

Académie royale  
des  
Sciences coloniales

—  
CLASSE  
DES SCIENCES TECHNIQUES

—  
Mémoires in-8°. Nouvelle série.  
Tome III, fasc. 2 et dernier.

Koninklijke Academie  
voor  
Koloniale Wetenschappen

—  
KLASSE  
DER TECHNISCHE WETENSCHAPPEN

—  
Verhandelingen in-8°. Nieuwe reeks.  
Boek III, alev. 2 en laatste.

---

# Considérations

sur

## l'étude climatologique quantitative de l'habitation tropicale

PAR

**F. BUCKENS**

INGÉNIEUR CIVIL  
DOCTEUR EN SCIENCES APPLIQUÉES  
PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ DE LOUVAIN  
CHEF DE CENTRE I. R. S. A. C., LWIRO (CONGO BELGE)



Avenue Marnix, 25  
BRUXELLES

Marnixlaan, 25  
BRUSSEL

1956

PRIX :  
PRIJS: F 170





ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES COLONIALES

---

MÉMOIRES

---

---

KONINKLIJKE ACADEMIE VOOR KOLONIALE  
WETENSCHAPPEN

---

VERHANDELINGEN



**CLASSE DES SCIENCES TECHNIQUES**  
**KLASSE DER TECHNISCHE WETENSCHAPPEN**

---

**TABLE DES MÉMOIRES**  
**CONTENUS DANS LE TOME III**

---

**VERHANDELINGEN BEGREPEN IN BOEK III**

---

1. Annuaire hydrologique du Congo belge et du Ruanda-Urundi (1954) (378 pages, 268 diagrammes, 17 planches, 1955) ; par E.-J. DEVROEY.
  2. Considérations sur l'étude climatologique quantitative de l'habitation tropicale (145 pages, 33 figures, 1956) ; par F. BUCKENS.
-



ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES COLONIALES

---

**Classe des Sciences techniques**

---

**MÉMOIRES**

---

---

KONINKLIJKE ACADEMIE VOOR KOLONIALE  
WETENSCHAPPEN

---

**Klasse der Technische Wetenschappen**

---

**VERHANDELINGEN**

---

Nouvelle série — Nieuwe reeks

**In-8° — III — 1955-1956**

---

**Avenue Marnix, 25  
BRUXELLES**

**Marnixlaan, 25  
BRUSSEL**

---

1956

IMPRIMERIE J. DUCULOT

S. A.

GEMBLoux

Considérations  
sur  
l'étude climatologique quantitative  
de l'habitation tropicale

PAR

**F. BUCKENS**

INGÉNIEUR CIVIL  
DOCTEUR EN SCIENCES APPLIQUÉES  
PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ DE LOUVAIN  
CHEF DE CENTRE I. R. S. A. C., LWIRO (CONGO BELGE)

---

Mémoire présenté à la séance du 24 juin 1955.  
Rapporteurs : MM. E.-J. DEVROEY et S. DE BACKER.

---

# Considérations sur l'étude climatologique quantitative de l'habitation tropicale

---

## 1. — INTRODUCTION

1.0 Au moment d'assumer ses fonctions au Centre de l'I. R. S. A. C. à Lwiro, l'auteur du présent travail fut sollicité de s'occuper d'un problème qui, depuis plusieurs années, avait été inscrit au programme des recherches de l'Institut, celui de l'habitation de l'Africain au Congo.

Bien que ce problème, par certains de ses aspects, sortît apparemment du domaine d'expérience propre à l'auteur, un premier examen de la littérature, d'ailleurs fort disparate, qui le concerne de quelque manière, montra que cette proposition comportait au moins trois avantages :

1) Celui de favoriser une prise de connaissance directe de certains aspects de la climatologie du Congo, branche si importante de l'étude physique générale de la Colonie ;

2) Celui de permettre d'aborder le problème du point de vue de l'ingénieur-physicien, point de vue qui peut différer, comme on le verra, de celui du climatologiste professionnel, et qui est susceptible d'apporter de nouvelles et fructueuses conceptions ;

3) Celui de permettre une appréciation suffisante de certains aspects technologiques du problème et même de certaines extensions dans ce sens, présentant une importance primordiale pour l'économie coloniale. Nous voulons parler de l'étude du comportement des matériaux en milieu tropical.

1.1 Les différents points qui, dans l'étude d'ensemble, ont paru dès le début mériter l'attention, sont :

1) *L'existence de différents climats tropicaux.* Il s'agit ici d'une variation dans l'espace dont il faut tenir compte dans une étude synthétique, si l'on veut arriver à des conclusions qui ne soient pas seulement localement valables. Une classification faisant intervenir les différents facteurs climatologiques intéressant l'habitation doit être constituée, au besoin en s'inspirant de classifications éco-climatologiques déjà existantes en zoologie et en phytologie. Ensuite, pour chaque région climatologique, la description du climat doit donner une idée suffisamment précise de la variation dans le temps des facteurs climatologiques (éléments périodiques et apériodiques) en pays chaud.

Nous verrons dans la suite toute l'importance que le traitement analytique du problème thermique nous fait attribuer à la périodicité diurne. La périodicité annuelle ne devra pas non plus être négligée dans une étude d'ensemble.

2) *L'étude de la notion de confort.* On sait que cette notion de confort peut être différente chez l'Africain de celle de l'Européen. Il importe ici de mettre au point une double étude : celle du comportement du micro-climat de l'habitation en fonction des variations climatiques extérieures, et celle du comportement physiologique de l'habitant et de sa réaction psychologique dans un micro-climat donné. Le dernier point constitue une donnée qualitative, qui peut faire l'objet d'une enquête statistique, suivant des méthodes déjà utilisées aux États-Unis, pour étudier la corrélation entre le sentiment de confort chez les individus d'un groupe donné, et différents éléments d'un climat. De toute façon, on aura intérêt à étudier le comportement d'un type d'habitation qui, au dire des indigènes, emporte leur suffrage.

Ici encore la notion de confort peut varier d'une région à l'autre, d'un groupe de population à l'autre.

3) *Les conditions imposées par l'hygiène* doivent évidemment entrer en ligne de compte et peuvent venir infirmer certaines conceptions de confort dérivant de coutumes parfois nocives ou même de superstitions.

L'hygiène peut s'envisager dans une cité sous un double aspect. Celui de l'habitation individuelle conduit à fixer des nombres de pièces minima en fonction du nombre d'habitants, des espaces minima, un minimum d'air renouvelable et de lumière.

