

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

**PROJET
DE
FIN D'ÉTUDES**

Sm 0392

Titre IMPLANTATION D'UNE STATION MÉTÉO-
-ROLOGIQUE A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE
THIÈS

Auteur Moustapha NIANG

Génie CIVIL

Date JUIN 1983

Ecole Polytechnique de Thiès

Projet de fin d'études

Titre : " Implantation d'une station
météorologique à l'Ecole Polytech-
nique de Thiès "

Auteur: Moustapha NIANG

5^{eme} Année , Génie Civil

Directeur de projet: Mr Christian
ROUSSEAU,

professeur

Soumis le : 16 Mai 1983

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon Directeur de Projet Mr Christian ROUSSEAU professeur à l'École Polytechnique de Thiès de sa disponibilité et de ses suggestions pertinentes qui m'ont permis de mener le projet dans les meilleures conditions.

Je remercie également Mr PISTOREZI de l'ASECNA et MM. Bamar DIAGNE, Omar SALL et Ndéné NDIAYE tous à la Direction de la Météorologie Nationale pour la documentation qu'ils ont mise à ma disposition.

Mes remerciements vont aussi aux élèves-ingénieurs Issa DIAGNE, ALIOU MARA et Mar THIAM pour leur aide matérielle.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont participé directement ou indirectement à la réalisation de ce projet.

SOMMAIRE

L'étude menée ici est une recherche bibliographique sur l'évaluation de la méthodologie de mesures météorologiques à travers le monde en comparaison avec ce qui se fait au Sénégal. L'analyse qualitative et quantitative du réseau météorologique sénégalais nous permet de mieux cerner l'utilité des mesures en météorologie. Il s'agit en fin d'identifier les besoins de l'E.P.T pour l'implantation d'une station météorologique dont la pertinence dépend de l'orientation donnée à ladite station.

AVANT-PROPOS

Le projet n'est pas une étude de mesures météorologiques encore moins une étude servant à la prévision du temps qu'il ne faut pas confondre avec météorologie. Toutefois, il est indispensable de parler de certaines mesures météorologiques qui, *a priori*, abourdissent le texte. Mais il n'en est rien, car l'étude d'une station météorologique l'exige.

Il faudrait souligner, en outre, que ce n'est pas une sélection et que rien n'est dit sur la théorie des ondes atmosphériques, des théorèmes de la circulation et des techniques employées pour la prévision numérique du temps à cause de leur complexité d'une part et d'autre part des limites du projet centré sur la micrométéorologie.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|------|
| Remerciements | i) |
| Sommaire | ii) |
| Avant - Propos | iii) |
| Introduction | 1 |
| Chapitre Premier La Pression atmosphérique | 3 |
| 1.1 Unités de pression atmosphérique | 3 |
| 1.2 Différents types de baromètres | 4 |
| 1.2.1 Baromètres à mercure | 4 |
| 1.2.2 Baromètres anéroïdes | 6 |
| Chapitre II Mesure de la précipitation | 8 |
| 2.1 Mesure de la précipitation | 8 |
| 2.1.1 Principales causes d'erreurs | 9 |
| 2.1.2 Types de pluviomètres | 9 |
| Chapitre III La température | 13 |
| 3.1 Unités de mesure | 13 |
| 3.2 Exposition et emplacement | 14 |
| 3.3 Types de thermomètres | 14 |
| 3.3.1 Thermomètres à liquide | 14 |
| 3.3.2 Thermographes | 15 |
| 3.4 Causes d'erreurs | 16 |

| | | |
|----------------------|--|----|
| Chapitre <u>IV</u> | Humidité atmosphérique et du sol | |
| 4.1 | Instruments de mesure | 18 |
| 4.1.1 | Psychromètre simple | 18 |
| 4.1.2 | Psychromètre à ventilation artificielle | 18 |
| 4.1.3 | Causes d'erreurs en psychrométrie | 19 |
| 4.2 | Formules et tables psychrométriques | 19 |
| 4.3 | Hygromètre et hygrographe | 20 |
| 4.4 | Humidité du sol | 21 |
| 4.4.1 | Technique d'évaluation de l'humidité | 21 |
| Chapitre <u>V</u> | Mesure du vent au sol | 24 |
| 5.1 | Instruments de mesure | 24 |
| 5.1.1 | Anémomètres à rotation | 25 |
| 5.1.2 | Anémomètres à pression ou anémomètre de Dine | 26 |
| 5.1.3 | girouettes | 27 |
| 5.2 | Estimation de la vitesse du vent | 28 |
| Chapitre <u>VI</u> | Evaporation - Transpiration | 30 |
| 6.1 | Facteurs influençant la mesure | 31 |
| 6.2 | Instruments de mesure | 31 |
| 6.2.1 | Aéromètres | 31 |
| 6.2.2 | Bacs d'évaporation | 32 |
| 6.3 | Evapotranspiromètre | 34 |
| 6.4 | Formules empiriques | 34 |
| Chapitre <u>VII</u> | Rayonnement et insolation | 37 |
| 7.1 | Mesures de rayonnement | 37 |
| 7.1.1 | Rayonnement solaire direct | 37 |
| 7.1.2 | Rayonnement solaire global et diffusé | 39 |
| 7.2 | Mesure de l'albédo | 40 |
| 7.3 | Rayonnement total | 41 |
| Chapitre <u>VIII</u> | Etude du réseau météorologique | |
| | sénégalais | 44 |

| | | |
|------------------------------|---|----|
| 8.1 | Stations météorologiques d'observations | 44 |
| 8.1.1 | Types de stations | 44 |
| 8.1.2 | Réseau de stations d'observations | 45 |
| 8.1.3 | Emplacement des stations d'observations météorologiques | 46 |
| 8.2 | Observations météorologiques | 46 |
| 8.2.1 | Éléments à observer | 47 |
| 8.2.2 | Heures des observations | 48 |
| 8.3 | Collecte des données météorologiques | 48 |
| 8.3.1 | Collecte des données | 49 |
| 8.3.2 | Traitement statistique des données collectées | 49 |
| 8.3.3 | Organismes de collecte de données | 50 |
| Chapitre IX | Evaluation des besoins météorologiques et coût de la station | 52 |
| 9.1 | Besoins météorologiques | 52 |
| 9.2 | Coût de la station | 55 |
| Conclusion - Recommandations | | 58 |
| Annexes | | 60 |
| A. | Tables psychrométriques | 61 |
| B. | Type de Pyrradiomètre | 64 |
| C. | Réseau météorologique sénégalais | 65 |
| D. | Tableau de relevées météorologiques | - |
| Bibliographie. | | 66 |

INTRODUCTION

La météorologie ou science de l'atmosphère a connu un développement grâce aux progrès des techniques de base et des techniques d'exploration. En effet, de l'invention du baromètre par Torricelli en 1643, au lancement des premiers satellites météorologiques en 1960, l'humanité a fait un grand pas en matière de recherches météorologiques. L'avènement des satellites, des ballons sondes et le perfectionnement des instruments de mesures permettent d'élaborer des prévisions en analysant scientifiquement les conditions atmosphériques d'une part et de faire une recherche approfondie sur l'utilité pratique des mesures météorologiques.

La recherche de moyens pour exploiter les potentialités de la nature requiert des mesures fondamentales comme la pression atmosphérique, les précipitations, l'humidité atmosphérique et du sol, le vent, l'évaporation et la transpiration, le rayonnement solaire et la durée de l'insolation.

Les mesures effectuées dans un réseau météorologique de densité suffisante permettront, à partir d'un échantillon représentatif, d'avoir une vision synoptique du temps et d'avoir une banque de données pour de longues séries de mesures fiables et régulières.

De par sa vocation, certaines mesures intéressent l'École Polytechnique de Thiès (E.P.T) et la question de l'implantation d'une station météorologique est posée.

Chapitre premier.

LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

La pression atmosphérique sur une surface donnée est la force qu'exerce l'atmosphère en raison de son poids par unité de surface ; elle est donc égale au poids de la colonne d'air qui surmonte cette surface rapporté à l'unité de surface horizontale.

Le météorologiste désire connaître la répartition spatiale de la pression atmosphérique en vue d'une analyse synoptique de l'étude des surfaces.

1.1 Unités de pression atmosphérique

L'unité de pression atmosphérique utilisée est le millibar.

$$1 \text{ mb} = 1000 \text{ dynes/cm}^2,$$

le dyne/cm^2 est l'unité C.G.S (centimètre, gramme, seconde) de pression.

Dans les conditions normales, une colonne de mercure d'une hauteur vraie de 760 mm exerce une pression de 1013,25 mb. Ainsi

$$1 \text{ mb} = 0,750062 \text{ mm Hg}^* \text{ normal}$$

$$1 \text{ mmHg normal} = 1,333224 \text{ mb}.$$

* Hg: mercure.

Le système impérial utilise le pouce (inch) de mesure normal

$$1 \text{ po} = 25,4 \text{ mm}$$

$$1 \text{ po Hg normal} = 33,8639 \text{ mb}$$

$$1 \text{ mb} = 0,029530 \text{ po Hg normal}$$

1.2 Différents types de baromètres.

De façon générale deux (2) types de baromètres sont utilisés: les baromètres à mercure pour les observations synoptiques et les baromètres anéroïdes pour les enregistrements

1.2.1 Baromètres à mercure.

Le baromètre à mercure est utilisé dans les stations terrestres. Le principe de base est que la pression atmosphérique, identique à toute surface d'un liquide au repos, s'équilibre avec le poids de la colonne de mercure.

La connaissance de ρ , g et h donne la mesure absolue de la pression atmosphérique P .

$$P = \rho g h$$

ρ : densité du mercure

g : accélération de la pesanteur au lieu de mesure

h : hauteur de la colonne de mercure.

Les baromètres de station devraient être étalonnés ou vérifiés par comparaison à d'autres baromètres étalons aux niveaux régional, national et international.

Emplacement et manipulation

L'emplacement des baromètres devrait être choisi avec soin: température uniforme, bon éclairage, monture verticale et solide. L'appareil devrait aussi être protégé des rayons solaires.

La manipulation de l'appareil exige minutie et

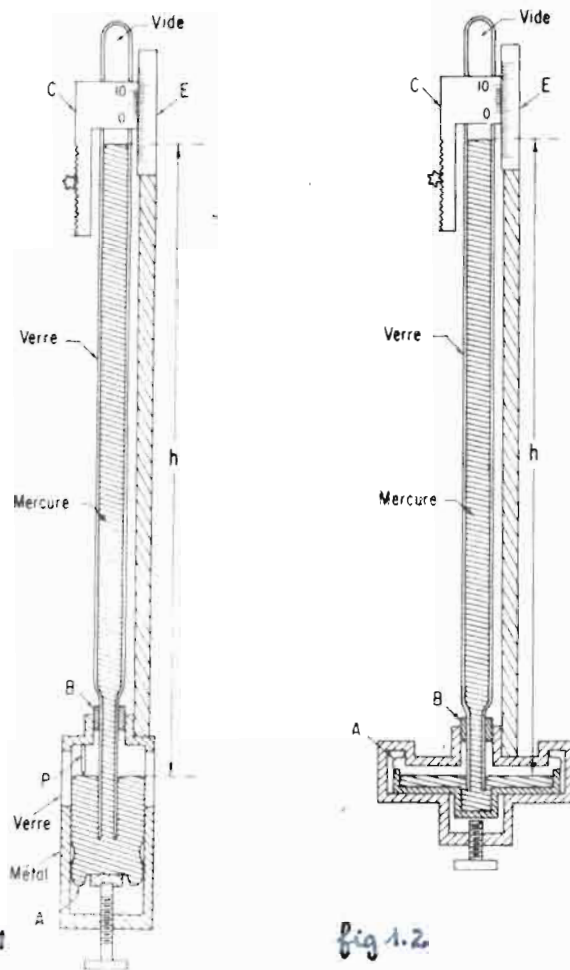


fig. 1.1

fig. 1.2

Fig. 1.1 Schéma d'un baromètre à fond mobile (type FORTIN).

Le fond de la cuvette est constitué par la membrane très souple A (peau de chamois en général), et les variations de la pression atmosphérique autres que ses fluctuations rapides sont transmises à cette cuvette à travers le joint poreux B. La vis inférieure permet, soit de remonter le mercure jusqu'au sommet du tube barométrique (tube de verre) en vue du transport de l'instrument, soit d'amener le mercure de la cuvette à être juste en contact avec la pointe P (en ivoire ou en substance synthétique) solidaire de la monture métallique, ce qui constitue le réglage préalable à toute mesure de la hauteur barométrique. La mesure proprement dite consiste à amener d'abord la partie antérieure du curseur C en contact optique avec la surface libre du mercure dans le tube (par la manœuvre d'un bouton à crémaillère), puis à lire la hauteur barométrique brute (non corrigée de la dilatation de la monture) indiquée par la graduation E gravée sur la monture, cela à l'aide d'un vernier fixé sur le curseur, et enfin à lire la température de l'instrument sur un petit thermomètre à mercure dont le réservoir est encastré dans la monture.

Fig. 1.2 Schéma d'un baromètre à fond fixe (type TONNELOT).

Autres dénominations : baromètre à échelle compensée, baromètre à large cuvette. Ici le fond de la cuvette est fixe lorsque l'instrument est en station, mais il peut néanmoins être déplacé verticalement par la manœuvre de la vis inférieure, ce qui permet, comme pour le baromètre à fond mobile (Fig. 7) de remonter le mercure jusqu'au sommet du tube en vue du transport de l'instrument (on a encore une membrane souple A et un joint poreux B). Les mesures s'effectuent comme pour le baromètre à fond mobile, avec cette différence qu'aucun réglage préalable n'est nécessaire. La lecture au vernier du curseur fournit une hauteur barométrique brute corrigée grâce au fait que la graduation E est « compensée » : chaque division de cette graduation est égale à l'unité de longueur réduite dans le rapport $S_1 / (S_1 + S_2)$, où S_1 est l'aire à 0 °C de la surface libre du mercure dans la cuvette (en projection horizontale), et S_2 celle de la surface libre dans le tube.

délicatesse.

Des corrections devraient être faites si les lectures sont effectuées à des heures et à des lieux différents.

Causes d'erreurs.

Les causes d'erreurs sont multiples.

- . effets du vent
- . incertitude relative de l'instrument
- . pression de la chambre barométrique supposée nulle

le

- . capillarité du mercure
- . instrument non vertical.

1.2.2 Baromètres anéroïdes.

Le baromètre anéroïde, portatif et pratique sur le terrain, est moins fidèle que le baromètre à mercure. Dans les stations terrestres, il est utilisé comme un enregistreur.

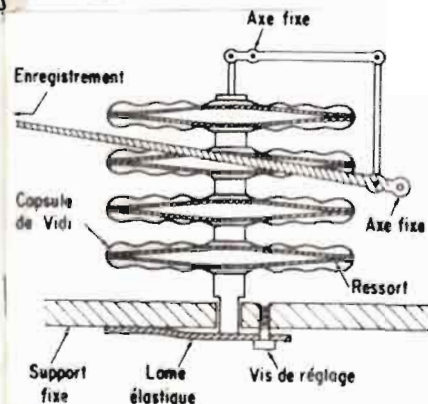


Fig. 1.3 Schéma d'un baromètre enregistreur anéroïde à ressorts internes.

Ce type de barographe est le plus courant. Il peut fournir la pression atmosphérique à quelques dixièmes de mb près si, comme c'est l'usage, ses données sont comparées à celles d'un baromètre à mercure à chaque observation synoptique, ce qui permet de compléter son enregistrement par une courbe de correction (donnant de façon continue la correction en fonction du temps). Ici les capsules et le support de base sont représentés en coupe, et la figure donne un exemple d'un enregistrement obtenu avec un tel instrument.

Le baromètre anéroïde est principalement constitué d'un organe sensible en métal (acier ou cuivre au glucinium) agissant comme un dynamomètre. À chaque pression il y a équilibre entre la pression atmosphérique et la force élastique de rappel du ressort. La sensibilité est fonction du nombre de capsules anéroïdes.

Emplacement et méthode d'observation

Comme pour le baromètre à mercure, les mêmes conditions d'exposition s'imposent aussi pour le baromètre anéroïde. Il est supposé que le baromètre anéroïde est

suffisamment compensé pour la température et qu'il n'a pas besoin d'être corrigé pour l'accélération de la pesanteur.

