14 : T_w en " " " " "
- colonnes 15 à 17 : T_{surf} " " " " "
- colonnes 18 à 20 : ΔT_s en I/IO de °C sans virgule - 2 chiffres précédés du signe + ou -
- colonnes 21 à 23 : ΔT_w en " " " " " " " " "
- colonnes 24 à 26 : R_G en I/IO de mV - 3 chiffres
- colonnes 27 à 29 : R_d en I/IO de mV - 3 chiffres
- colonnes 30 à 32 : Q en I/IO - 3 chiffres pour la journée et 2 chiffres pour la nuit précédés du signe, -
- colonnes 33 à 35 : $a.R_G$ en I/IO mV - 3 chiffres
- colonnes 36 à 38 : Moyenne de la vitesse du vent au niveau supérieur durant le pas de temps en I/IO de m/s
- colonnes 39 à 41 : idem au niveau inférieur
- colonnes 42 à 78 : même chose que colonne 5 à 41
- colonnes 79 à 80 : numéro de carte dans le jour.

Ces cartes assorties de cartes d'étalonnage pour R_G , R_d , Q, et aR_G supportent toutes l'information nécessaire au calcul de l'évaporation par l'une quelconque des méthodes énoncées précédemment. A raison de 25 cartes par jour cela représente 9 125 cartes/an.

SCHEMA GENERAL DE L'EQUIPEMENT ELECTRIQUE



IV - Dispositif autonome d'alimentation

Ne disposant pas de l'électricité du secteur à Kongoussi, à proximité de nos installations, nous avons dû créer une alimentation autonome à partir d'un groupe triphasé Bernard de 3 KVA qui en montage étoile débite 220 V entre le neutre et chaque phase. L'une des phases alimente l'éclairage et les servitudes annexes ainsi que, par l'intermédiaire d'un régulateur de tension de 750 V A, la totalité des appareils de mesures, d'enregistrement et les servitudes du dispositif de mesure de l'évaporation durant le fonctionnement du groupe.

La deuxième phase alimente un chargeur de batterie capable de délivrer une tension de 48 V sous 10 A. Il est branché, parallèlement aux batteries en charge sur un convertisseur statique de 500 V. A, qui en cas d'arrêt du groupe, alimente automatiquement, par retour au repos d'un relais quadripole, les servitudes du dispositif de mesure de l'évaporation. La troisième phase alimente un autre chargeur de batterie délivrant une tension de 24 V sous 20 A.

Des dispositifs annexes permettent à tout moment de connaître le voltage et l'intensité de chaque phase, des circuits "régulateur de tension" et "convertisseur" ainsi que la fréquence du courant "groupe" ou "convertisseur".

Un interrupteur permet de passer du fonctionnement sur le groupe au fonctionnement sur batteries. Ces batteries sont au nombre de 8, chacune d'une capacité de 30 A. Heures et de 12 V. Elles sont groupées en série de 2 par 2, et peuvent être, grâce à des prises particulières, chargées en série sous 48 V par le premier chargeur ou en parallèles sous 24 V par le second chargeur. Elles peuvent alimenter en totalité le convertisseur statique, représentant une capacité de 150 A. Heures sous 48 V. ce qui avec une consommation moyenne de 8 A donne 20 heures d'autonomie à l'ensemble.

La capacité des chargeurs de batteries, fonctionnant simultanément est telle qu'il suffit de 10 heures de fonctionnement journalier du groupe, la totalité de l'installation fonctionnant sur batterie le reste du temps. Enfin la chaleur humide du climat et l'humidité de la saison des pluies ainsi d'ailleurs que la chaleur dégagée par les différents appareils nous ont conduits à équiper l'installation d'un climatiseur triphasé d'un CV qui ne marche malheureusement au même temps que le groupe électrogène. Un groupe auxiliaire de 0,3 KVA peut alimenter l'essentiel des appareils de mesures, d'enregistrement et leurs servitudes, en cas de panne du groupe principal.

De même un petit chargeur de batterie auxiliaire permet de suppléer à une défaillance passagère des appareils principaux.