Des médecins attribuent à l'humidité, au manque d'air et de lumière, la haute incidence de la tuberculose ou même de la lèpre dans certaines régions.

Le second aspect est celui de l'hygiène de l'agglomération, qui s'occupe de la disposition relative des habitations, de l'écoulement des eaux, etc...

4) *Le point de vue technologique et économique*, loin d'être négligeable, doit être dominant. L'étude des matériaux économiquement disponibles doit être approfondie, les caractéristiques thermiques, de résistance et de durabilité connues, leur emploi par la main-d'œuvre locale précisé.

Les structures doivent être étudiées en fonction du climat et des intempéries; dans certaines régions, une résistance suffisante aux séismes doit être assurée.

5) *Enfin l'esthétique de l'architecture* doit être étudiée en fonction du climat et du cadre naturel (végétal, minéral) qui lui correspond. Une construction légère et ventilée, dans un climat lourd et humide, peut procurer une heureuse impression de contraste en même temps que l'adaptation sélective, tandis que des formes massives à forte capacité thermique trouvent dans le paysage d'un climat sec et torride un cadre traditionnellement adapté.

La conception des formes doit aussi dépendre du matériau qui est un facteur local.

Il ressort de ces différentes considérations qu'il ne peut exister de solution unique au problème de l'habitation tropicale ; celle-ci doit être adaptée au climat régional, ou même local dans certains cas, aux sollicitations prévisibles (pluies, tornades, séismes), aux matériaux utilisables localement dans les conditions les plus économiques et les plus durables, aux goûts des habitants, compte tenu des exigences de l'hygiène, et enfin à l'environnement du point de vue de l'esthétique.

1.3 En fait, le programme d'étude présenté initialement par l'auteur impliquait dès l'abord un travail de longue haleine, comportant plusieurs phases.

1) Le premier point est celui de l'étude micro-climatologique de l'habitation et de son environnement, pour différentes régions typiques de la Colonie. Cette étude doit être faite aussi bien sur les habitations traditionnelles des indigènes que sur celles qu'on se propose de leur faire adopter ;

2) L'étude du comportement physiologique et psychologique de l'habitant se rapporte plus aux domaines de la biologie humaine et de l'anthropologie. Elle présente en outre certaines difficultés du fait que d'autres facteurs interviennent, tels que l'alimentation, l'état de santé et l'activité normale ou anormale des habitants. Cet aspect important a été laissé de côté ici ; seul le problème physique a été abordé ;

3) L'étude des matériaux disponibles dans différentes régions, en tenant compte des facteurs économiques et technologiques. Ici l'on se trouve en présence de travaux déjà effectués par différents services (Office des Cités Africaines, Service des Travaux Publics). Ces résultats devront être repris et au besoin complétés pour certains aspects (caractéristiques thermiques) en fonction des résultats de l'étude n° 1 ;

4) Enfin, une étude de synthèse devra permettre de dégager des règles générales, donnant lieu à des applications distinctes suivant les climats et les matériaux disponibles.

1.4 L'étude des travaux traitant de sujets analogues, la visite de nombreux laboratoires étrangers qui se sont occupés de problèmes de l'habitation ont convaincu l'auteur qu'il importait avant tout :

1) De donner un caractère nettement quantitatif aux expériences et aux recherches ;

2) De trouver des méthodes de mesure et des critères qui permettent :

a) De comparer de manière suffisamment simple et précise les mérites respectifs de différentes habitations ;

b) De détecter des erreurs de conception et d'indiquer les remèdes éventuels ;

c) De prévoir les « performances » d'une habitation projetée.

On trouvera dans ce qui suit les résultats d'une étude climatologique de certains types traditionnels d'habitation indigène. Ce choix de l'habitation coutumière a été dicté par trois considérations :

1) L'intérêt de chercher à définir, par une étude de leurs habitations ancestrales, ce que les indigènes considéraient comme le milieu le plus confortable ;

2) Les demeures ne comportant généralement qu'un nombre très réduit de pièces, se prêtent mieux, par leur simplicité à une étude d'ensemble préliminaire ;

3) Les appareils de mesure et d'enregistrement disponibles convenaient le mieux à des mesures en campagne, et leur emploi se justifiait le moins au voisinage de sources de courant électrique.

Le présent mémoire donne les observations qui ont été faites au cours d'une étude préliminaire, dont le développement a été entravé par des tâches administratives parfois absorbantes, et pour laquelle seuls des instruments du type le plus simple ont pu être utilisés.

Ces appareils ne nécessitent pas de courant électrique, mais ne permettent généralement pas des enregistrements de grande précision. Aussi le travail a-t-il été limité à des observations globales, concernant surtout l'allure de l'évolution des différentes grandeurs climatiques, et permettant la mise au point d'études systématiques ultérieures, ainsi qu'une méthode d'analyse des résultats ayant une valeur comparative pour les types d'habitations.

Aussitôt que le personnel prévu aura été recruté et dès que les appareils nécessaires de plus grande précision auront été fournis, les recherches pourront être menées sur une échelle adéquate, suivant les directives fournies par les résultats de cette étude préliminaire.

C'est l'ensemble de ces directives qui sera exposé ici, avec une courte description des expériences qui ont permis de les formuler.

Nous concentrerons notre attention dans cette première communication sur l'aspect le plus important, celui des échanges thermiques et chercherons surtout à développer une méthode d'analyse de ces échanges, sans nous étendre sur d'autres points importants, mais qui devront être repris en détail, tels que les problèmes hygrométriques et anémométriques si importants pour l'étude du confort des habitants.

Ce n'est que lorsque ces différents points auront été analysés que ce problème du confort, ainsi que celui du comportement des matériaux, pourront être traités en fonction des différents types d'habitations tropicales, du mode de vie des habitants et du climat local.

Avant de passer à l'étude du comportement thermique

de l'habitation, il est utile de faire certaines observations sur le climat dans lequel elle peut se trouver. Dans le chapitre suivant nous chercherons à caractériser quantitativement le climat d'une manière qui, si elle est inhabituelle, servira le mieux le but poursuivi.

Nous nous sommes en effet attaché surtout à la notion de périodicité dans la variation des différents facteurs climatiques importants dans notre problème, tant au point de vue des phases que des amplitudes.

Nous n'avons pas tenté de donner une vue d'ensemble du climat de l'Afrique centrale. A ceux que la question intéresse sans leur être familière nous ne saurions assez recommander la lecture d'ouvrages tels que ceux de MM. E.-J. DEVROEY [1] (\*), E. BERNARD [3], etc.