Causes d'erreurs.

Aux causes d'erreurs valables pour le baromètre à mercure s'ajoutent :

- . la compensation incomplète pour la température
- . et les erreurs d'élasticité.

La mesure de la pression revêt une importance particulière en météorologie. Aussi ne doit-elle pas être précise. C'est ainsi que les baromètres devraient être fréquemment vérifiés pour uniformiser la mesure.

Chapitre II

MESURE DE LA PRECIPITATION

Le terme « précipitations » englobe toutes les eaux météoriques tombant à la surface de la terre sous forme de neige, grésil, grêle et pluie. Seule cette dernière sera prise en compte à cause de la situation géographique du Sénégal.

La hauteur de pluie atteignant le sol pendant une période donnée est exprimée comme l'épaisseur, en mm, qu'elle couvrirait sur un sol horizontal s'il n'y avait pas de pertes par évaporation, écoulement ou infiltration.

Pour toute méthode de mesure de précipitations il faut un prélèvement qui soit vraiment représentatif de la chute sur la région à laquelle se réfèrent les mesures.

La hauteur des précipitations est, de préférence, exprimée en mm. Le pouce est aussi utilisé : 1 po = 25,4 mm.

2.1 Mesure de la précipitation.

Les paramètres météorologiques sont influencés par

l'environnement immédiat. Pour la recherche de valeurs réelles d'une région, toutes les précautions devraient être prises pour obtenir des mesures valables.

2.1.1 Principales causes d'erreurs.

Il faut toujours limiter les causes d'erreurs telles que :

- . Le rejaillissement de l'eau de l'instrument vers l'extérieur ou inversement. Pour cela il faut assurer une profondeur suffisante de la paroi verticale du récepteur ou placer le pluviomètre à une hauteur suffisante au dessus du sol pour standardiser la mesure.

- . L'évaporation de l'eau captée. L'utilisation de bouteilles de plastique ventilées et de film d'huile réduit l'évaporation de l'eau captée sous l'entonnoir. De même les pluviomètres, ayant un haut indice de réflexion ou plusieurs contenants concentriques restreignent les échanges de chaleur par l'air ou la radiation solaire.

- . Les pertes par mouillage de la surface. Avec le transvasement, ces pertes inévitables sont faibles de l'ordre de 0,75 mm.

- . L'horizontalité de la surface de captage.

- . Les effets du vent. Les pluviomètres interceptent moins d'eau à cause de la turbulence due à l'augmentation de la force du vent. L'emploi d'écrans protecteurs (Nipher ou Alter) et un choix judicieux du site d'emplacement minimisent l'effet du vent.

Pour minimiser les causes d'erreurs, les bureaux météorologiques recherchent des appareils standardisés.

2.1.2 Types de pluviomètres.

Il y a les pluviomètres enregistreurs et non enregis-

teurs.

Pluviomètres non enregistreurs

Un pluviomètre est un récipient, avec une ouverture supérieure, captant la pluie et qui a une surface bien déterminée (200 à 500 cm²). L'eau ainsi captée est mesurée à intervalles de temps bien déterminés. La hauteur en mm ou en ps sur la superficie de captage est alors calculée.

Soient x la hauteur d'eau tombée, S la surface réceptrice du pluviomètre, s la section d'un tube gradué et h la hauteur de la colonne d'eau dans ce tube; l'équivalence des volumes donne:

$$Sx = sh \text{ soit}$$

$$x = \frac{s}{S} \cdot h$$

Le pluviomètre « Association » est un exemple de pluviomètre non enregistreur. Il comprend :

- un seau en zinc où s'accumule la pluie; un entonnoir de même métal formant la surface réceptrice; et une bague circulaire limitant la surface réceptrice et ayant 200 cm² de surface.

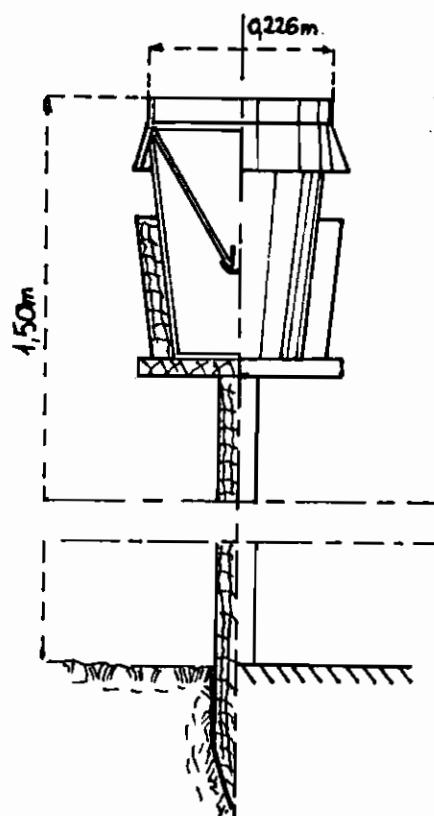


FIG. 2.1 Pluviomètre
« Association »

Pluviomètres enregistreurs

Dans certaines études il faut non seulement connaître la durée et la hauteur totale de la précipitation mais aussi son intensité exprimée en mm/h.

Les pluviomètres enregistreurs sont de trois (3) types.

- Les pluviomètres à augets basculeurs.

Les deux (2) augets basculent dans un sens ou dans un autre au fur et à mesure qu'ils sont remplis par l'eau captée dans l'entonnoir. Un style inscripteur se

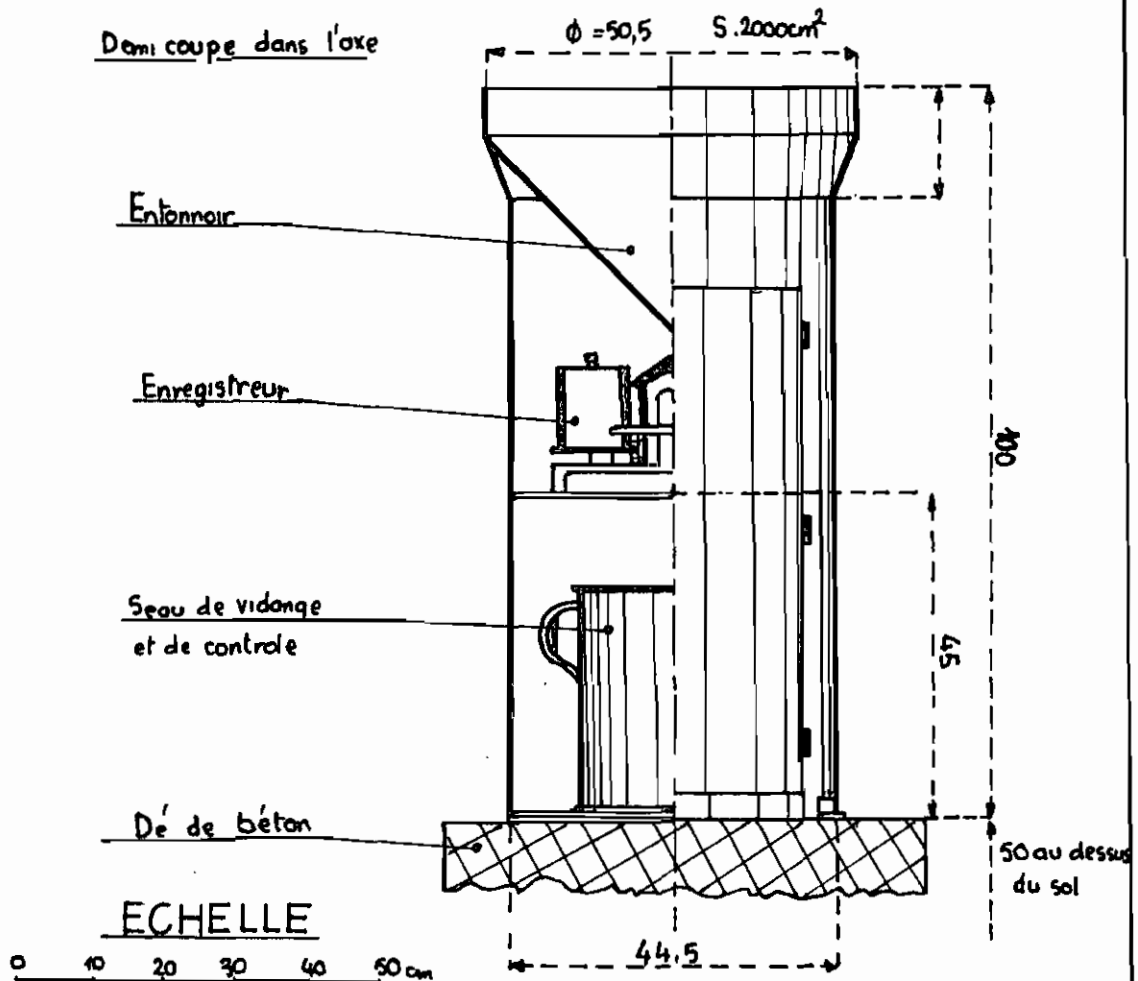


FIG 2.2 Pluviomètre R-208 A à augets basculeurs: ensemble

déplace devant un cylindre à axe vertical pour l'enregistrement journalier ou hebdomadaire. Lorsqu'un auget

bascule dans un sens, une partie de la pluie n'est pas enregistrée ; cette erreur peut être considérable si la pluie est de forte intensité.

- Les pluviomètres, à flotteurs.

Ils sont de deux (2) types. Dans le premier type l'eau recueillie est stockée dans la chambre où un flotteur enregistre le niveau de l'eau qui est évacuée par un siphon une fois la chambre pleine. Le second est un pluviomètre totalisateur où un flotteur ou un manomètre du type barboteur enregistre la variation de niveau.

- Les pluviomètres à pesée.

Le poids d'un récipient récepteur, plus la quantité de pluie recueillie depuis le début de la période des mesures, est enregistré continuellement soit à l'aide d'un mécanisme à ressort soit par un système de poids de balance. Le pluviomètre à pesée est principalement utilisé pour l'enregistrement de neige, grêle ou mélange neige - pluie.

Avec l'hétérogénéité spatiale des pluies, il faudra s'assurer d'une densité optimum du réseau pluviométrique pour couvrir une région représentative. De longues séries d'observation bien faites seront nécessaires pour établir des « corrélations statistiques » et les paramètres intervenant dans les calculs hydrologiques de l'ingénieur.

Chapitre III

LA TEMPERATURE

L'origine de la température vient de la notion de sensation qui nous fait dire qu'un corps est chaud ou froid si l'on le touche ou si l'on s'en approche. La température d'un corps est la condition qui détermine l'aptitude de celui-ci à communiquer ou à recevoir de la chaleur.

3.1 Unités de mesure.

Les échelles thermodynamiques absolue Kelvin et Celsius sont utilisées.

L'échelle thermodynamique absolue Kelvin est définie en donnant au point triple de l'eau pure la température de $273,15^\circ \text{K}$, considéré comme point fixe.

L'échelle thermodynamique Celsius est définie en fonction de la température thermodynamique absolue.

$$t^\circ \text{C} = T^\circ \text{K} - 273,15$$

L'échelle Fahrenheit de température est aussi utilisée. Le passage des échelles Fahrenheit à Celsius s'obtient par

$$t^\circ \text{C} = 5/9 (t^\circ \text{F} - 32).$$

3.2 Exposition et emplacement du thermomètre.

La protection du thermomètre contre le rayonnement du soleil, du ciel, de la terre et des objets environnants devrait être assurée; le thermomètre donnant une température sous les effets combinés des échanges par conduction et convection avec l'air environnant.

Dépendamment des conditions climatiques de nombreux types d'abris météorologiques sont utilisés. Néanmoins ces abris ont les mêmes caractéristiques: parois peu absorbantes et conduisant peu la chaleur; persiennes et plancher conçus pour arrêter et le rayonnement solaire et celui du sol; libre circulation de l'air et supports des instruments pour une hauteur convenable permettant l'accès facile pour les lectures.

Un sol diffusant peu la lumière solaire (gazon de préférence) devrait être utilisé pour l'installation de l'abri.

3.3 Types de thermomètres

3.3.1 Thermomètres à liquide.

Une élévation de température entraîne une augmentation de volume. C'est à partir de ce principe que sont utilisés les liquides en thermométrie. Le mercure et l'alcool sont les plus usités parce que couvrant largement le domaine météorologique de température.

Le thermomètre à minima, à toluène (ou à alcool) avec un index mobile circulant dans le capillaire, donne la plus basse température qu'il a subie.

Le thermomètre à maxima qui est un thermomètre à mercure avec son capillaire étranglé indique la tem-

température maximale atteinte.

3.3.2 Thermographes

Pour l'enregistrement, plusieurs types de thermographes sont employés dépendamment de la gamme de mesures requises.

Le thermographe à lame bimétallique: sous l'action d'une variation de température il y a variation de la courbure de la lame plane (circulaire ou en spirale) qui contrôle le mouvement du style inscripteur.

Le thermographe à tube Bourdon: l'organe sensible est un tube métallique aplati de section elliptique rem-

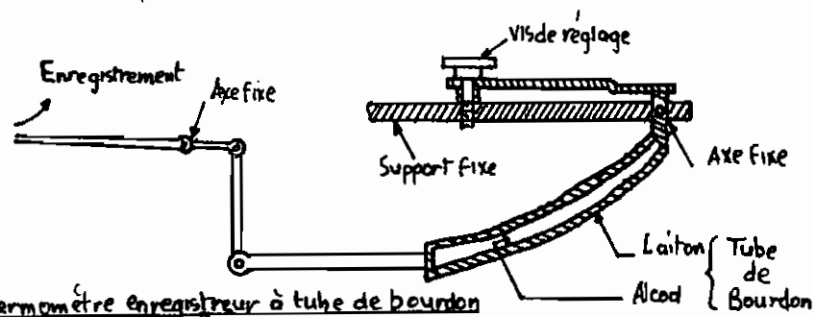


Fig 3.1 Schéma d'un thermomètre enregistreur à tube de Bourdon

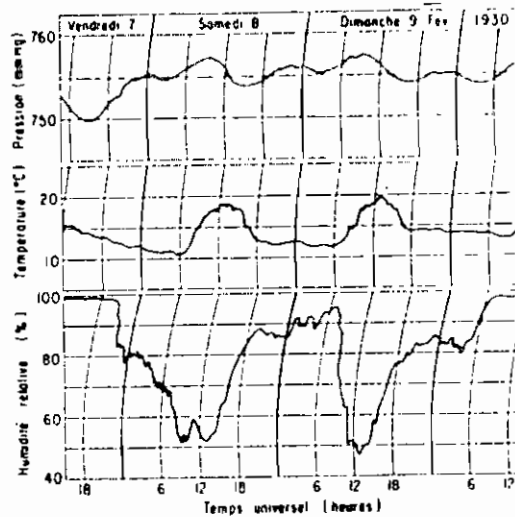


Fig. 5.2 Spécimens d'enregistrements des grandeurs d'état de l'air

Enregistrements fournis par les instruments de l'Observatoire d'Halong (baromètre anéroïde, thermomètre de Bourdon, hygromètre à cheveu). Conformément à ce qu'on observe souvent à peu près partout au cours d'une période de beau temps, des fluctuations lentes de la température pendant le jour (amplitude de l'ordre de 1°C) et de l'humidité relative pendant la nuit (amplitude de l'ordre de 1 à 2%) sont mises en évidence, et on note aussi l'absence de telles fluctuations sur le barogramme.

pli de liquide et hermétiquement fermé. Les variations de volume du liquide provoque la déformation mesurable du

tube

Le thermographe à mercure sous enveloppe métallique: c'est aussi un tube de Bourdon mais le thermomètre est un réservoir rempli de mercure à haute pression et relié au tube par un capillaire tubulaire d'acier. Le thermographe à mercure sous enveloppe métallique est probablement l'instrument le plus fiable et le plus résistant pour les mesures météorologiques.

Le thermographe électrique: il est à résistance électrique ou à couples thermoélectriques et utilisé à des fins aéronautiques ou recherches spatiales.

3.4 Causes d'erreurs.

Les défauts de calibrage, les effets de capillarité du liquide et les erreurs de parallaxe lors de la lecture sont les principales sources d'erreurs.