Avant de passer au vif du sujet, il nous est agréable d'exprimer notre reconnaissance à toutes les personnes qui nous ont aidé à mener à bien ce premier travail.

En particulier, nous tenons à remercier M<sup>lle</sup> GOULARD pour son concours efficace dans le calcul des nombreux tableaux numériques qui suivent.

(\*) Les chiffres entre [ ] renvoient à la bibliographie, p. 141.

## 2. — CONSIDÉRATIONS SUR LES CLIMATS DE L'AFRIQUE CENTRALE

2.0 On sait qu'un climat écologique donné est caractérisé par un ensemble complexe de facteurs physiques, tels que les radiations (rayonnement solaire, direct et diffusé, radiations réfléchies, rayonnement noir), les températures (de l'air, à différentes altitudes du sol, à la surface et près de celle-ci), le régime de l'eau (vapeur d'eau ou humidité, nébulosité, condensations et pluies), le régime des vents, etc...

Dans un laps de temps dont l'ordre de grandeur est celui de la vie humaine et dans un lieu donné, l'expérience montre que ces grandeurs évoluent de façon suffisamment régulière, avec des écarts apparemment accidentels et assez courts, pour que l'on puisse parler d'un climat soit doux, soit extrême, soit chaud, humide, etc...

Mais il ne faut pas oublier qu'à l'échelle géologique, ou même historique, des changements notables peuvent s'établir dans le climat d'une région donnée.

Rappelons que si le climat dépend de circonstances géographiques :

a) Latitude en ce qui concerne le rayonnement solaire et le régime de circulation des vents qui en dépend aussi ;

b) Degré de continentalité qui diminue l'importante influence des océans dans le régime des températures, cette intervention atténuatrice provenant de la forte capacité thermique de l'eau et de l'influence des courants marins ;

c) Topographie en ce qui regarde l'altitude (température, précipitations) et le relief (montagnes, lacs, effets microclimatiques de convexité ou concavité, etc...); il dépend aussi, à une échelle généralement moindre, de l'activité des êtres vivants (végétation, agriculture et industrie).

2.1 Une caractéristique extrêmement importante du climat est à notre point de vue sa périodicité. Les rythmes annuels et diurnes d'origine astronomique sont évidents, et leurs fréquences sont suffisamment éloignées pour que nous puissions considérer le second comme une oscillation modulée superposée à l'oscillation beaucoup plus lente du premier. Une manière pratique de dégager ces deux composantes périodiques consiste à adopter des moyennes sur des parties homologues d'un nombre suffisant de périodes.

Ces deux rythmes définis, la différence qui subsiste avec la variation réelle du facteur climatologique considéré présente une allure telle qu'il est difficile d'y déceler d'autres périodes fondamentales. Il reste à définir des corrélations avec d'autres phénomènes, d'ordre astronomique par exemple, telle que celle qui semble avoir été établie entre le rythme apparemment irrégulier, à période moyenne de onze ans, des taches solaires, et les variations de températures et de précipitations dans les régions tropicales.

La périodicité du climat est d'une telle importance pour l'étude de l'habitation, que nous avons décidé de la soumettre à l'analyse de FOURIER. Cette démarche est justifiée par la convergence généralement rapide de la série à partir de la sinusoïde fondamentale, et aussi par la souplesse qu'elle prête à l'analyse des variations climatologiques de l'habitation à l'aide d'équations différentielles.

En vue d'une utilisation pratique dans l'étude poursuivie ici, nous adoptons la méthode suivante.

Supposons que nous disposions d'enregistrements continus d'une variable climatique ( $X$ ) pendant un intervalle de plusieurs années. Pour définir une composante « périodique » annuelle correspondant à cet intervalle, nous pouvons chercher la moyenne de  $X$  à une date donnée, sur les différentes années. La succession discrète de ces moyennes définit une variation annuelle type, qui pourra être représentée par une série de FOURIER sur cette base d'une année. Le grand nombre des points obtenus de cette manière, ainsi que l'existence d'années bissextiles, conduisent à préférer la subdivision de l'année en un nombre plus petit d'intervalles, par exemple en décades, en quinzaines ou en mois. Chaque mois de l'année type est alors caractérisé par la moyenne prise sur les différentes années d'observation, des moyennes mensuelles de  $X$ .

Supposons que nous disposions ainsi de  $n$  points équidistants  $X_0, X_1 \dots X_{n-1}$ .

Représentons  $X$  par la série :

$$X = A_0 + \sum_{q=1}^{\infty} A_q \cos \frac{2\pi qt}{\tau} + \sum_{q=1}^{\infty} B_q \sin \frac{2\pi qt}{\tau} \quad (1)$$

les coefficients  $A$  et  $B$  se calculent dans notre cas par

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} X_k \quad (2)$$

$$A_q = \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} X_k \cos \frac{2kq\pi}{n} \quad (3)$$

$$B_q = \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} X_k \sin \frac{2kq\pi}{n} \quad (4)$$

L'utilisation des tables de POLLAK [18], particulièrement celles correspondant à 12 ou à 24 intervalles permettent une évaluation rapide à partir des coefficients  $\cos (2kq\pi/n)$  et  $\sin (2kq\pi/n)$ . Le nombre de coefficients de FOURIER calculables dépend évidemment du nombre  $n$  de points  $X_q$ .

Sur cette variation annuelle ( $\tau =$  un an), nous superposons une variation diurne dont la composante périodique est définie par exemple d'heure en heure par la moyenne des valeurs de  $X$  à une heure donnée, moyenne prise soit sur une semaine ou sur toutes les semaines homologues des différentes années d'observation, soit sur un mois, etc. Une série de la forme (1) sera encore une fois utilisée, mais avec  $\tau = J = 24$  heures.

On définira souvent de cette façon l'évolution périodique type durant la journée pour un mois donné de l'année ; la modification que subit cette évolution d'un mois à l'autre peut être considérée comme une modulation en amplitude et en phase, suivant la saison, des différentes composantes sinusoidales de la série de FOURIER.

Si les opérations de moyennes ont été faites sur les parties homologues d'un nombre suffisant d'années, on pourra, au besoin, définir cette modulation des coefficients de FOURIER par de nouvelles séries de FOURIER établies sur une base annuelle.

Il peut être intéressant dans ce cas de mettre en évidence les amplitudes et les déphasages des différentes harmoniques de la série représentée par (1).