Les défauts de calibrage entraînant des écarts erratiques de linéarité peuvent être corrigés de même que le déplacement du zéro. L'effet de capillarité du tube est négligeable pour le mercure et important pour les liquides organiques. Pour réduire l'erreur de parallaxe il faut que l'observateur se place dans la position idéale.

L'étude de certains milieux requiert des mesures importantes de température. Grâce aux sondages aérologiques par ballon libre, la mesure de la température de l'air est, aujourd'hui, effectuée systématiquement jusqu'à une trentaine de kilomètres d'altitude. La mesure de la température est importante pour l'aéronautique ou pour les échanges de chaleur.

Chapitre IV

HUMIDITE ATMOSPHERIQUE ET DU SOL

L'air humide est un mélange de gaz parfaits : la vapeur d'eau et l'air sec. Pour définir ce mélange la masse de vapeur d'eau est rapportée à l'unité de masse d'air.

$$r = \frac{m_v}{m_d}$$

m_v : poids vapeur d'eau

m_d : poids air sec

Le rapport de mélange saturant (ou à saturation) r_w est celui mesuré au moment de la saturation

L'humidité relative f en pourcent est

$$f = r/r_w \cdot 100$$

r : rapport de mélange

r_w : rapport de mélange saturant.

D'autres grandeurs hygrométriques sont utilisées. En règle générale, les unités suivantes sont employées

| | |
|---------------------------|----------|
| e : tension de vapeur | mb |
| P_v : densité de vapeur | g/cm^3 |
| r : rapport de mélange | $g/kg.$ |
| f : humidité relative | % |

4.1 Instruments de mesure.

Pour les observations synoptiques le type d'instrument utilisé est le psychromètre. Le principe de mesure est basé sur le refroidissement produit par l'évaporation permanente de l'eau qui recouvre un thermomètre mouillé'.

4.1.1. Psychromètre simple.

Le psychromètre se compose de, deux thermomètres ; l'un normal, sec, indique la température de l'air T ; l'autre maintenu mouillé est alimenté en eau par une mèche de coton plongeant dans de l'eau pure ; il donne la température T_w .

Le psychromètre est d'usage courant dans les stations météorologiques. Les thermomètres sec et mouillé, placés dans un abri météorologique, sont lus simultanément.

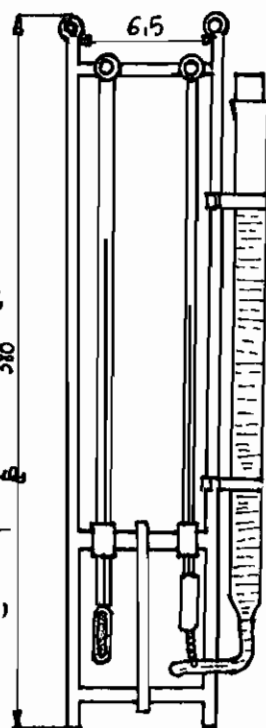


FIG 4.1 Psychromètre

4.1.2 Psychromètre à ventilation artificielle

Il y a les types à Assman et à aspiration pour abri.

Pour le psychromètre du type Assman il faut que

l'observation se face dans un emplacement dégagé et l'instrument devrait être protégé des intempéries.

Pour le psychromètre à aspiration il faut entre autres mesures assurer la ventilation des thermomètres et les protéger contre les effets du rayonnement; séparer les thermomètres par des conduits aménagés et effectuer les mesures à 1.50 m du sol.

Les psychromètres devraient être bien entretenus: mèche changée régulièrement; contrôle et remplacement de l'eau du réservoir.

4.1.3 Causes d'erreurs en Psychrométrie.

Aux basses températures les erreurs instrumentales du thermomètre entraînent des erreurs considérables en humidité.

Erreurs dues à la ventilation. Les calculs sont faits à une vitesse de 1 à 1.5 m/s. Les tables psychrométriques devraient être conformes aux exigences.

Erreurs dues à la saillure de l'eau ou à son impureté. Il faut éliminer les impuretés en lavant le thermomètre mouillé avec son manchon.

4.2. Formules et tables psychrométriques

La commission des instruments et des méthodes d'observation a reconnu la nécessité d'une formule psychrométrique basée sur la température thermodynamique du thermomètre mouillé.

En tenant compte des facteurs liés principalement au vent, les observations ont donné la formule psychrométrique empirique:

$$e = e_w - A_p (T - T_w)$$

e : tension de vapeur.

e_w : tension de vapeur saturante à la température T_w du thermomètre mouillé.

p : pression de l'air

T : température du thermomètre sec

T_w : température du thermomètre mouillé.

A : constante psychrométrique dépendant de la vitesse du vent.

| | | | | | |
|-------------------|-----|----|----|----|--------|
| V (m/s) | 0,2 | 1 | 2 | 3 | 4 à 10 |
| $A \cdot 10^{-3}$ | 100 | 78 | 72 | 68 | 64 |

Tableau 4.1: Constantes psychrométriques des thermomètres mouillés

Les tables psychrométriques sont données en Annexe.

4.3 Hygromètre et hygrographe.

L'hygrographe est utilisé au niveau du sol. Le principe de fonctionnement est basé sur la variation

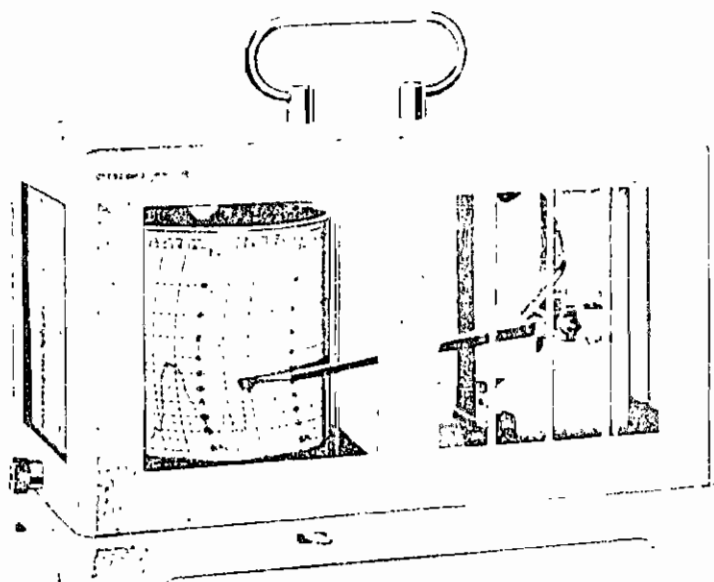


FIG 4.2 L'hygrographe

d'élasticité d'une mèche de cheveux dégraissés.

Son utilisation est généralement commode pour les périodes durant lesquelles les températures extrêmes et les humidités faibles ne se présentent que rarement.

Le cheveu présente une grande infidélité si l'on part d'une courbe d'étalonnage unique ; et le zéro de l'hygromètre est sujet à des changements dus aux cycles d'hystérésis régulières. L'hygromètre craint la saturation et devrait être conservé en atmosphère sèche.

4.4 Humidité du sol.

L'Organisation Météorologique Mondiale (O.M.M.) recommande que les mesures de la teneur en humidité du sol soient faites dans les stations de météorologie agricole. La technique d'évaluation de l'humidité dépend des pratiques agricoles en ce qui concerne les problèmes d'irrigation ainsi que les problèmes connexes.

4.4.1 Techniques d'évaluation de l'humidité

Le site d'observation ou d'échantillonnage devrait être étendu afin de faire beaucoup de prélèvements ayant un caractère représentatif.

Le choix de l'emplacement dépend du relief, du type de sol et de sa profondeur, de la nappe phréatique des obstacles et de la pratique culturale.

Pour les travaux agricoles quatre (4) méthodes sont recommandées pour l'évaluation de l'humidité

. La méthode gravimétrique: Des échantillons sont prélevés avec un cylindre d'échantillonnage. La

teneur en eau est, alors calculée. Dans les applications agricoles, la teneur en eau est convertie en mm d'eau disponible selon la formule :

$$w = 0,1 \times q \times h (U - h)$$

w : teneur en eau disponible mm

q : poids volumique du sol g/cm^3

h : épaisseur des échantillons de couche de sol cm

U : teneur en eau du sol (pourcent du poids sec)

h : point de flétrissement permanent

0,1 : facteur de conversion pour passer de l'humidité du sol (en pourcent) à la teneur en eau en mm.

La méthode par diffusion des neutrons : Elle est basée sur le fait que les neutrons rapides sont ralentis par collision avec les noyaux d'atomes d'hydrogène. Le comptage des neutrons lents près d'une zone de neutrons rapides fournit un moyen de déterminer la teneur en eau.

La méthode de la résistance électrique : Des résistances électriques sont enfouies dans le sol pour la mesure de l'humidité. Les résistances se mettent en équilibre hygrométrique avec le sol en suivant les variations d'humidité car la résistance varie en fonction du degré hygrométrique.

La méthode du tensiomètre : Le tensiomètre indique la pression de succion du sol (tension d'humidité ou potentiel matriciel). L'instrument est une bougie poreuse remplie d'eau et enterrée dans le sol. L'eau provoque une dépression qui est mesurée à l'aide d'un manomètre de Bourdon.

Les méthodes gravimétriques semblent convenir pour les observations effectuées dans les stations agrométéorologiques.

Dans les pays comme le Sénégal, l'ingénieur agronome aura à analyser les mesures d'humidité. Cela lui permettra de résoudre les problèmes d'irrigation ou de faire un choix judicieux des espèces végétales.

Chapitre V

MESURE DU VENT AU SOL

Le vent est une grandeur vectorielle tridimensionnelle variant de façon aléatoire dans le temps et dans l'espace. Pour la mesure du vent, seule la composante horizontale du mouvement de l'air, définie par la direction et la vitesse, sera prise en considération.

La direction du vent est, par définition, la direction d'où souffle le vent repérée dans le sens horaire à partir du nord géographique.

La vitesse du vent exprimée en m/s ou en nœud doit être la moyenne établie sur un intervalle de 10 minutes afin de minimiser les phénomènes de turbulence.

La hauteur de mesure sur terrain plat et découvert est de 10 m au dessus du sol.

5.1 Instrumentation de mesure du vent

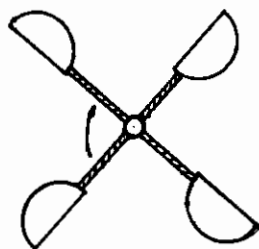
La détermination de la vitesse du vent se fait à l'aide d'anémomètres à coupes ou à pâles. Ils sont consti-

tués de deux (2) sous-ensembles : un dispositif rotatif ou moulinet et un générateur de signaux.

5.1.1. Anémomètres à rotation

La vitesse est déduite du mouvement de rotation d'un moulinet à coupelles mobile autour d'un axe vertical, ou d'une hélice maintenue orientée face au vent par le biais d'un montage en girouette. Cet ins-

4 coupelles hémisphériques



3 Coupelles coniques

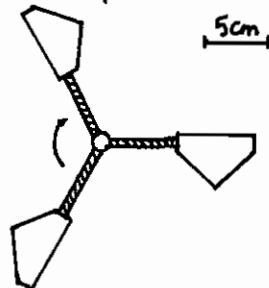


FIG 5.1 Schémas d'anémomètres à moulinet d'axe vertical.

trument enregistre les principales fluctuations du vent mais ne permet pas la détermination

de la vitesse du vent avec la précision requise (à 1 mœud près) lors des fluctuations de grande amplitude.

L'anémomètre Papillon permet la mesure des vitesses de vent comprises entre 0,5 et 50 m/s en donnant à la fois l'enregistrement de la vitesse à l'échelle la plus fine dans le temps compatible avec les constantes de temps du moulinet et de l'enregistreur, ainsi que l'enregistrement de la vitesse moyenne sur 10 minutes.

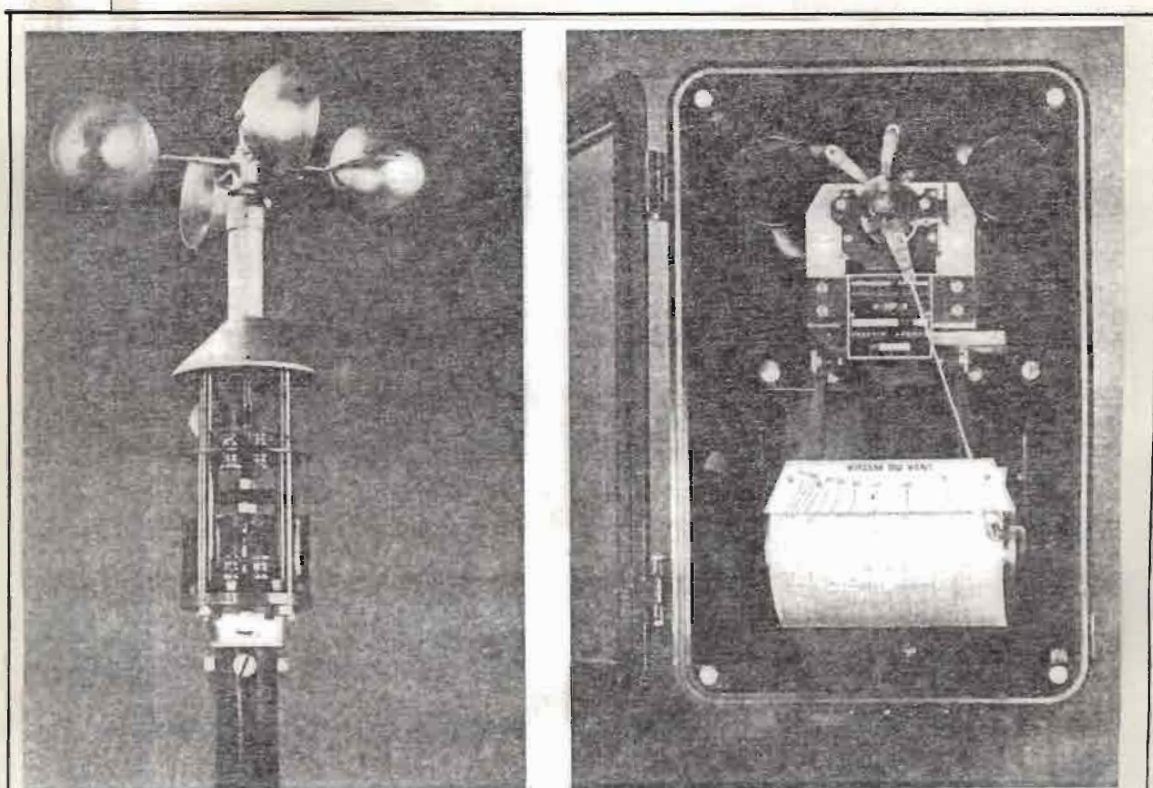


FIG 5.2 Anémomètre Papillon.

5.1.2 Anémomètres à pression ou anémomètres de Dines

Le principe du tube de Pitot est utilisé : la vitesse est déduite de la surpression d'une prise d'air opérée par un tube orienté face au vent grâce à un montage en girouette, sur une autre prise d'air effectuée par un cylindre creux vertical et muni de trous disposés régulièrement sur une section droite. Cet instrument donne des résultats corrects mais ne permet pas d'obtenir avec facilité la vitesse du vent sur 10 minutes à cause de la délicatesse de certains organes.

Calcul de la vitesse du vent.

Un tube manométrique a une ouverture A disposée face au vent et une autre B horizontale, parallèle au courant.

Pour un courant passant en A et B, l'expression

de Bernoulli donne :

$$v_A^2/2g + P_A/\rho g + z_A = v_B^2/2g + P_B/\rho g + z_B$$

$z_A = z_B = 0$, la vitesse en A est nulle.

$$P_A - P_B = \rho v^2/2$$

$$v = \sqrt{2(P_A - P_B)/\rho}$$

Cette vitesse est exprimée en valeur absolue ;
 $(P_A - P_B)$ est indiquée par le manomètre ; ρ est la masse
 spécifique de l'air et dépend de la pression et de la
 température de l'air.