En l'écrivant sous la forme :

$$X = A_0 + \sum_{q=1}^{\infty} a_q \sin \left( \frac{2\pi qt}{\tau} + \phi_q \right) \quad (5)$$

l'amplitude  $a_q$  est donnée par :  $a_q = (A_q^2 + B_q^2)^{\frac{1}{2}}$  (6)

et le déphasage  $\phi_q$  par :  $\tan \phi_q = A_q/B_q$ . (7)

Il est généralement intéressant de construire le vecteur de longueur  $a_q$  et d'angle polaire  $\phi_q$ , et d'en observer l'évolution suivant l'époque et l'endroit étudiés.

Posons

$$X_q(t) = a_q \sin \left( \frac{2\pi qt}{\tau} + \phi_q \right) = A_q \cos \left( \frac{2\pi qt}{\tau} \right) + B_q \sin \left( \frac{2\pi qt}{\tau} \right)$$

Dans la figure 1, la grandeur  $X_q(t)$  est la projection sur l'axe des  $A_q$  du vecteur de composantes  $(A_q, B_q)$ .

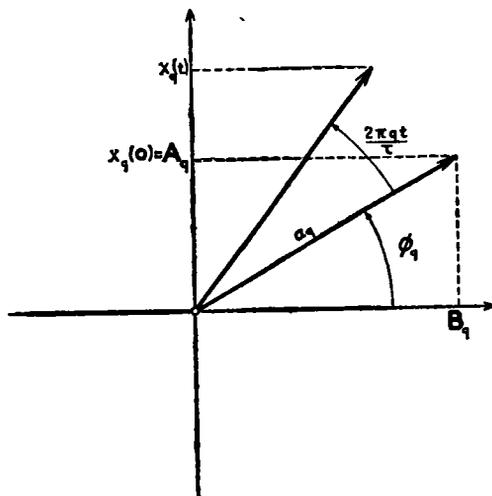


FIG. 1. — Représentation de la fonction sinusoidale  $X_q(t)$  par la projection d'un vecteur tournant.

Si ce vecteur tourne dans le sens antihorlogique, à l'instant  $t$  correspond l'angle de rotation  $2\pi qt/\tau$  et la grandeur  $X_q$  est toujours donnée par la projection de ce vecteur sur l'axe des  $A_q$ . On remarque que le vecteur fait  $q$  tours sur l'intervalle de temps  $\tau = 24$  heures.

Ce que nous en dirons à propos des variations du rayonnement global et des températures permettra de mieux éclairer ces différents points.

## 2.2 Classification des climats.

Il est important pour l'étude de l'habitation de pouvoir caractériser de façon satisfaisante les différents climats envisagés. Il est évidemment nécessaire, pour éviter toute erreur, de disposer de données d'observations suffisamment complètes et précises pendant des laps de temps suffisamment longs, ce qui implique l'installation de stations climatologiques nombreuses et bien

équipées sur toute la région à étudier. Point n'est nécessaire de dire que, en ce qui concerne l'Afrique centrale, comme pour la plupart des régions du globe, on en est encore loin, si l'on vise une description réellement détaillée.

D'autre part on remarque qu'avec un nombre relativement élevé de variables, il est difficile, sans entrer dans des complications inextricables, d'opérer une classification qui tienne compte de tous les facteurs. Aussi cette classification doit-elle être définie en fonction d'un objectif bien défini. Quant au comportement climatologique de l'habitation, les facteurs température (T), humidité (H), ventilation (V) et radiation (R) sont considérés comme les plus importants.

Parmi les classifications existantes et les mieux connues qui soient utilisables dans notre cas, la plus intéressante semble être celle de KOEPPEN [2], qui définit cinq classes principales de climats (de A à E), se subdivisant en plusieurs zones climatiques. Parmi celles-ci, rappelons (E. BERNARD [3] et BULTOT [4]), qu'on peut distinguer au Congo :

1) La zone Af (forêt tropicale pluvieuse), à cheval sur l'équateur, entre les parallèles 2°N et 2°S, environ ; c'est la zone équatoriale couverte par la forêt ombrophile et soumise à de fortes précipitations ;

2) Les zones Am, s'étendant de part et d'autre de Af et délimitant à peu près le domaine de la forêt. Il s'agit de zones de transition ; la bande méridionale est plus étroite ;

3) Les zones Aw, caractérisées par un climat de savane, sous ses différentes formes. La subdivision de Aw<sub>2</sub> à Aw<sub>6</sub> effectuée par BULTOT, suivant le nombre de mois de saisons sèches, donne des bandes qui vont en s'étageant à partir des zones Am, de Aw<sub>2</sub> à Aw<sub>6</sub> au Sud jusqu'au voisinage d'Élisabethville, et de Aw<sub>2</sub> à Aw<sub>3</sub> au Nord.

Les zones  $Aw_3$  (Ruanda) et  $Aw_4$  (Urundi) apparaissent également sur les plateaux à l'est de la Colonie, tandis qu'à l'Ouest, la zone  $Aw_4$  comprend la région de Léopoldville et le Mayumbe, région côtière couverte de forêts ;

4) Les zones  $C_r$  et  $C_w$  sont représentées par les régions d'altitude de l'Est. Elles correspondent aux forêts de bambous et aux savanes.

Il est évident que cette classification est nettement orientée par l'étude de l'adaptation des végétaux au climat. A cet égard il semblerait que la classification de THORNTHWAITE, basée sur la notion de précipitation effective, soit plus significative [5].

Ce qui a été dit au chapitre précédent (et ce qui ressortira de l'analyse du comportement thermique de l'habitation), suggère fortement une classification qui fasse intervenir les amplitudes des premiers termes des séries de FOURIER, avec leurs déphasages. Les variations de ces grandeurs, qui pourraient être définies graphiquement par les déplacements des vecteurs représentatifs, ne se rapporteraient évidemment qu'aux composantes périodiques des fluctuations des facteurs climatologiques principaux : T, H, R et V ; mais il existe actuellement trop peu de données sur ces grandeurs pour développer ce point de manière satisfaisante.

### 2.3 *Le rayonnement solaire.*

En ce qui concerne l'étude actuelle, il faut surtout déplorer l'absence de données solides et détaillées sur le climat de rayonnement solaire du Congo.

Malgré l'intérêt intrinsèque de mesures continues dans différentes longueurs d'onde, et à l'encontre de ce qui se passe en écobiologie, le problème écologique de l'habitation ne demande pas tant une étude des variations du spectre de radiation solaire que des données sur la variation de l'intensité globale dans le temps et l'espace.

Il n'est pas question, en effet, de s'étendre sur la dépendance du coefficient d'absorption des matériaux à l'égard des longueurs d'onde, mais bien de pouvoir estimer à l'aide des indications fournies par des appareils enregistreurs suffisamment précis, la quantité totale de radiation absorbée par unité de temps, susceptible de se transformer en chaleur sur une paroi donnée.

Nous ne voulons pas nier par là l'appartenance de l'habitation au domaine écoclimatologique de l'homme, mais il importe de ne pas compliquer sans nécessité le problème déjà étonnamment complexe du comportement climatologique de l'habitation.

Autre chose est l'action du rayonnement sur les matériaux ; ce problème technologique important ne sera pas abordé dans le présent mémoire.

Parmi les rares sources d'information dont nous disposons sur le climat de radiation de l'Afrique centrale, citons les résultats publiés par SCAËTTA [6] après une mission écologique de 1927 à 1930 sur la dorsale Congo-Nil, ainsi que le travail de BERNARD [3] sur le climat de la Cuvette centrale. On trouvera dans ces ouvrages des considérations générales sur le climat tropical, qui seront supposées connues et qui ne seront pas reprises ici. Il s'agit généralement de données obtenues au lucimètre distillateur de BELLANI ; cet instrument totalisateur intègre en principe la courbe de la radiation totale matin et après-midi et l'on conçoit qu'il n'est pas possible de baser sur des données aussi espacées le calcul des coefficients d'une série de FOURIER qui devrait représenter la variation diurne de la radiation.

Des variations annuelles obtenues à l'aide d'appareils BELLANI sont données dans l'ouvrage de A. VANDENPLAS [8] ; nous pourrions soumettre ces chiffres à l'analyse de FOURIER, mais le manque d'uniformité des appareils utilisés nous dissuade d'utiliser des valeurs dont l'équivalence  $\text{cal}/\text{cm}^2$  est sujette à caution.

Il est vrai que le mémoire de M. SCAËTTA donne des répartitions horaires moyennes de l'insolation en différentes stations obtenues à partir de l'héliographe de CAMPBELL. Mais la combustion locale du papier ne se produit elle-même qu'à partir d'un certain niveau de radiation et nos observations tendent à montrer que ce niveau est sensiblement variable. D'autre part, il ne suffirait pas de multiplier les heures d'insolation par la radiation normale dépendant de la position du soleil, sans tenir compte de l'important facteur de l'opacité atmosphérique, lui-même variable avec les saisons, et sur lequel nous n'avons pas de données.

Le Service Météorologique du Congo belge a publié [14], pour 1951 et 1952, des mesures faites sur des pyranomètres du type EPPLEY, et donnant la variation par décade et par mois de la radiation globale sur une surface horizontale, ce qui nous permet de représenter la variation annuelle par des séries de FOURIER.

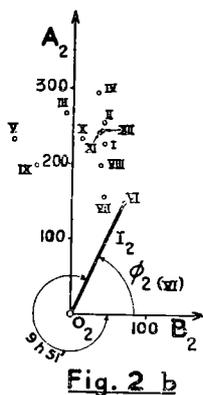
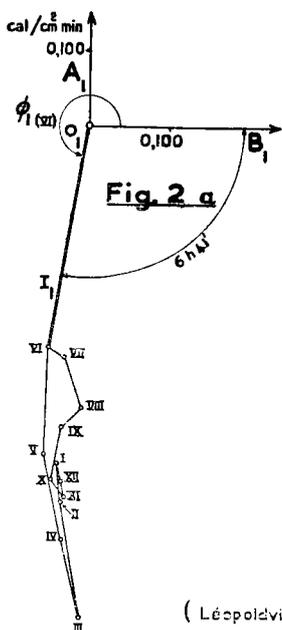
Les tableaux Ia et Ib donnent respectivement les coefficients (A, B) de la série (1) et les amplitudes et déphasages ( $a, \phi$ ) de la série (5), calculés à partir des moyennes mensuelles du rayonnement global à Léopoldville durant l'année 1952. Il est évident que la série de FOURIER, déterminée sur une seule année, n'a pas de valeur statistique ; elle donne cependant une idée de l'ordre de grandeur des coefficients.

La variation diurne du rayonnement global est également donnée de mois en mois par la publication [14] pour les années 1951 et 1952. Nous avons déterminé les coefficients des séries (1) et (5) pour chacun des mois de l'année 1952 (tableaux IIa et IIb).

Les *fig. 2a et 2b* donnent les vecteurs ( $A_1, B_1$ ) et ( $A_2, B_2$ ) ; on remarquera les déplacements caractéristiques des affixes de ces vecteurs au cours de l'année. Le diagramme 2a représente une rotation complète du vecteur polaire en 24 heures, tandis que le diagramme 2b qui

correspond à l'harmonique de fréquence double donne un tour complet en 12 heures. Dans le tableau IIb on a donné pour chacun de ces vecteurs l'heure de la journée ( $t_1$  et  $t_2$ ) correspondant au début de la sinusoïde, dans le sens croissant ; on l'obtient en calculant l'expression

$$t_q = \frac{2\pi - \phi_q}{2\pi} \cdot \frac{24 h}{q} , (q = 1 \text{ ou } 2).$$



( Léopoldville, 1952 )

FIG. 2. — Extrémités des deux premiers vecteurs tournants, déduits de la périodicité diurne moyenne du rayonnement global à Léopoldville, pour les différents mois (de I à XII) de l'année 1952.

On remarque le groupement caractéristique des affixes pour ces deux premières harmoniques ; l'amplitude de l'harmonique fondamentale varie du simple au double entre les mois de juin et de mars.

Du point de vue technique, la variation diurne la plus intéressante pour l'étude de l'habitation est celle qui lui impose la sollicitation thermique la plus intense.