5.1.3. Girouettes.

La girouette est un instrument qui indique la
 direction du vent. Elle est constituée par un corps
 de forme dissymétrique par rapport à un axe verti-
 cal autour duquel il peut tourner. La partie of-
 front au vent la plus grande résistance - l'empen-
 nage - est repoussée dans la direction opposée à
 celle d'où il souffle et, de par sa bonne stabilité

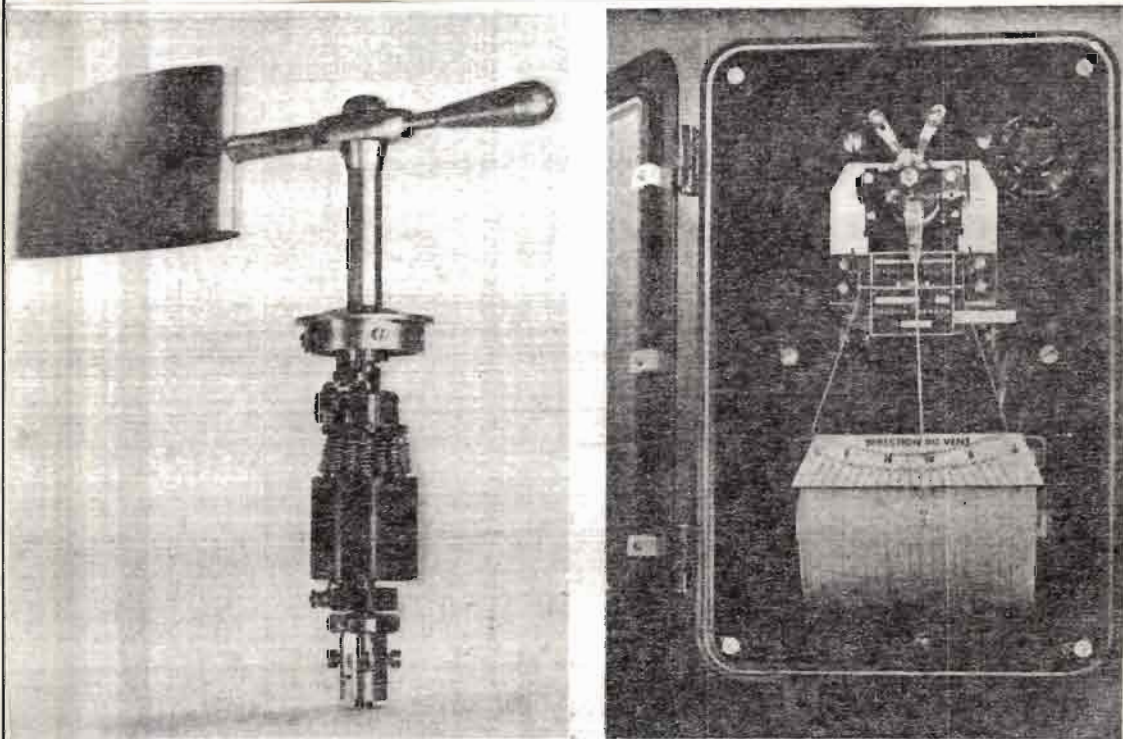


Fig. 5.3 - Girouette à résistance Papillon.

dans l'orientation, donne la direction du vent avec précision.

L'enregistrement continu et détaillé de la direction du vent peut se faire au moyen d'un récepteur d'angles à moteurs synchrones.

5.2 Estimation de la vitesse du vent

Tableau 5.4 : Tableau des effets produits par le vent, correspondant à une mesure effectuée à 10 m de hauteur.

| Vitesse mesurée. | | Echelle Beaufort. | | Effets produits par le vent. | |
|------------------|------------|-------------------|---------|------------------------------|--|
| (m/s). | (km/h). | (nœuds). | Code. | Appellation. | |
| 0 - 0,2 | Moins de 1 | Moins de 1 | 0 | Calmé | La fumée s'élève verticalement |
| 0,3 - 1,5 | 1 - 5 | 1 - 3 | 1 | Très légère brise | La direction du vent est révélée par l'entraînement de la fumée; mais non par les girouettes |
| 1,6 - 3,3 | 6 - 11 | 4 - 6 | 2 | Légère brise | Le vent est perçu au visage; les feuilles frémissent; une girouette ordinaire est mise en mouvement |
| 3,4 - 5,4 | 12 - 19 | 7 - 10 | 3 | Petite brise | Feuilles et petites branches constamment agitées; le vent déploie les drapeaux légers |
| 5,5 - 7,9 | 20 - 28 | 11 - 16 | 4 | Jolie brise | Le vent soulève la poussière et les feuilles de papier; les petites branches sont agitées |
| 8,0 - 10,7 | 29 - 38 | 17 - 21 | 5 | Bonne brise | Les arbustes en feuilles commencent à se balancer; de petites vagues avec crête se forment sur les eaux intérieures |
| 10,8 - 13,8 | 39 - 49 | 22 - 27 | 6 | Vent frais | Les grandes branches sont agitées; les fils télégraphiques font entendre un sifflement; l'usage des parapluies est rendu difficile |
| 13,9 - 17,1 | 50 - 61 | 28 - 33 | 7 | Grand frais | Les arbres sont agités en entier; la marche contre le vent est pénible |
| 17,2 - 20,7 | 62 - 74 | 34 - 40 | 8 | Coup de vent | Le vent casse des branches; la marche contre le vent est en général impossible |
| 20,8 - 24,4 | 75 - 88 | 41 - 47 | 9 | Fort coup de vent | Le vent occasionne de légers dommages aux habitations (arrachement de tuyaux, de cheminées et d'ardoises) |
| 24,5 - 28,4 | 89 - 102 | 48 - 55 | 10 | Tempête | Hare à l'intérieur des terres; arbres déracinés; importants dommages aux habitations |
| 28,5 - 32,0 | 103 - 117 | 56 - 63 | 11 | Violente tempête | Très rarement observé; s'accompagne de ravages étendus |
| 32,1 à 61 | 118 - 220 | 64 - 118 | 12 à 17 | Ouragan | " |

A défaut d'instrument la vitesse du vent est estimée d'après les différents mouvements de l'air. Pour les stations terrestres l'estimation est faite par l'estimation de la force du vent d'après l'évaluation de l'effet du vent sur les objets mobiles: ceci est illustré par le tableau 5.1.

L'échelle de Beaufort, échelle numérique de 0 à 12 - 17 sert à évaluer la vitesse du vent

Avec la détermination empirique il y a une correspondance entre la force B du vent, en degrés Beaufort et sa vitesse moyenne \bar{V} à la hauteur moyenne de 10 m.

$$\bar{V} = V_0 \sqrt{B^3} \quad , \text{ pour } B > 6$$

$$V_0 = 0,836 \text{ m/s.}$$

L'énergie éolienne est maintenant à l'ordre du jour. Pour la détermination du potentiel éolien il faut une grande gamme de mesures de vitesse du vent. La détermination des roses de vent nécessite aussi l'obtention de la direction du vent sur une longue période.

Chapitre VI

EVAPORATION TRANSPIRATION

L'évaporation est définie, comme étant les pertes en eau subies sous forme de vapeur par les nappes d'eau libre par un processus spécifiquement physique.

D'énormes quantités d'eau nécessaires à leur développement et à leur vie puisées par les plantes sont évaporées : c'est l'évaporation biologique, ou transpiration.

L'évapotranspiration est l'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration.

Le taux d'évaporation est défini comme étant la quantité d'eau perdue par évaporation depuis une unité de surface pendant une unité de temps. Elle est exprimée en volume d'eau liquide évaporée à partir d'une unité de surface pendant une unité de temps.

6.1 Facteurs influençant la mesure.

Divers facteurs conditionnent l'évaporation :

- la température, de l'air et de la surface évaporante
- l'humidité de l'air
- le rayonnement solaire
- la vitesse du vent
- la pression atmosphérique
- la profondeur de la nappe phréatique...

Pour l'évapotranspiration il y a en plus des facteurs météorologiques, d'autres facteurs non moins importants tels que les propriétés du sol et les caractéristiques des plantes.

6.2 Instruments de mesures.

Divers instruments sont utilisés pour la mesure de l'évaporation et de l'évapotranspiration.

6.2.1 Atnomètres

Les atnomètres permettent de mesurer la perte en eau d'une surface poreuse mouillée exposée aux conditions météorologiques, de l'énergie solaire et céleste, du vent, de la température et de la pression de vapeur.

L'élément évaporant de l'atnomètre Bellani, le plus usité, est constitué d'un plateau de porcelaine poreux et noir de 7,5 cm de diamètre dont l'eau du réservoir gradué pour la mesure de la quantité d'eau évaporée maintient l'humidité.

L'élément de l'évaporomètre Piche est un disque de papier filtre fixé à un tube cylin-

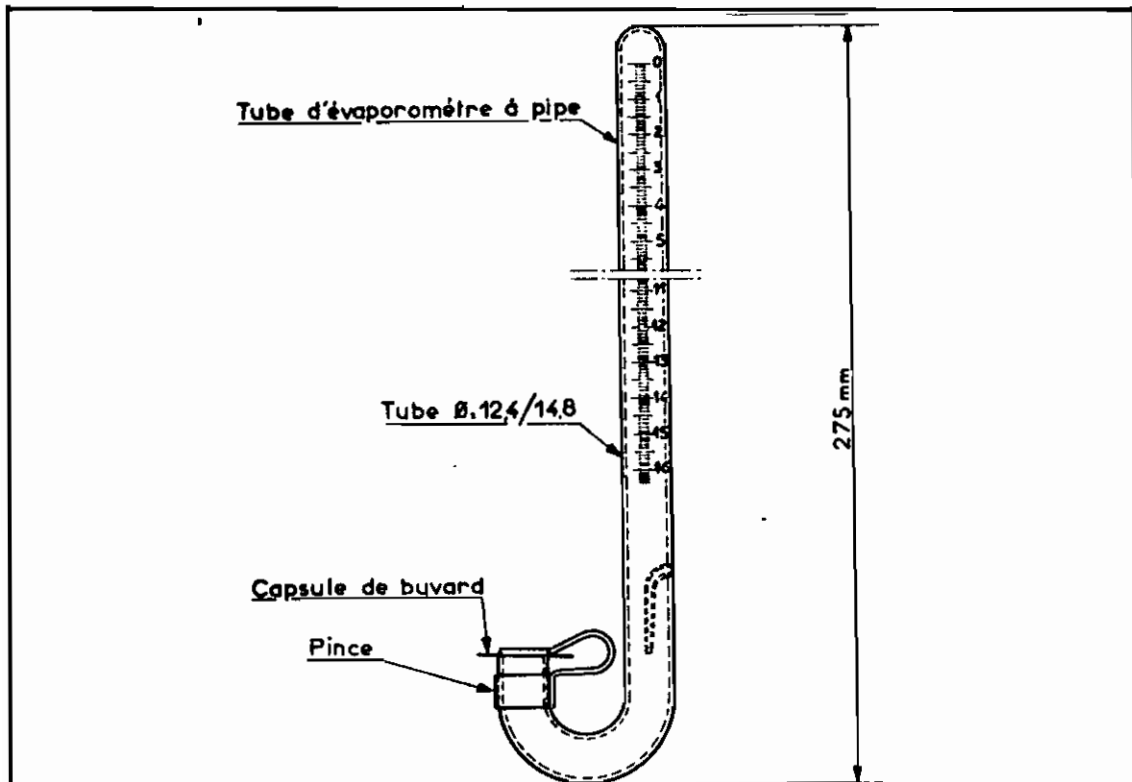


FIG 6.1 Evaporomètre Piche

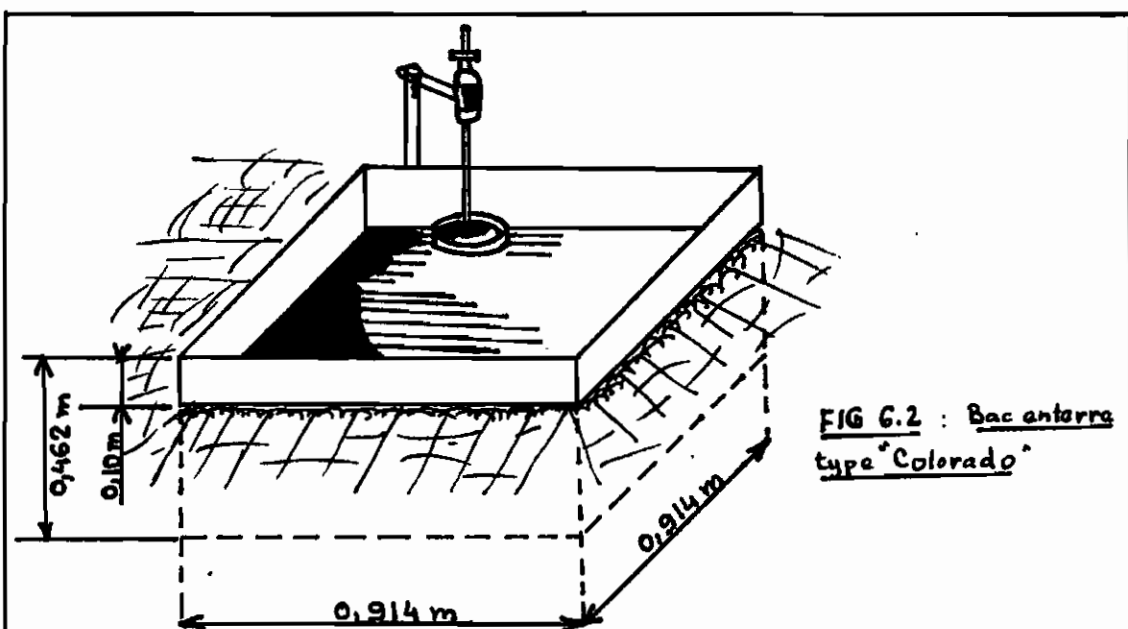
drique gradué. Le tube, fermé à sa partie inférieure, est rempli d'eau distillée afin de maintenir le mouillage de la surface poreuse.

6.2.2. Bacs d'évaporation

L'évaporation est mesurée à partir du changement de niveau de la surface de l'eau libre dans le bac. Cette mesure sert de base à plusieurs méthodes d'évaluation de l'évaporation des lacs et de l'évapotranspiration.

Les mesures de l'évaporation sont effectuées à l'aide de bacs d'évaporation qui peuvent être exposés de trois manières : bacs enterrés, sur l'eau ou dessus du sol.

Le bac enterré du type "Colorado" a la plus grande partie de son réservoir au dessous du niveau du sol qui est sensiblement au même niveau que la surface évaporante.



Le bac sur l'eau est sur une plate-forme ancrée flottant sur un plan d'eau.

Le bac au dessus du sol a sa surface évaporante sur une plate-forme : le bac tout entier est donc au dessus du niveau du sol. L'exemple type est le bac d'évaporation "de la classe A" en fer galvanisé utilisé par l'U.S. Weather Bureau. Il repose sur un caillbotis à 15 cm au dessus du niveau du sol.

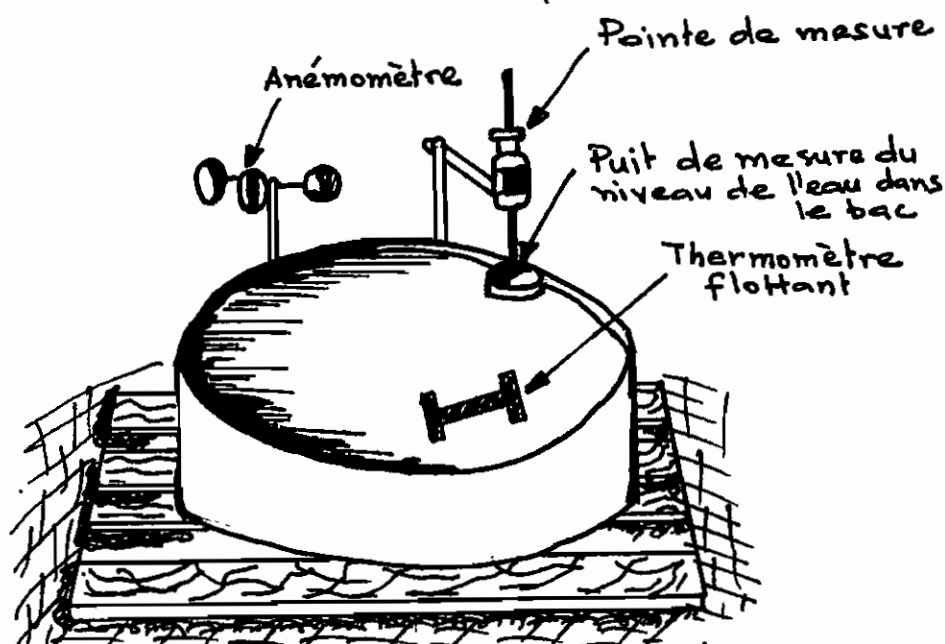


FIG. 6.3

Dimensions du bac d'évaporation type A du Weather Bureau (U.S.A)

Diamètre du bac 121,3 cm

Hauteur du bac 25,4 cm (10 in)

Niveau d'eau maintenu à 5 cm du bord.