Il est donc intéressant de choisir pour chaque mois

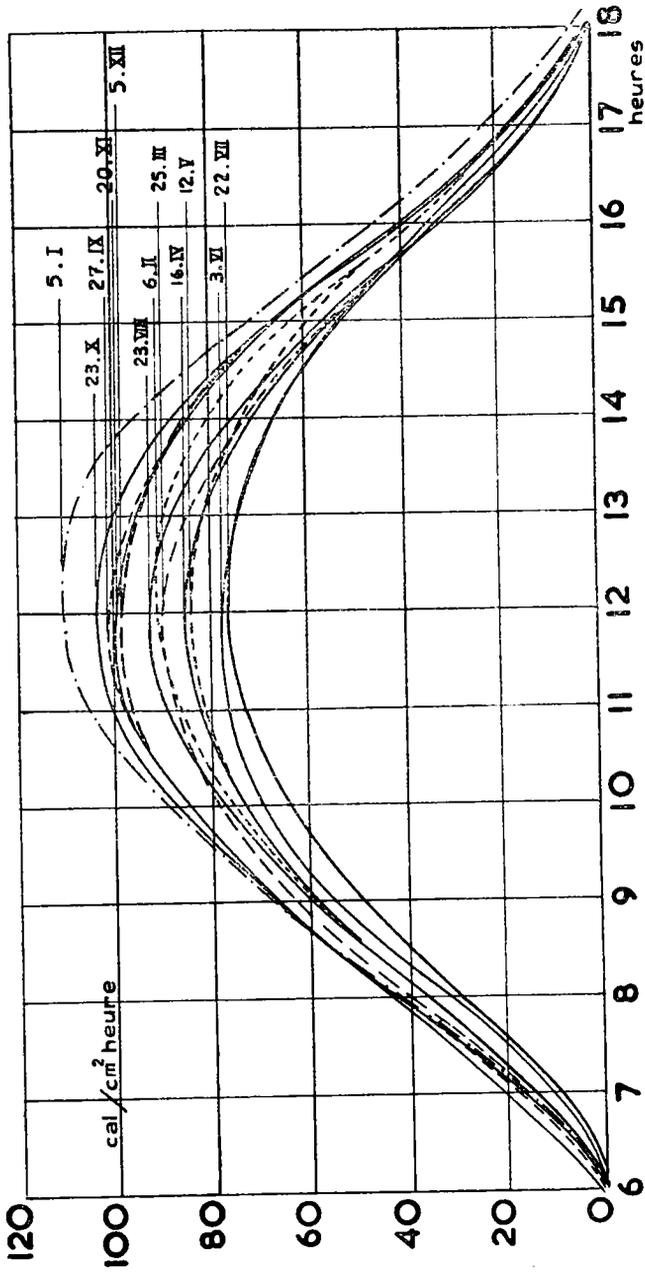


FIG. 3. — Variations diurnes du rayonnement global, enregistrées à la Station I.R.S.A.C de Lwiro (province du Kivu), durant douze journées sereines de l'année 1953, choisies parmi les douze mois.

TABLEAU Ia.

TABLEAU I (cal/cm<sup>2</sup>)

TABLEAU Ib.

A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	a <sub>1</sub>	tg φ <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	tg φ <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>2</sub> /a <sub>1</sub>	a <sub>3</sub> /a <sub>1</sub>	a <sub>4</sub> /a <sub>1</sub>
377,00	75,35	14,13	-52,26	11,19	-10,00	-15,67	-1,92	8,80	70,6	5,33	53,5	4,67	18,6	9,0	0,699	0,243	0,117

Variation annuelle du rayonnement global à Léopoldville (1952)

Tableau IIa (mcal/cm<sup>2</sup> min.)

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>0</sub>	272,92	305,12	342,87	332,75	262,21	178,58	185,87	215,25	245,79	287,46	303,00	286,83
A <sub>1</sub>	-446,76	-498,42	-652,08	-548,70	-433,89	-291,39	-304,97	-372,96	-399,19	-468,42	-481,04	-470,09
B <sub>1</sub>	-30,95	-30,38	-6,01	-31,36	-56,26	-52,81	-28,76	-5,70	-34,40	-45,34	-29,39	-31,03
A <sub>2</sub>	+226,47	+254,87	+267,96	+290,41	+232,54	+146,51	+156,88	+190,78	+196,18	+234,93	+241,33	+242,76
B <sub>2</sub>	+42,67	+41,03	-10,00	+33,73	-79,91	+69,88	+43,81	+38,23	-49,92	+13,75	+35,67	+39,27
A <sub>3</sub>	-46,43	-51,29	-50,65	-69,39	-58,73	-24,57	-30,54	-47,83	-27,74	-41,06	-36,39	-52,39
B <sub>3</sub>	-32,92	-93,82	-32,92	-18,48	-66,60	-48,58	-35,19	-31,88	-23,12	-27,26	-20,43	-24,43
A <sub>4</sub>	-21,07	+48,07	-8,41	-23,27	+11,47	-20,67	-1,62	-12,37	-33,25	-27,12	-33,04	-18,97
B <sub>4</sub>	+13,85	+13,92	+24,46	-7,43	+38,18	+16,02	+17,82	+17,68	+3,32	-4,55	+1,08	+2,97

Tableau IIb.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
a <sub>1</sub>	447,8	499,4	652,1	549,6	437,5	296,2	306,3	373,4	340,7	470,6	491,9	471,1
tg φ <sub>1</sub>	14,43	16,41	108,50	17,50	7,71	5,52	10,60	65,43	11,60	10,35	16,71	15,15
t <sub>1</sub>	6 h 16	6 h 14	6 h 02	6 h 13	6 h 30	6 h 38	6 h 22	6 h 03	6 h 20	6 h 22	6 h 14	6 h 15
a <sub>2</sub>	230,6	258,2	269,8	292,4	233,9	162,3	163,0	194,6	202,2	235,3	244,0	246,0
tg φ <sub>2</sub>	6,24	6,21	-26,80	8,61	-2,91	2,10	3,58	4,99	-3,93	17,09	6,79	6,18
t <sub>2</sub>	9 h 18	9 h 18	8 h 56	9 h 13	8 h 22	9 h 51	9 h 31	9 h 23	8 h 31	9 h 07	9 h 17	9 h 18
a <sub>3</sub>	56,9	107,0	60,4	71,9	88,9	54,5	46,6	57,5	36,1	49,3	41,7	57,8
a <sub>4</sub>	25,7	50,1	25,8	24,4	39,9	26,2	17,9	21,6	33,2	27,5	33,1	19,2
a <sub>2</sub> /a <sub>1</sub>	0,515	0,517	0,414	0,532	0,535	0,548	0,532	0,521	0,593	0,500	0,496	0,522
a <sub>3</sub> /a <sub>1</sub>	0,127	0,214	0,093	0,131	0,203	0,184	0,152	0,154	0,106	0,105	0,085	0,123
a <sub>4</sub> /a <sub>1</sub>	0,057	0,100	0,039	0,044	0,091	0,088	0,058	0,058	0,097	0,058	0,067	0,041

Variation diurne du rayonnement global à Léopoldville pour les différents mois de l'année 1952.