Les formes, les caractéristiques et les dimensions des bass d'évaporation varient d'un pays à un autre. Mais le choix d'un instrument dépend des circonstances locales et du jugement de l'ingénieur.

6.3 Évapotranspiromètre

C'est la simulation du milieu par une grande cuve, de dimensions représentatives, remplie du terrain et de la végétation du lieu. Pour plus de fiabilité, ces dimensions devraient être grandes. La mesure se fait par la pesée des pertes en eau ou par l'évaluation de la quantité d'eau qui pénètre par dessus la cuve et celle qui sort par le fond.

Les évapotranspiromètres dont le fond est conçu pour l'écoulement de l'eau vers le bas sont appelés lysimètres.

Ces instruments devraient être dans un endroit dégagé, loin des obstacles et protégés contre les animaux.

6.4 Formules empiriques

Des formules empiriques sont utilisées à défaut de mesures directes. Les formules basées sur la loi de Dalton permettent de mesurer les moyennes annuelles ou mensuelles du pouvoir évaporant de l'atmosphère à partir des données météorologiques.

Formule de Dalton

$$E = \alpha [F_e - F_a]$$

E: taux d'évaporation de la période considérée (mm/j, mois...)

F_e : tension de vapeur d'eau saturante moyenne pour la température superficielle de l'eau;

F_a : tension de vapeur effective moyenne de l'air

$F_e - F_a$: déficit hygrométrique de l'air.

α : coefficient empirique caractérisant la station considérée, tenant compte de tous les éléments météorologiques (autres que le déficit hygrométrique)

Formule de J. Lugeon.

$$E = 0,398 (F_e - F_a) \frac{273 + T}{273} \cdot \frac{760}{B - F_e}$$

E : hauteur de la lame d'eau évaporée en mm pour le mois de n jours;

F_e : tension saturante de la vapeur d'eau (mm de Hg) correspondant à la température moyenne mensuelle T (donnée par les tables hygrométriques);

F_a : tension de vapeur d'eau effective moyenne mensuelle de l'air (mm Hg) au moment des lectures de T (obtenue en multipliant F_e par le degré hygrométrique moyen observé);

B : pression barométrique moyenne mensuelle (mm de Hg)

T : température moyenne mensuelle des maxima journaliers (en °C)

Formule de A. Boutagne.

$$E_j = \theta (1 + AV)$$

E_j : évaporation Piche journalière en mm

θ : écart psychrométrique en °C

V : vitesse du vent en m/s

A : coefficient égal à 0,10 - 0,15

Le développement de l'agriculture exige une bonne maîtrise de l'eau. Ainsi la transformation de l'eau devrait être bien appréhendée pour assurer une bonne.

-distribution dans les zones urbaines ou dans les zones rurales où l'eau est une priorité.

Chapitre VII

RAYONNEMENT ET INSOLATION

Le rayonnement solaire direct est la mesure du flux énergétique par unité de surface d'un capteur plan perpendiculaire aux rayons incidents.

Le rayonnement global est l'ensemble des rayonnements - parvenant directement au sol ou après diffusion - reçus sur une surface horizontale.

Le flux énergétique par unité de surface est exprimé en W/m^2

$$1 W/cm^2 = 1 cal/cm^2/min = 1 ly/min \text{ (langley par min)}$$

La quantité d'énergie rayonnante par unité de surface peut s'exprimer en J/cm^2 ou en mWh/cm^2 .

7.1 Mesures de rayonnement.

7.1.1 Rayonnement solaire direct.

Les radiations solaires, composées essentiellement d'ondes courtes ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu m$), sont mesurées à l'aide de pyrhéliomètre. La méthode de mesure la plus générale

consiste en la transformation de l'énergie rayonnée en chaleur et l'utilisation de méthodes calorimétriques classiques.

Les pyrhéliomètres devraient avoir leurs surfaces réceptrices perpendiculaires aux rayons incidents. L'emploi de diaphragme permet de ne mesurer que le rayonnement solaire et une partie du rayonnement annulaire du ciel voisin qui est une source d'erreur.

• Le pyrhéliomètre à compensation électrique d'Angström:

Deux lamelles noircies de manganine sont juxtaposées: l'une abritée est chauffée électriquement jusqu'à une température égale à celle exposée au rayonnement solaire. L'égalité des températures est détectée par des thermocouples fixés sur chaque lamelle et connecté à un galvanomètre de 0 le plus sensible possible.



FIG 7.1. Pyrhéliomètre à compensation d'Angström.

L'énergie I du rayonnement se calcule par:

$$I = ki^2$$

i : intensité du courant de chauffage;

k : constante caractéristique de l'instrument

• Le pyrhéliomètre Linke - Feussner.

Le récepteur est constitué par une thermopile de Moll compensée et formée par deux thermopiles complées et montées en opposition. Toutes les deux sont exposées aux fluctuations de température liées aux compressions adiabatiques parasites (effets du vent).

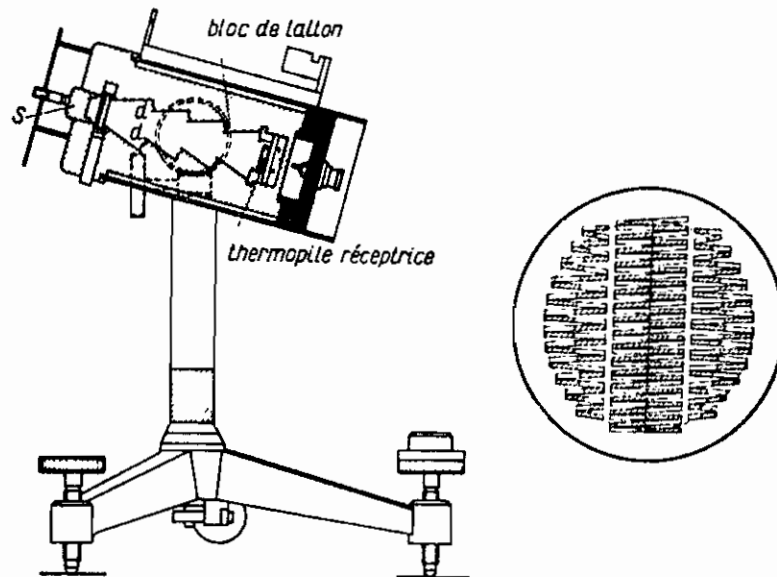


FIG 7.2 Pyrhéliomètre blindé (LINKE - FEUSSNER)

Pour la mesure il faut un galvanomètre sensible ou un pont potentiométrique. Un thermomètre incorporé indique la température et le facteur d'étalonnage à adopter.

L'exposition de ces instruments devrait être tel que les rayons solaires pénètrent dans l'appareil quelque soient l'heure du jour et l'époque de l'année.

7.1.2. Rayonnements solaires global et diffusé

En dehors des mesures de rayonnement solaire direct, il est important de mesurer le rayonnement solaire parvenant au sol soit directement, soit après diffusion. L'instrument utilisé est le pyranomètre ou solarimètre.

Types de pyranomètres

Ce sont généralement des pyranomètres à piles thermo-électriques dont la surface est plane et nivelée pour assurer une parfaite horizontalité.

• Pyranomètre Eppley.

Il comprend un dispositif de compensation thermique

de la pile thermoélectrique et des coupelles hémisphériques interchangeables.

L'indication thermoélectrique est produite par la différence de température entre les anneaux concentriques intérieur et extérieur.

Le récepteur horizontal est placé au milieu d'une ampoule de verre dans laquelle on fait le vide.

Pyranomètre Moll - Gorczynski.

Le pyranomètre Moll est modifié par Gorczynski pour donner le pyranomètre Moll - Gorczynski. Il comporte une pile thermoélectrique dont le capteur est recouvert de deux coupelles concentriques de verre poli.

Pour la mesure du rayonnement diffus les rayons solaires directs devraient être éliminés à l'aide d'un écran mobile assez large pour éviter que les rayons incidents et les réflexions multiples n'atteignent la coupelle extérieure du pyranomètre.

Pour les enregistrements continus, la protection du pyranomètre contre les rayons solaires devrait se faire à l'aide d'un disque maintenu par une monture équatoriale et suivant le mouvement apparent du soleil.

7.2. Mesure de l'albedo

L'albedo d'une surface (sol, champs, forêts ...) est défini comme étant le rapport entre le rayonnement solaire global du soleil et du ciel réfléchi par cette surface et le rayonnement incident.

La mesure de l'albedo d'une surface se fait avec l'élément récepteur d'un solarimètre disposé parallèlement à cette surface et dirigé soit vers le haut - rayonnement global - soit vers le bas - rayonnement réfléchi.

Des thermopiles, de surface parfaitement parallèle et d'orientation opposée, sont montées en opposition sur un pont permettant de lire directement l'albédo par la méthode du 0.

7.3 Rayonnement total

L'instrument destiné à la mesure du rayonnement total (courtes et longues longueurs d'ondes) est le pyradiomètre.

Pyradiomètres différentiels.

Ils sont subdivisés en deux (2) catégories :

- les pyradiomètres à plateau dont les surfaces réceptrices sont librement exposées. La ventilation est assurée par une soufflerie qu'actionne un moteur électrique. Une pile thermoelectrique mesure la différence de température, entre les surfaces intérieures et extérieures du plateau.

- les pyradiomètres à coupelle dont les surfaces réceptrices sont protégées par des écrans incurvés en verre, généralement hémisphériques. Une coupelle mince de polyéthylène ayant un coefficient global de transmission 'élevé' est utilisée avec une lamelle blanche d'oxyde de magnésium pour diminuer l'absorption de certaines longueurs d'ondes.

Pyradiomètres

Ce sont des pyradiomètres différentiels dont une surface de l'élément capteur est masquée.

Le courant de sortie est proportionnel alors au rayonnement reçu par l'autre face moins l'énergie émise par l'instrument lui-même. Le rayonnement émis peut être calculé avec la connaissance de la température de l'instrument et du pouvoir émissif de la surface.

Divers types de pyradiomètres seront illustrés en annexe.

7.4 Mesure de la durée d'insolation

L'insolation pourrait être définie comme étant la période où le soleil a brillé ou est visible. Perrin de Brichambaut propose une autre définition : « L'insolation est la période durant laquelle les objets naturels opaques donnent lieu à des ombres portées nettement dessinées sur une surface horizontale, période correspondant normalement à celle où le contour apparent du disque solaire est clairement visible, lorsque le trouble atmosphérique éventuel tend à le masquer. »

7.4.1 Types d'instrument

Les héliographes destinés à la mesure de l'insolation sont de quatre (4) types.

• L'héliographe Campbell-Stokes : Les rayons solaires utilisés pour leurs effets thermiques sont concentrés par une sphère de verre servant de loupe. Ils donnent une trace de carbonisation sur un papier de qualité et de couleur déterminés.

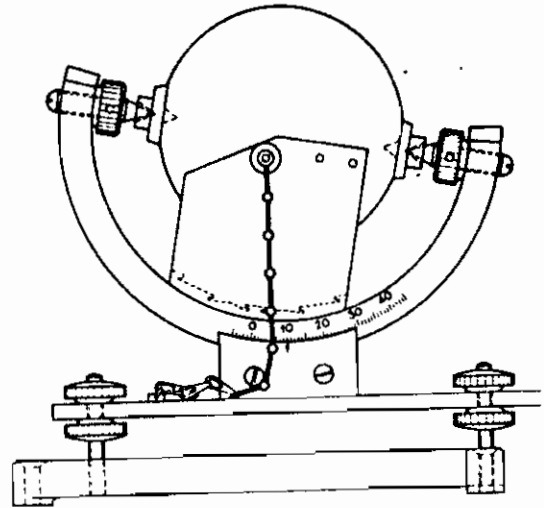


FIG 7.3 Héliographe type CAMPBELL-STOKES

• L'héliographe Marvin : Le rayonnement thermique ferme un circuit électrique qui commande un index qui, se déplaçant, établit un contact dès que l'insolation provoque un léger réchauffement du réservoir noirci, l'autre étant transparent (verre et alcool).

• L'héliographe Jordan : Il est composé de deux (2) boîtes hémisphériques, formant chambre noire, dont les parois

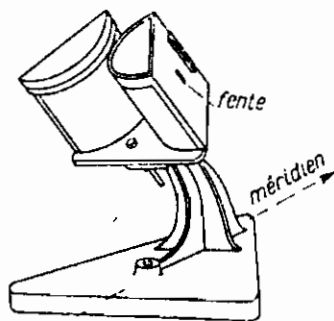


FIG 7.4 Héliographe JORDAN

sont percés d'une fine fente par laquelle pénètrent les rayons solaires qui impressionnent un papier héliographique.

L'héliographe Foster : C'est un instrument différentiel enregistrant la durée de l'insolation à l'aide de deux (2) cellules photoélectriques. Les cellules sont placées dans un tube translucide entouré d'une bande concentrique qui protège l'une d'elles du rayonnement solaire direct.

Le soleil est une source d'énergie inépuisable. Beaucoup de chercheurs se penchent sur l'étude du rayonnement solaire pour voir son incidence sur la vie des hommes, des animaux et des plantes. Les mesures d'insolation permettent la détermination du potentiel solaire à l'heure où l'humanité cherche de nouvelles sources d'énergie.

Chapitre VIII

ETUDE DU RESEAU METEOROLOGIQUE SENEGALAIS

Après avoir étudié les différentes méthodologies de mesures principales en météorologie - qui sont identiques dans tous les pays membres de l'Organisation Météorologique Mondiale (O.M.M.), il est nécessaire de cerner davantage le réseau météorologique sénégalais.

Le Sénégal membre de l'O.M.M., de par l'importance de la météorologie, devrait assurer un réseau météorologique fiable et une bonne gestion des données d'observation.

8.1 Stations météorologiques d'observations.

8.1.1 Types de stations

Les stations météorologiques d'observation sont des lieux où l'on mesure ou évalue un ou plusieurs éléments météo-

rologiques.

Au Sénégal les stations sont classées en six (6) principales catégories:

- 12 stations synoptiques
- 4 stations climatologiques 1^{er} ordre
- 5 stations climatologiques - 2nd ordre
- 176 stations pluviométriques
- 5 stations agrométéorologiques
- 5 stations radiométriques.

Comme les stations sont définies par les mesures qui y sont effectuées, elles seront clairement définies dans le paragraphe 8.2.1 intitulé 'Éléments à observer'.

8.1.2 Réseau de stations d'observations

L'O.M.M recommande d'établir un réseau de stations synoptiques terrestres situées à des intervalles ne dépassant pas 150 km.

Au Sénégal les stations climatologiques implantées permettent d'obtenir des indications sur les caractéristiques des types de terrains (plaines, plateaux ...)

Des stations agrométéorologiques sont implantées dans certaines localités selon une densité déterminée en fonction des caractéristiques météorologiques et agricoles.

Des stations radiométriques sont associées aux stations agrométéorologiques dans les zones climatiques importantes pour l'étude climatologique du rayonnement dans le pays.

D'autres stations d'observations à des fins spéciales devraient être mises sur pied: ce sont les observations par radar permettant d'obtenir des informations sur les zones de précipitation et les phénomènes associés de même que

sur la structure verticale¹ des systèmes nuageux.

8.1.3 Emplacement des stations d'observations météorologiques

Le site est choisi de sorte que les instruments soient correctement exposés et que les observations faites sans instrument soient exécutées de façon satisfaisante.

Les stations synoptiques malgré leur faible densité devraient fournir les données météorologiques représentatives de la région.

Les stations climatologiques sont conçues pour une période de fonctionnement, d'au moins dix (10) ans si elles ne sont pas destinées à une fin spéciale justifiant un fonctionnement pendant une période plus courte. Pour une bonne homogénéité des séries d'observations l'en-tourage ne devrait pas être modifié.

Les stations agrométéorologiques sont trouvées dans les lieux représentatifs des conditions naturelles et des caractéristiques culturelles de la région. Elles sont implantées dans les stations expérimentales ou centres de recherche pour l'agriculture (Louga, Ziguinchor, Bambeq ...) l'horticulture, l'élevage ou l'hydrobiologie; les instituts de pédologie, d'agronomie; les régions dans lesquelles les conditions climatiques ne favorisent pas le développement de l'agriculture et de l'élevage.

8.2 Observations météorologiques

L'observation météorologique est une évaluation d'un ou de plusieurs éléments météorologiques effectués par un observateur avec ou sans instrument installé dans les conditions recommandées et suivant les règles normalisées

82.1 Éléments à observer

Observations synoptiques

Dans une station météorologique terrestre les observations portent sur les éléments suivants: temps présent et temps passé; direction et vitesse du vent; nuages (quantité, identification, hauteur); visibilité; température de l'air; humidité et pression atmosphérique. Si les conditions l'exigent d'autres observations pourraient être effectuées: tendance de la pression atmosphérique; températures extrêmes; quantité des précipitations; état du sol et phénomènes spéciaux.

Observations climatologiques

Les observations portent sur: vent; nuages; visibilité; température de l'air avec les extrêmes; humidité; pression atmosphérique; précipitations; insolation et température du sol.

Les stations climatologiques sénégalaises sont différenciées par les types d'observations: toutes les observations suscitées sauf le sondage sont effectuées dans les stations climatologiques 1^{er} ordre et dans les stations climatologiques 2nd ordre seules les mesures de température, de précipitations et parfois de l'humidité sont effectuées.

Observations agrométéorologiques

Dans les stations de météorologie agricole tout un programme du milieu physique est entrepris: température et humidité de l'air à différents niveaux; températures et humidité du sol à différentes profondeurs; turbulence et mélange de l'air dans les basses couches; hydrométéores et autres facteurs du bilan hygrométrique; insolation et rayonnement.

D'autres observations à caractère biologique sont effectuées. Ce sont les observations phénologiques, de croissance, de rendement des plantes et des animaux et des dommages causés par les maladies et parasites.

Observations spéciales.

Les stations spéciales ont un programme d'observation qui dépend des fins d'utilisation auxquelles elles sont destinées.

Au niveau des stations radiométriques, le programme d'observation comprend l'enregistrement continu du rayonnement global, du soleil et l'enregistrement de la durée d'insolation.

8.2.2 Heures des observations.

Les heures d'observation sont toujours précisées. L'heure réelle d'observation correspond à celle de la lecture du baromètre pour les observations synoptiques. Elle s'emploie lorsqu'il s'agit d'un élément météorologique particulier qu'il faudra préciser.

L'heure G.M.T (Greenwich Meridien Time) ou T.U (Tempo Universel) est l'heure standard pour les observations synoptiques.

Les observations synoptiques de surface devraient se faire à 0h00; 06h00; 12h00 et 18h00, avec des observations intermédiaires à 03h, 09h, 15h00 et 21h00 TU.

L'observation de la pression atmosphérique devrait se faire aux heures standard exactes.

8.3 Collecte des données météorologiques

Le Sénégal est un maillon de la zone météorologique ouest-africaine. Malgré le déploiement de certains efforts, le problème de la collecte des données

se pose.

8.3.1 Collecte des données

La collecte des données à partir des stations d'observations vers les centres de traitement se fait par téléphone, radio, envoi par la poste ou par un agent de liaison parcourant le réseau.

Le choix des moyens de transmission dépend de certains facteurs : rapidité souhaitée pour disposer des données ; nombre et localisation des stations d'observations ; moyens matériels et financiers ; existence d'un réseau postal fiable.

L'harmonisation de l'acheminement des données d'observations est assurée par l'acquisition d'un émetteur-récepteur BLU (Bande latérale Unique), une antenne et une alimentation électrique aussi bien aux centres de collecte qu'aux stations d'observations.

8.3.2 Traitement statistique des données collectées

Les méthodes de traitement des données d'observations et de mesure sont soit manuelle ou informatique. L'utilisation d'une méthode dépend de la quantité et de la rapidité de traitement requise.

La méthode manuelle fastidieuse et source d'erreurs demande un contrôle rigoureux et une pléthore d'agents qualifiés. Par contre la méthode informatique est plus efficace. Une très bonne gestion des données avec un traitement rapide peut être assurée par un centre de calcul informatique employant un minimum de personnel qualifié. C'est ainsi que l'ordinateur de la Direction de la Météorologie Nationale (D.M.N), à Dakar promet

des résultats tangibles, dans ce domaine.

8.3.3 Organismes de collecte de données.

Plusieurs organismes nationaux et internationaux utilisent les données météorologiques sénégalaises.

L'ASECNA (Agence de Sécurité pour la Navigation aérienne en Afrique) gère toutes les stations synoptiques du Sénégal et de l'Afrique de l'ouest.

L'AGRHYMET (Agriculture, Hydrologie et Météorologie), le CILSS (Comité Inter Etat de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel) utilisent les données de la sous-région pour aider à l'application de la météorologie sur les pratiques agricoles, hydrologiques pour promouvoir certaines cultures et conjurer le désert.

D'autres organismes: les Parcs nationaux, l'Institut de Physique et de Météorologie devenu CERER (Centre d'Etudes et de Recherche d'Energies Renouvelables), l'ORSTOM (l'Office de Recherche des Sciences et Techniques d'Outre Mer), l'INDR (Institut National de Développement Rural), l'ENCR (Ecole Nationale des Cadres Ruraux) se proposent d'effectuer des mesures ou de collecter des données pour des fins de recherche dans leur spécialité.

Le réseau météorologique sénégalais a beaucoup d'insuffisances surtout sur la faible densité des stations synoptiques. Des problèmes d'entretien se posent au niveau de certaines stations - qui fonctionnent au ralenti ou ne fonctionnent pratiquement pas. La vétusté de certains équipements fait que le réseau n'est pas très fiable. La densification

du réseau et l'amélioration de la qualité des équipements rendraient beaucoup plus crédibles les mesures et observations effectuées sur l'ensemble du territoire.

Il faudrait de même une organisation rationnelle des méthodes de travail pour optimiser le temps pour la manipulation des données brutes du terrain par le biais d'un système informatique avec des terminaux d'ordinateurs au niveau de certaines localités.

Il faudrait, enfin, une standardisation des mesures au niveau de toutes les stations pour avoir une parfaite concordance des données.

Chapitre IX

EVALUATION DES BESOINS MÉTÉOROLOGIQUES, ET COUT DE LA STATION

« Promouvoir la recherche dans tous les domaines scientifiques où s'exerce l'activité de l'ingénieur » est un des objectifs que s'est fixés l'Ecole Polytechnique de Thiès (E.P.T). L'E.P.T. devrait être à la pointe des recherches solaires, éoliennes et hydrologiques, à l'heure où le Sénégal se trouve dans l'impasse devant le renchérissement du prix du pétrole et de l'avancée inexorable du désert.

9.1 Besoins météorologiques

Le rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire est capté à des fins utilitaires avec, par exemple, la conversion de l'énergie solaire en électricité. En effet, l'utilisation des thermopiles montées en série-parallèle permet d'obtenir des tensions et des intensités considérables.

Avec la situation géographique du Sénégal - ensoleillement permanent pendant toute l'année - des études devraient être faites pour évaluer le potentiel solaire. Il faudrait aussi chercher une inclinaison et un choix convenables des surfaces réceptrices - capteurs solaires - pour l'amélioration du rendement des récepteurs thermoélectriques.

Avec les conditions climatiques, des applications locales devraient être conçues pour la conception architecturale pour la climatisation des logements et l'amélioration des chaudières solaires.

Les tests de mesures exigent l'utilisation d'héliographe pour la durée de l'insolation, de pyranomètre ou de pyr'héliomètre.

Le vent.

Il est intéressant de mesurer la turbulence atmosphérique de petite échelle au voisinage du sol.

La vitesse du vent varie en fonction de l'altitude et d'un point à un autre. Il faudrait faire des études statistiques des vents pour les régions à étudier pour avoir les vitesses de vents classées et les courbes de fréquence mensuelle.

Pour l'implantation des éoliennes il faut connaître les caractéristiques relatives aux périodes durant lesquelles la vitesse du vent est inférieure à certaines limites. Il faudrait rechercher la hauteur optimum pour placer le moteur éolien afin de recueillir la puissance maximum. Il faudrait aussi savoir tout sur le régime de vent pour l'implantation des éoliennes ou pour la détermination de la capacité à donner aux réservoirs d'eau s'il s'agit d'éolienne de pompage ou d'accumulateurs d'énergie.

Pour le calcul des structures multi-étagées il faudrait avoir la vitesse du vent et sa période de retour pour la conception.

Pour connaître le potentiel éolien il faut des anémomètres, très précis permettant l'enregistrement des mouvements irréguliers du vent.

Les précipitations.

Pour l'irrigation il faudrait connaître les précipitations tombées dans la zone considérée. Pour une question d'homogénéité il faudrait de longues périodes de temps pour faire des mesures de précipitations. Cela permettrait d'avoir des tableaux et graphiques chronologiques, des courbes de hauteurs de précipitations cumulées ou d'années et des table pour les données statistiques.

Pour une région donnée, il faudrait savoir la relation durée-intensité-fréquence pour le calcul de la capacité des drains de petite superficie. Ses recherches bien menées devraient aboutir à la connaissance de l'intensité de la précipitation pour chaque localité pour le dimensionnement des égouts pluviaux.

Les autres mesures.

L'utilité des autres mesures n'est, certes, pas à démontrer. Mais il faudrait voir leur impact réel dans la recherche à l'E.P.T. Les mesures de l'évaporation et de l'évapotranspiration intéressent les ingénieurs agronomes en premier chef bien que l'évaporation comme l'infiltration, d'ailleurs, entrent dans le cycle hydrologique qui intéresse l'ingénieur en génie civil pour le captage des eaux de surface et souterraines. Certaines mesures, comme la mesure de l'humidité du sol recommandée au niveau des stations de météorologie agricole, devraient être laissées aux spécialistes en la matière comme les instituts de recherche agronomique : INDR, ENCR, etc...

La connaissance de la température est importante pour les problèmes de climatisation et d'échanges de chaleur.

La pression barométrique servant de base à toute

méthodologie de mesure devrait être connue.

9.2 Coût de la station.

La station devrait comporter des instruments pour la mesure du rayonnement solaire, du vent, des précipitations, de la température et de la pression atmosphérique. D'après l'analyse du réseau météorologique sénégalais, cette station ne peut être classée car répondant seulement à des fins bien spécifiques à l'École Polytechnique de Thiès.

Les prix de certains instruments ne sont pas disponibles. Mais des suppositions très près de la réalité peuvent être faites: ce sont les prix de certains instruments au Canada.

Le débit ou du moins le coût de la station est estimé à 3963200 FCFA. Les prix disponibles à la Direction de la Météorologie Nationale sont en hors taxes: d'ailleurs cela peut se concevoir dans le cadre de la coopération canado-sénégalaise au profit de l'École Polytechnique de Thiès.

| MESURES | Instruments et Accessoires | | Quantité | | | Prix | |
|--|--|------------|-----------|----------|--------|-----------------------|--------------------|
| | Designation | Reference | Installés | Reserves | Totale | Prix Unitaire FCFA | Prix total FCFA |
| Rayonnement solaire global diffusé | Pyranometre | CM6 | 1 | 0 | 1 | 300 000 | 300 000 |
| | " | CM8 | 1 | 0 | 1 | 350 000 | 350 000 |
| | Intégrateur | CE261 | 2 | 0 | 2 | 250 000 | 500 000 |
| | Pile 1.5V | | 4 | 50 | 54 | 100 | 5 400 |
| | Support métallique | Modèle DMN | 1 | 0 | 1 | 6 000 | 6 000 |
| Rayonnement solaire direct | Pyranomètre (Pyrhéliometre Linka) F Foucault | CM1 | 1 | 0 | 1 | 500 000 | 500 000 |
| Durée Insolation | Héliographe Campbell | W6000 | 1 | 0 | 1 | 150 000 | 150 000 |
| | Accessoires * (1) | | | | | | 50 000 * (2) |
| Direction Vent | Transmetteur girouette | Type M | 1 | 1 | 2 | 200 000 | 400 000 |
| | Indicateur " | Type M | 1 | 1 | 2 | 60 000 | 120 000 |
| Vitesse Vent | Transmetteur anémomètre | " | 1 | 1 | 2 | 200 000 | 400 000 |
| | Indicateur " | " | 1 | 1 | 2 | 60 000 | 120 000 |
| | Accessoires | | | | | | 21 500 |
| Pression barométrique | Baromètre | | | | | | 290 000 * (2) |
| Température | Thermomètre | 906 | 1 | 9 | 10 | 1 000 | 10 000 |
| | Thermographe Panoramique | NG 5484 | 1 | 0 | 1 | 125 000 | 125 000 |
| | Divers * (3) | | | | | | 50 500 |
| | | | | | | | <u>3 398 400</u> |
| | | | | | | | FCFA |

* (1) Accessoires : Diagramme héliographique, Support : valeur approximative.

* (2) Prix non disponible. Mais équivalent à 1000 \$ CAN. soit 290 000 FCFA.

* (3) Divers : Diagramme thermographe, bilame thermographe, Encre et plume d'enregistrement

| MESURE | Instruments et Accessoires | | Quantité | | | Prix | |
|-------------------------|----------------------------|-----------|-----------|----------|--------|---------------|----------------------------|
| | Designation | Reference | Installée | Reservée | Totale | Prix Unitaire | Prix total |
| Quantité Pluies tombées | Pluv. Association | A145 | 1 | 1 | 2 | 10000 | 20000 |
| Durée pluie | Photographe | R05-3025 | 1 | 0 | 1 | 250000 | 250000 |
| | Accessoires | | | | | | 46800 |
| | Cylindre d'enregistrement | | | 4 | 4 | 62000 | 248000 |
| | | | | | | | 564800 |
| Report | | | | | | | <u>3398400</u> |
| Total | | | | | | | <u><u>3963200 FCFA</u></u> |

CONCLUSION RECOMMANDATIONS

Pour maîtriser la nature, l'homme a besoin d'informations sur tous les phénomènes naturels pour interpréter, ou mieux changer le milieu environnant. C'est ce qui explique l'importance des mesures météorologiques à partir des instruments de haute précision judicieusement répartis dans l'espace.

Ainsi le Sénégal devrait se doter d'un dense réseau météorologique et faire des études sur la corrélation spatiale actuelle des stations pour une fiabilité et une rationnelle uniformisation des mesures. Avec l'acquisition d'instruments nouveaux (ou météorologie nouvelle) par le biais du transfert technologique et une bonne gestion et collecte des données, le Sénégal s'intégrera davantage dans le vaste réseau météorologique mondiale.

Les besoins météorologiques de l'E.P.T sont réelles. Mais pourrait-on justifier l'implantation d'une station météorologique d'un coût de 3 963 200 F CFA? La pertinence du projet dépend de beaucoup de paramètres: son coût relativement élevé, l'existence d'une station météorologique à Thiès et le programme de recherches qui pourrait être fait à l'E.P.T.

La station de Thiès qui fonctionne parfois au ralenti

ne peut pas fournir certaines mesures (rayonnement et insolation) et de longues séries de mesures régulières que l'E.P.T a besoin.

L'informatisation et la modélisation mathématique de certains paramètres (vent, précipitations, rayonnement) pourraient être incluses dans le programme de recherches. Pour cela il faudrait des mesures fiables et régulières pendant une longue période afin de disposer d'une banque de données représentatives. Le rôle didactique d'un laboratoire de météorologie n'est pas négligeable dans la formation de l'esprit scientifique.

Un intérêt particulier devrait être porté sur les énergies renouvelables : l'éolienne et le solaire notamment. L'E.P.T devrait ainsi avoir des sites d'expérimentation et de tests pour la conception d'éoliennes et de capteurs solaires répondant aux exigences locales.

L'E.P.T devrait, pour être un centre de recherche, être en étroite collaboration avec certains organismes comme la Direction de la Météorologie Nationale ou le CERER (Centre d'études et de Recherches d'Énergies Renouvelables) qui est rattaché à l'Université de Dakar.