Tableau IIIb.

Dates	5-1-53	6-2-53	25-3-53	16-4-53	12-5-53	3-6-53	22-7-53	23-8-53	27-9-53	23-10-53	20-11-53	5-12-53
A <sub>0</sub>	32,54	27,75	27,75	26,12	25,75	23,62	22,62	26,42	29,96	30,50	29,87	29,50
A <sub>1</sub>	- 52,62	- 44,96	- 43,81	- 41,56	- 41,25	- 37,93	- 36,62	- 43,33	- 48,45	- 49,68	- 48,16	- 33,74
B <sub>1</sub>	- 2,21	- 1,36	- 1,36	- 1,09	- 1,04	- 0,60	- 1,62	+ 0,81	+ 0,29	+ 0,65	+ 0,80	+ 0,18
A <sub>2</sub>	+ 25,56	+ 21,91	+ 19,94	+ 19,86	+ 15,96	+ 9,56	+ 18,06	+ 22,15	+ 21,75	+ 24,64	+ 22,96	+ 21,33
B <sub>2</sub>	+ 2,38	+ 1,90	+ 0,34	+ 0,52	+ 0,27	- 0,04	+ 1,49	- 0,76	- 0,43	- 0,68	- 0,56	- 0,15
A <sub>3</sub>	- 3,74	- 2,90	- 2,09	- 2,01	- 1,94	- 1,98	- 2,77	- 4,04	- 2,89	- 4,50	- 2,50	- 2,72
B <sub>3</sub>	- 0,81	- 1,39	+ 1,52	+ 0,63	+ 1,18	+ 1,06	- 0,25	+ 0,07	+ 0,22	+ 0,19	- 0,26	- 0,04
A <sub>4</sub>	- 3,09	- 3,77	- 2,91	- 2,58	- 3,90	- 3,25	- 2,45	- 2,75	- 3,66	- 3,77	- 4,33	- 3,90
B <sub>4</sub>	- 1,28	- 0,42	- 0,48	- 0,56	- 0,98	- 1,00	- 0,31	+ 0,38	- 0,68	+ 0,22	+ 0,55	+ 0,14

Tableau IIIc.

Dates	5-1-53	6-2-53	25-3-53	16-4-53	12-5-53	3-6-53	22-7-53	23-8-53	27-9-53	23-10-53	20-11-53	5-12-53
a <sub>1</sub>	52,7	45,0	43,9	41,6	41,3	37,9	36,7	43,3	48,5	49,7	48,2	33,7
tg φ <sub>1</sub>	23,81	33,06	32,21	38,13	39,66	63,22	22,60	- 53,49	- 167,07	- 76,43	- 60,20	- 187,44
t <sub>1</sub>	6 h 10	6 h 07	6 h 07	6 h 06	6 h 06	6 h 04	6 h 10	5 h 56	5 h 59	5 h 57	5 h 56	5 h 59
a <sub>2</sub>	25,7	22,0	19,9	19,9	16,0	9,6	18,1	22,2	21,8	24,7	23,0	21,3
tg φ <sub>2</sub>	10,74	11,53	58,65	38,94	59,11	- 239,00	12,12	29,14	- 50,58	- 36,23	- 41,00	- 142,20
t <sub>2</sub>	9 h 11	9 h 10	9 h 02	9 h 03	9 h 02	9 h 00	9 h 10	8 h 56	8 h 58	8 h 57	8 h 57	8 h 59
a <sub>3</sub>	3,82	3,52	2,58	2,11	2,27	2,24	2,78	4,04	2,80	4,51	2,52	2,72
a <sub>4</sub>	3,34	3,79	2,95	2,64	4,02	3,40	2,47	2,78	3,72	3,78	4,36	3,90
a <sub>2</sub> /a <sub>1</sub>	0,488	0,489	0,453	0,478	0,387	0,253	0,493	0,513	0,449	0,497	0,477	0,632
a <sub>3</sub> /a <sub>1</sub>	0,725	0,782	0,588	0,507	0,550	0,591	0,757	0,933	0,577	0,907	0,523	0,807
a <sub>4</sub> /a <sub>1</sub>	0,634	0,842	0,672	0,635	0,973	0,897	0,673	0,642	0,767	0,760	0,904	1,157

un enregistrement type correspondant à un jour serein ; pareille courbe se reconnaît par une évolution régulière qui s'étend en « dos d'âne » sur toute la journée (de 6 heures à 18 heures en région équatoriale).

Au besoin, le meilleur enregistrement choisi pourra être rectifié par le tracé d'une courbe enveloppe, de façon à éliminer les chutes passagères de l'intensité. Nous obtenons de cette manière la variation du rayonnement maximum, compte tenu du facteur d'opacité particulier à la saison. Ce choix a été effectué parmi les enregistrements effectués à la Station de Rayonnement de l'I. R. S. A. C. à Lwiro, pour les différents mois de l'année 1953. Les intensités horaires ont été planimétrées ; elles apparaissent dans le tableau IIIa et sont rapportées aux heures 6.00 h, 7.00 h, etc... sur la *fig. 3* <sup>(1)</sup>.

Remarquons qu'il n'a pas été tenu compte du rayonnement nocturne des objets terrestres ; ce dernier s'effectue dans la gamme des grandes longueurs d'onde, à cause de la température peu élevée de ces objets. Remarquons aussi qu'il ne peut devenir négatif que par temps couvert. Ce rayonnement, dont la mesure est délicate, peut atteindre des valeurs de 0,15 à 0,20 cal/cm<sup>2</sup>/min ; nous négligeons provisoirement ce facteur qui, dans les régions tropicales, constitue de toute façon, par ciel serein, un élément favorable du point de vue thermique.

Le tableau IIIb donne les coefficients  $A_q$  et  $B_q$  de l'expression (1) calculés à partir du tableau I. Le tableau IIIc donne les amplitudes  $a_q$  ainsi que les déphasages  $\phi_q$

(1) Les chiffres du tableau IIIa nous ont été fournis par M. BONNET, assistant technique au laboratoire de Rayonnement de Lwiro. Il suffit de les diviser par 60 pour obtenir les intensités (moyennes horaires) en cal/cm<sup>2</sup>/min. Les quelques irrégularités qui apparaissent dans certaines courbes de la *fig. 3* pourraient être dues à des modifications passagères de la transparence de l'atmosphère devant le soleil. Pareilles irrégularités disparaissent sur des courbes de variations moyennes, mensuelles par exemple. On remarquera particulièrement les courbes maxima (5 janvier) et minima (22 juillet). Nous ne cherchons pas à séparer ici l'influence de la hauteur du soleil de celle du degré de transparence de l'air, variable avec les saisons et en corrélation avec l'alternance des périodes de pluies et de sécheresse.

par leurs tangentes. Notons en passant que la périodicité de cette série de FOURIER n'a de sens que si nous admettons qu'une succession de jours sereins puisse se produire.