L'implantation d'une station météorologique ne devrait pas être une fin en soi. Il faudrait, pour son implantation, que le programme de recherches soit étudié et mis en pratique pour faire de l'E.P.T une des références sur les recherches hydrologique, solaire et éolienne : c'est le seul bénéfice d'une station météorologique ayant des objectifs de recherches et didactiques.

ANNEXES

Table A₁: VARIATION OF RELATIVE HUMIDITY IN PERCENT WITH TEMPERATURE AND WET-BULB DEPRESSION ON THE FAHRENHEIT SCALE
 Pressure = 30.00 in. = 1015.9 millibars

| Air temp., °F | Wet-bulb depression, deg | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 | 30 |
| 0 | 84 | 56 | 27 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 86 | 63 | 40 | 16 | | | | | | | | | | | |
| 10 | 89 | 69 | 50 | 30 | 11 | | | | | | | | | | |
| 15 | 91 | 74 | 58 | 42 | 26 | | | | | | | | | | |
| 20 | 94 | 79 | 65 | 51 | 37 | 10 | | | | | | | | | |
| 25 | 96 | 84 | 71 | 59 | 47 | 24 | 1 | | | | | | | | |
| 30 | 99 | 88 | 77 | 66 | 56 | 35 | 15 | | | | | | | | |
| 35 | 100 | 91 | 81 | 72 | 63 | 45 | 27 | 10 | | | | | | | |
| 40 | 100 | 92 | 84 | 76 | 68 | 52 | 37 | 22 | 7 | | | | | | |
| 45 | 100 | 93 | 85 | 78 | 71 | 57 | 44 | 31 | 19 | 6 | | | | | |
| 50 | 100 | 93 | 87 | 80 | 74 | 61 | 49 | 38 | 27 | 16 | 5 | | | | |
| 55 | 100 | 94 | 88 | 82 | 76 | 65 | 54 | 43 | 33 | 24 | 14 | 5 | | | |
| 60 | 100 | 94 | 89 | 83 | 78 | 68 | 58 | 48 | 39 | 30 | 21 | 13 | 5 | | |
| 65 | 100 | 95 | 90 | 85 | 80 | 70 | 61 | 52 | 44 | 35 | 28 | 20 | 13 | | |
| 70 | 100 | 95 | 90 | 86 | 81 | 72 | 64 | 55 | 48 | 40 | 33 | 26 | 19 | 3 | |
| 75 | 100 | 95 | 91 | 87 | 82 | 74 | 66 | 58 | 51 | 44 | 37 | 31 | 24 | 10 | |
| 80 | 100 | 96 | 91 | 87 | 83 | 75 | 68 | 61 | 54 | 47 | 41 | 35 | 29 | 15 | 3 |
| 85 | 100 | 96 | 92 | 88 | 84 | 77 | 70 | 63 | 56 | 50 | 44 | 38 | 33 | 20 | 8 |
| 90 | 100 | 96 | 92 | 89 | 85 | 78 | 71 | 65 | 58 | 53 | 47 | 41 | 36 | 24 | 13 |
| 95 | 100 | 96 | 93 | 89 | 86 | 79 | 72 | 66 | 60 | 55 | 49 | 44 | 39 | 28 | 17 |
| 100 | 100 | 96 | 93 | 89 | 86 | 80 | 74 | 68 | 62 | 57 | 51 | 46 | 42 | 31 | 21 |

SOURCE: U.S. Weather Bureau, Relative Humidity and Dew Point Table, TA 454-O-3E, September 1965.

Table A₂: VARIATION OF RELATIVE HUMIDITY IN PERCENT WITH TEMPERATURE AND WET-BULB DEPRESSION ON THE CELSIUS SCALE
 Pressure = 990 millibars = 29.24 in.

| Air temp., °C | Wet-bulb depression, deg | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| -10 | 91 | 60 | 31 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| -8 | 93 | 65 | 39 | 13 | | | | | | | | | | | | |
| -6 | 94 | 70 | 46 | 23 | 0 | | | | | | | | | | | |
| -4 | 96 | 74 | 53 | 32 | 11 | | | | | | | | | | | |
| -2 | 98 | 78 | 58 | 39 | 21 | 3 | | | | | | | | | | |
| 0 | 100 | 81 | 63 | 46 | 29 | 13 | | | | | | | | | | |
| 2 | 100 | 84 | 68 | 52 | 37 | 22 | 7 | | | | | | | | | |
| 4 | 100 | 85 | 71 | 57 | 43 | 29 | 16 | | | | | | | | | |
| 6 | 100 | 86 | 73 | 60 | 48 | 35 | 24 | 11 | | | | | | | | |
| 8 | 100 | 87 | 75 | 63 | 51 | 40 | 29 | 19 | 8 | | | | | | | |
| 10 | 100 | 88 | 77 | 66 | 55 | 44 | 34 | 24 | 15 | 6 | | | | | | |
| 12 | 100 | 89 | 78 | 68 | 58 | 48 | 39 | 29 | 21 | 12 | 4 | | | | | |
| 14 | 100 | 90 | 79 | 70 | 60 | 51 | 42 | 34 | 26 | 18 | 10 | 3 | | | | |
| 16 | 100 | 90 | 81 | 71 | 63 | 54 | 46 | 38 | 30 | 23 | 15 | 8 | | | | |
| 18 | 100 | 91 | 82 | 73 | 65 | 57 | 49 | 41 | 34 | 27 | 20 | 14 | 7 | | | |
| 20 | 100 | 91 | 83 | 74 | 66 | 59 | 51 | 44 | 37 | 31 | 24 | 18 | 12 | 6 | | |
| 22 | 100 | 92 | 83 | 76 | 68 | 61 | 54 | 47 | 40 | 34 | 28 | 22 | 17 | 11 | 6 | |
| 24 | 100 | 92 | 84 | 77 | 69 | 62 | 56 | 49 | 43 | 37 | 31 | 26 | 20 | 15 | 10 | 5 |
| 26 | 100 | 92 | 85 | 78 | 71 | 64 | 58 | 51 | 46 | 40 | 34 | 29 | 24 | 19 | 14 | 10 |
| 28 | 100 | 93 | 85 | 78 | 72 | 65 | 59 | 53 | 48 | 42 | 37 | 32 | 27 | 22 | 18 | 13 |
| 30 | 100 | 93 | 86 | 79 | 73 | 67 | 61 | 55 | 50 | 44 | 39 | 35 | 30 | 25 | 21 | 17 |
| 32 | 100 | 93 | 86 | 80 | 74 | 68 | 62 | 57 | 51 | 46 | 41 | 37 | 32 | 28 | 24 | 20 |
| 34 | 100 | 93 | 87 | 81 | 75 | 69 | 63 | 58 | 53 | 48 | 43 | 39 | 35 | 30 | 26 | 23 |
| 36 | 100 | 94 | 87 | 81 | 75 | 70 | 64 | 59 | 54 | 50 | 45 | 41 | 37 | 33 | 29 | 25 |
| 38 | 100 | 94 | 88 | 82 | 76 | 71 | 66 | 61 | 56 | 51 | 47 | 43 | 39 | 35 | 31 | 27 |
| 40 | 100 | 94 | 88 | 82 | 77 | 72 | 67 | 62 | 57 | 53 | 48 | 44 | 40 | 36 | 33 | 29 |

SOURCE: From "Radiosonde Observation Computation Tables," Dept. of Commerce-Dept. of Defense, Washington, June 1972.

A: Tables psychrometriques

Table A₃ VARIATION OF DEWPOINT WITH TEMPERATURE AND WET-BULB DEPRESSION AND OF SATURATION VAPOR PRESSURE OVER WATER WITH TEMPERATURE ON THE FAHRENHEIT SCALE
 Pressure = 30.00 in. = 1015.9 millibars

| Air temp., °F | Saturation vapor pressure | | Wet-bulb depression, deg | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------------------|--------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| | Millibars | in. Hg | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 | 30 |
| 0 | 1.52 | 0.045 | -4 | -12 | -26 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 1.91 | 0.056 | 2 | -5 | -14 | -31 | | | | | | | | | | | |
| 10 | 2.40 | 0.071 | 7 | 2 | -5 | -15 | -34 | | | | | | | | | | |
| 15 | 2.99 | 0.088 | 13 | 8 | 3 | -4 | -14 | | | | | | | | | | |
| 20 | 3.71 | 0.110 | 18 | 15 | 10 | 5 | -2 | -27 | | | | | | | | | |
| 25 | 4.58 | 0.135 | 24 | 21 | 17 | 13 | 8 | -7 | | | | | | | | | |
| 30 | 5.63 | 0.166 | 30 | 27 | 24 | 20 | 16 | 6 | -12 | | | | | | | | |
| 35 | 6.89 | 0.203 | 35 | 33 | 30 | 27 | 24 | 16 | 5 | -16 | | | | | | | |
| 40 | 8.39 | 0.248 | 40 | 38 | 35 | 33 | 30 | 24 | 16 | 4 | -18 | | | | | | |
| 45 | 10.17 | 0.300 | 45 | 43 | 41 | 39 | 36 | 31 | 24 | 16 | 5 | -18 | | | | | |
| 50 | 12.27 | 0.362 | 50 | 48 | 46 | 44 | 42 | 37 | 32 | 25 | 17 | 5 | -17 | | | | |
| 55 | 14.75 | 0.436 | 55 | 53 | 51 | 50 | 48 | 43 | 39 | 33 | 27 | 18 | 7 | -15 | | | |
| 60 | 17.66 | 0.522 | 60 | 58 | 57 | 55 | 53 | 49 | 45 | 40 | 35 | 29 | 20 | 9 | -11 | | |
| 65 | 21.07 | 0.622 | 65 | 63 | 62 | 60 | 59 | 55 | 51 | 47 | 42 | 37 | 31 | 23 | 12 | | |
| 70 | 25.03 | 0.739 | 70 | 69 | 67 | 66 | 64 | 61 | 57 | 53 | 49 | 45 | 39 | 33 | 26 | -14 | |
| 75 | 29.63 | 0.875 | 75 | 74 | 72 | 71 | 69 | 66 | 63 | 59 | 56 | 52 | 47 | 42 | 36 | 14 | |
| 80 | 34.96 | 1.032 | 80 | 79 | 77 | 76 | 74 | 72 | 68 | 65 | 62 | 58 | 54 | 50 | 45 | 29 | -9 |
| 85 | 41.10 | 1.214 | 85 | 84 | 82 | 81 | 80 | 77 | 74 | 71 | 68 | 64 | 61 | 57 | 53 | 39 | 18 |
| 90 | 48.15 | 1.422 | 90 | 89 | 87 | 86 | 85 | 82 | 79 | 76 | 73 | 70 | 67 | 63 | 60 | 48 | 33 |
| 95 | 56.24 | 1.661 | 95 | 94 | 93 | 91 | 90 | 87 | 85 | 82 | 79 | 76 | 73 | 70 | 66 | 56 | 44 |
| 100 | 65.47 | 1.933 | 100 | 99 | 98 | 96 | 95 | 93 | 90 | 87 | 85 | 82 | 79 | 76 | 73 | 64 | 53 |

SOURCE: U.S. Weather Bureau, Relative Humidity and Dew Point Table, TA 454-0-3E, September 1965.

Table A₄ VARIATION OF DEWPOINT WITH TEMPERATURE AND WET-BULB DEPRESSION AND OF SATURATION VAPOR PRESSURE OVER WATER WITH TEMPERATURE ON THE CELSIUS SCALE
 Pressure = 1013.2 millibars = 29.92 in.

| Air temp., °C | Saturation vapor pressure | | Wet-bulb depression, deg | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------------------|--------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|----|
| | Milli-bars | in. Hg | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| -10 | 2.86 | 0.085 | -11 | -16 | -24 | | | | | | | | | | | | | |
| -8 | 3.35 | 0.099 | -9 | -13 | -20 | -33 | | | | | | | | | | | | |
| -6 | 3.91 | 0.115 | -7 | -11 | -16 | -24 | | | | | | | | | | | | |
| -4 | 4.55 | 0.134 | -5 | -8 | -12 | -19 | -32 | | | | | | | | | | | |
| -2 | 5.28 | 0.156 | -2 | -5 | -9 | -14 | -22 | | | | | | | | | | | |
| 0 | 6.11 | 0.180 | 0 | -3 | -6 | -11 | -16 | -27 | | | | | | | | | | |
| 2 | 7.05 | 0.208 | 2 | -1 | -3 | -7 | -12 | -19 | -33 | | | | | | | | | |
| 4 | 8.13 | 0.240 | 4 | 2 | -1 | -4 | -8 | -13 | -21 | -47 | | | | | | | | |
| 6 | 9.35 | 0.276 | 6 | 4 | 2 | -1 | -5 | -9 | -14 | -23 | | | | | | | | |
| 8 | 10.72 | 0.317 | 8 | 6 | 4 | 1 | -2 | -5 | -9 | -15 | -26 | | | | | | | |
| 10 | 12.27 | 0.362 | 10 | 8 | 6 | 4 | 1 | -2 | -5 | -10 | -17 | -29 | | | | | | |
| 12 | 14.02 | 0.414 | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 | 1 | -2 | -6 | -11 | -18 | -34 | | | | | |
| 14 | 15.98 | 0.472 | 14 | 12 | 11 | 9 | 6 | 4 | 1 | -2 | -6 | -11 | -19 | | | | | |
| 16 | 18.17 | 0.532 | 16 | 14 | 13 | 11 | 9 | 7 | 4 | 1 | -2 | -6 | -11 | | | | | |
| 18 | 20.63 | 0.609 | 18 | 16 | 15 | 13 | 11 | 9 | 7 | 4 | 2 | -2 | -6 | | | | | |
| 20 | 23.37 | 0.690 | 20 | 19 | 17 | 15 | 14 | 12 | 10 | 7 | 5 | 2 | -1 | | | | | |
| 22 | 26.43 | 0.780 | 22 | 21 | 19 | 17 | 16 | 14 | 12 | 10 | 8 | 5 | 2 | -1 | -5 | | | |
| 24 | 29.83 | 0.881 | 24 | 23 | 21 | 20 | 18 | 16 | 15 | 13 | 11 | 8 | 6 | 3 | -1 | -5 | -10 | |
| 26 | 33.61 | 0.992 | 26 | 25 | 23 | 22 | 20 | 19 | 18 | 15 | 13 | 11 | 9 | 6 | 4 | 0 | -4 | -9 |
| 28 | 37.80 | 1.116 | 28 | 27 | 25 | 24 | 22 | 21 | 19 | 18 | 16 | 14 | 12 | 10 | 7 | 4 | 1 | -3 |
| 30 | 42.43 | 1.253 | 30 | 29 | 27 | 26 | 25 | 23 | 22 | 20 | 18 | 17 | 15 | 13 | 10 | 8 | 5 | 2 |
| 32 | 47.55 | 1.404 | 32 | 31 | 29 | 28 | 27 | 25 | 24 | 22 | 21 | 19 | 17 | 15 | 13 | 11 | 9 | 6 |
| 34 | 53.20 | 1.571 | 34 | 33 | 32 | 30 | 29 | 28 | 26 | 25 | 23 | 21 | 20 | 17 | 16 | 14 | 12 | 10 |
| 36 | 59.42 | 1.755 | 36 | 35 | 34 | 32 | 31 | 30 | 28 | 27 | 25 | 24 | 22 | 21 | 19 | 17 | 15 | 13 |
| 38 | 66.26 | 1.957 | 38 | 37 | 36 | 34 | 33 | 32 | 30 | 29 | 28 | 26 | 25 | 23 | 21 | 20 | 18 | 16 |
| 40 | 73.78 | 2.179 | 40 | 39 | 38 | 36 | 35 | 34 | 33 | 31 | 30 | 28 | 27 | 25 | 24 | 22 | 20 | 19 |

SOURCE: U.S. National Weather Service, Marine Surface Observations, *Weather Bur. Handb. 1*, 1969.

C Réseau météorologique sénégalais

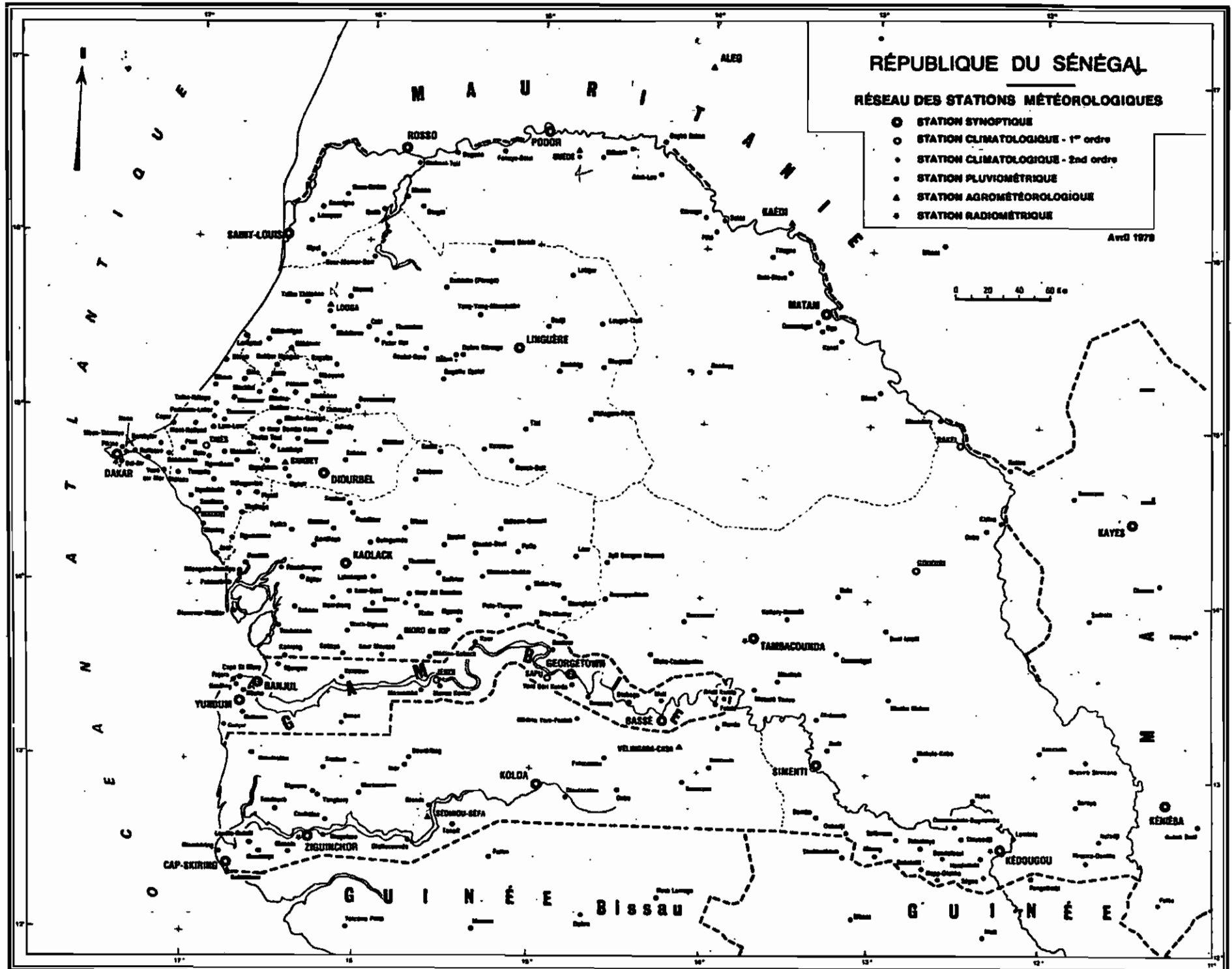
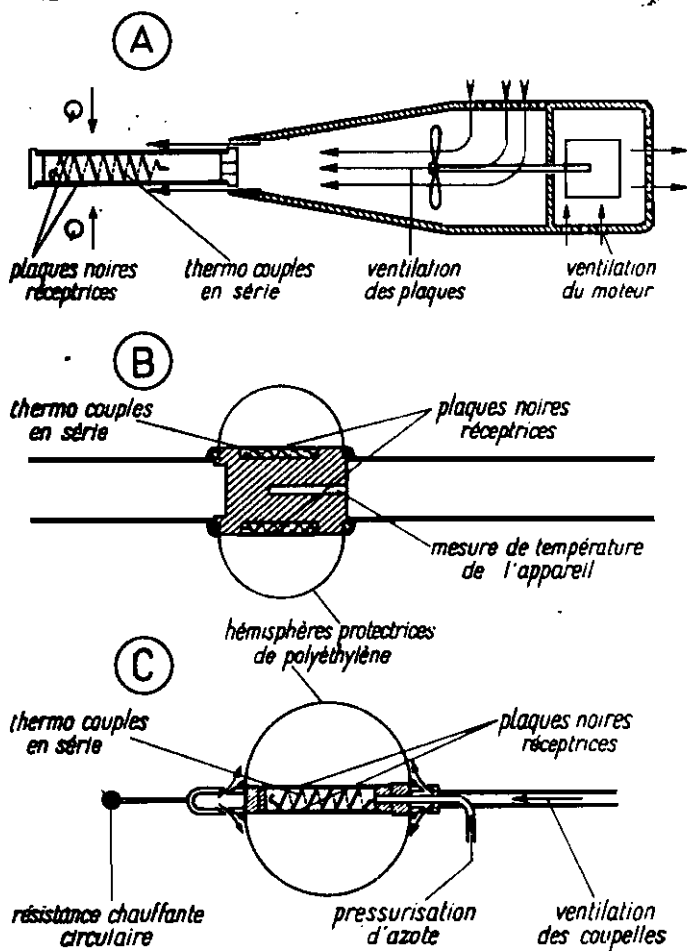


Table A₄ VARIATION OF DEWPOINT WITH TEMPERATURE AND WET-BULB DEPRESSION AND OF SATURATION VAPOR PRESSURE OVER WATER WITH TEMPERATURE ON THE CELSIUS SCALE
 Pressure = 1013.2 millibars = 29.92 in.

| Air temp., °C | Saturation vapor pressure | | Wet-bulb depression, deg | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------------------|--------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|
| | Milli-bars | in. Hg | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| -10 | 2.86 | 0.085 | -11 | -16 | -24 | | | | | | | | | | | | | |
| -8 | 3.35 | 0.099 | -9 | -13 | -20 | -33 | | | | | | | | | | | | |
| -6 | 3.91 | 0.115 | -7 | -11 | -16 | -24 | | | | | | | | | | | | |
| -4 | 4.55 | 0.134 | -5 | -8 | -12 | -19 | -32 | | | | | | | | | | | |
| -2 | 5.28 | 0.156 | -2 | -5 | -9 | -14 | -22 | | | | | | | | | | | |
| 0 | 6.11 | 0.180 | 0 | -3 | -6 | -11 | -16 | -27 | | | | | | | | | | |
| 2 | 7.05 | 0.208 | 2 | -1 | -3 | -7 | -12 | -19 | -33 | | | | | | | | | |
| 4 | 8.13 | 0.240 | 4 | 2 | -1 | -4 | -8 | -13 | -21 | -47 | | | | | | | | |
| 6 | 9.35 | 0.276 | 6 | 4 | 2 | -1 | -5 | -9 | -14 | -23 | | | | | | | | |
| 8 | 10.72 | 0.317 | 8 | 6 | 4 | 1 | -2 | -5 | -9 | -15 | -26 | | | | | | | |
| 10 | 12.27 | 0.362 | 10 | 8 | 6 | 4 | 1 | -2 | -5 | -10 | -17 | -29 | | | | | | |
| 12 | 14.02 | 0.414 | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 | 1 | -2 | -6 | -11 | -18 | -34 | | | | | |
| 14 | 15.98 | 0.472 | 14 | 12 | 11 | 9 | 6 | 4 | 1 | -2 | -6 | -11 | -19 | | | | | |
| 16 | 18.17 | 0.532 | 16 | 14 | 13 | 11 | 9 | 7 | 4 | 1 | -2 | -6 | -11 | | | | | |
| 18 | 20.63 | 0.609 | 18 | 16 | 15 | 13 | 11 | 9 | 7 | 4 | 2 | -2 | -6 | | | | | |
| 20 | 23.37 | 0.690 | 20 | 19 | 17 | 15 | 14 | 12 | 10 | 7 | 5 | 2 | -1 | | | | | |
| 22 | 26.43 | 0.780 | 22 | 21 | 19 | 17 | 16 | 14 | 12 | 10 | 8 | 5 | 2 | -1 | | | | |
| 24 | 29.83 | 0.881 | 24 | 23 | 21 | 20 | 18 | 16 | 15 | 13 | 11 | 8 | 6 | 3 | -1 | | | |
| 26 | 33.61 | 0.992 | 26 | 25 | 23 | 22 | 20 | 19 | 18 | 15 | 13 | 11 | 9 | 6 | 4 | 0 | -4 | -9 |
| 28 | 37.80 | 1.116 | 28 | 27 | 25 | 24 | 22 | 21 | 19 | 18 | 16 | 14 | 12 | 10 | 7 | 4 | 1 | -3 |
| 30 | 42.43 | 1.253 | 30 | 29 | 27 | 26 | 25 | 23 | 22 | 20 | 18 | 17 | 15 | 13 | 10 | 8 | 5 | 2 |
| 32 | 47.55 | 1.404 | 32 | 31 | 29 | 28 | 27 | 25 | 24 | 22 | 21 | 19 | 17 | 15 | 13 | 11 | 9 | 6 |
| 34 | 53.20 | 1.571 | 34 | 33 | 32 | 30 | 29 | 28 | 26 | 25 | 23 | 21 | 20 | 17 | 16 | 14 | 12 | 10 |
| 36 | 59.42 | 1.755 | 36 | 35 | 34 | 32 | 31 | 30 | 28 | 27 | 25 | 24 | 22 | 21 | 19 | 17 | 15 | 13 |
| 38 | 66.26 | 1.957 | 38 | 37 | 36 | 34 | 33 | 32 | 30 | 29 | 28 | 26 | 25 | 23 | 21 | 20 | 18 | 16 |
| 40 | 73.78 | 2.179 | 40 | 39 | 38 | 36 | 35 | 34 | 33 | 31 | 30 | 28 | 27 | 25 | 24 | 22 | 20 | 19 |

SOURCE: U.S. National Weather Service, Marine Surface Observations, *Weather Bur. Handb.* 1, 1969.



Divers types de pyrradiomètres ou pyrradiobalanmètres

A — Pyrradiobalanmètre ventilé

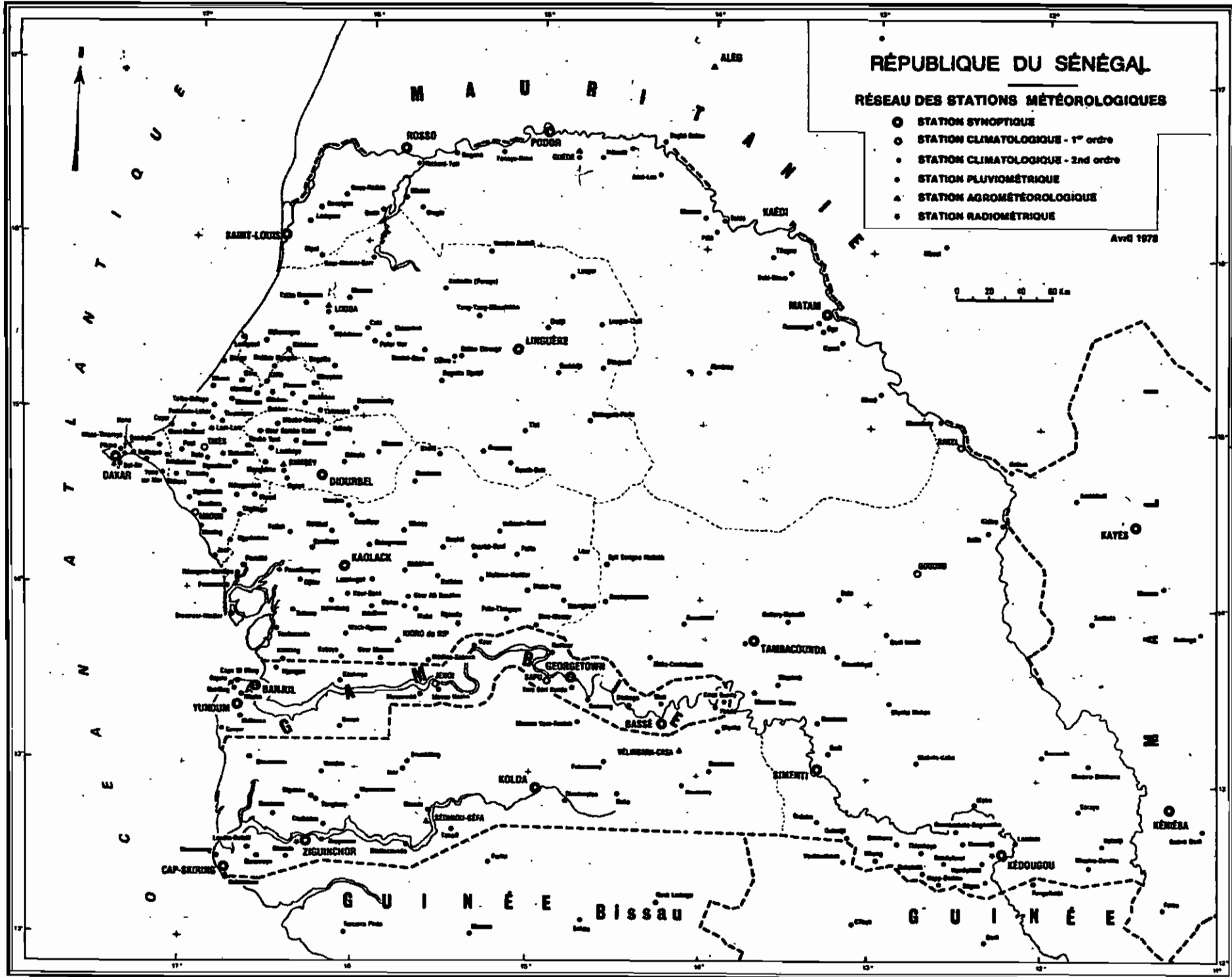
B — Pyrradiomètre à coupelles

C — Pyrradiobalanmètre mixte amélioré

Echelle moyenne 1/4

B. Divers types de pyrradiomètres ou pyrradiobalanmètres

C Réseau météorologique sénégalais



REFERENCES & BIBLIOGRAPHIE

1. Paul DEVUYST, "Comprendre, interpréter, appliquer la météorologie", Eyrolles, 1972
2. D. M. GRAY, "Manuel des principes d'hydrologie", Publication du Secrétariat, Comité national canadien de la Déconne hydrologique internationale", 1972
3. T. N. KRISHNAMURTI, "Compendium of meteorology for use by Class I and Class II meteorological personnel", Volume II, Part 4 - Tropical meteorology, 1979
4. Andre LECLERC "L'hydrologie de l'ingénieur", Notes de cours 1^{ère} édition. Montréal, 1971
5. D. LE GOURIERES, "Energie Eolienne; Théorie, conception et calcul pratique des installations", Eyrolles, 1980
6. Longley, Richmond Wilberforce, "Elements of meteorology" John Wiley, 1970
7. R. K. UNSLEY, KOHLER, PAULHUS, "Hydrology for Engineers" Mc Graw-Hill 2nd Edition, 1975
8. A. PERLAT, H. PETIT, "Mesures en Météorologie", Gauthier-Villars & C^{ie}, 1961
9. Ch. PERRIN de BRICHAMBAUT, "Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels", Gauthier - Villars, 1963
10. P. QUENEY, "Éléments de Météorologie", Masson & C^{ie}, 1974
11. G. RÊMÉNIÉRAS, "L'hydrologie de l'ingénieur", Eyrolles, 3^e édition, 1972
12. C. ROUSSEAU, F. PADILLA et D. ALAIN, "Mesures hydrogéologiques et météorologiques faites à Duchesnay durant la période Hiver - Printemps 1980" - Avril 1981
13. C. ROUSSEAU "Thèse: Analyse des caractéristiques hydrologiques d'une couverture nivale" Université Laval, Août 1979
14. O. M. M. "Guide des Instruments et des observations météorologiques" 4^e édition - Secrétariat OMM, 1973.