La *fig. 4* donne les affixes des vecteurs  $(a_1, \phi_1)$  et  $(a_2, \phi_2)$ .

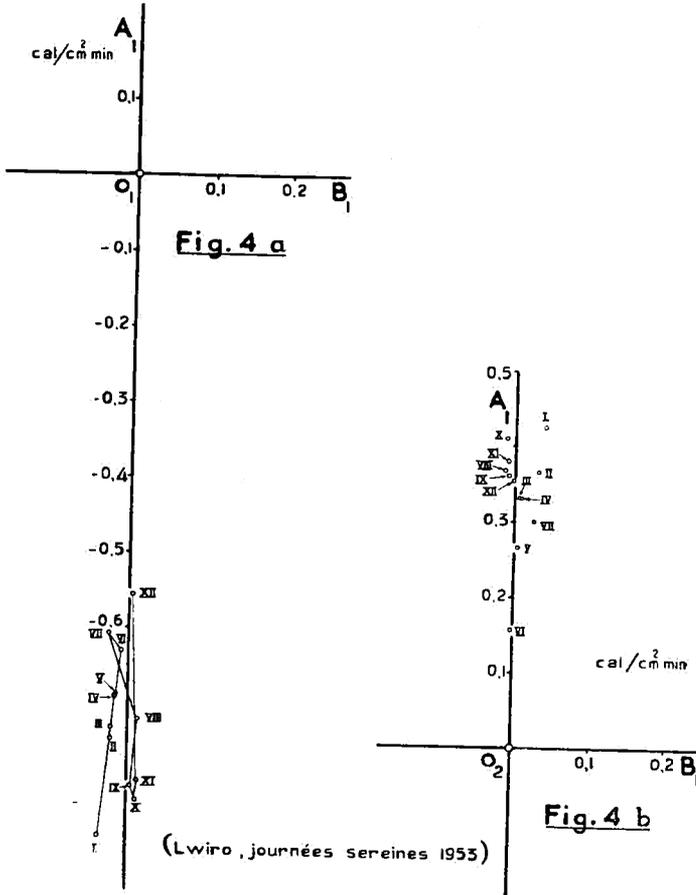


FIG. 4. — Extrémités des deux premiers vecteurs (*a* : sinusoïde fondamentale, *b* : deuxième harmonique) relatifs à la variation diurne du rayonnement global à Lwiro (Kivu), durant des journées sereines choisies dans les douze mois (de I à XII).

L'un des objectifs à atteindre, pour permettre l'application de notre étude aux différentes régions de la

Colonie, consiste en l'obtention de données suffisantes sur le climat de radiation de ces régions, de façon à pouvoir déterminer les premiers termes des séries de FOURIER du type précédent.

D'une manière plus générale, l'absence de données suffisantes sur le climat de rayonnement dans différentes régions de la Colonie est regrettable, puisqu'il s'agit là en somme de l'élément moteur qui, en principe, doit permettre de mieux comprendre l'économie de toutes les autres modifications climatologiques.

Sans nous attarder davantage à ce point de vue important pour le météorologiste, nous considérerons dans la suite les autres facteurs climatologiques d'un endroit donné comme des variables indépendantes qu'il s'agit de mesurer, ou de prévoir, à partir de données statistiques suffisantes.

Remarquons cependant ici que, d'une façon générale, la périodicité du climat de radiation reparait de façon évidente dans l'évolution des autres facteurs climatiques qui en dépendent.

Parmi ces facteurs, le plus important pour nous est la température de l'air mesurée à l'ombre.

#### *2.4 La température.*

On dispose sur le régime des température au Congo belge, d'une série de données utilisables dans notre étude. Nous emploierons dans ce chapitre les résultats publiés par VANDENPLAS [7] et en particulier les tableaux de moyennes bi-horaires mois par mois, relatifs aux stations suivantes :

- a) Eala (moyennes relatives à l'année 1935) ;
- b) Stanleyville (année 1912) ;
- c) Kongolo (année 1930) ;
- d) Léopoldville (années 1936 à 1939) ;
- e) Elisabethville (année 1912) ;
- f) Tshibinda (années 1930 à 1932).

Il s'agit de températures mesurées à l'ombre, à environ 1,50 m du sol ; ces dernières constituent des valeurs moyennes intéressantes, si l'on considère la hauteur normale de petites habitations. Notons en passant que la mesure de la variation de la température en hauteur, au-dessus du sol, demande un appareillage beaucoup plus précis que celui utilisé jusqu'à présent.

Les températures sont données dans la publication [7] (pp. 65-67) en dixièmes de degré ; pour ne pas ajouter à l'approximation des mesures une dispersion provenant des calculs, ceux-ci ont été effectués avec un nombre supérieur de décimales.

Le calcul des coefficients  $A_p$  et  $B_p$  de la série (1) nous a fourni les tableaux IVa à IVf.

Le calcul des amplitudes  $a_p$  de la série (5) demande le calcul de leurs carrés, selon la formule (6) ; ces carrés, avec leur somme, sont consignés dans les tableaux Va à Vf.

Les amplitudes  $a_p$  ( $p = 1$  à 4) et les tangentes des déphasages  $\phi_p$  ( $p = 1$  à 2), sont indiquées dans les tableaux VIa à VI f, en même temps que les moments de la journée donnés par les angles  $\phi_p$ , qui marquent le début des sinusoïdes correspondantes. (La détermination de ces moments a été facilitée par le tracé des diagrammes reproduits aux fig. 20 (a et b), et valables pour  $A_1$  et  $B_1$  tous deux négatifs).

Étant donné le rôle que joue la température dans notre étude, il est intéressant de s'assurer de ce qu'aucun des termes  $a_p$  d'ordre supérieur ne puisse prendre de valeur importante.

On peut obtenir une mesure de l'approximation atteinte à l'aide d'un nombre fini de termes, par la différence  $\sigma'^2$  entre le carré de la dispersion de l'évolution diurne autour de la température moyenne et la demi-somme des carrés des amplitudes :

$$\sigma'^2 = \sigma^2 - \frac{1}{2} \sum a_p^2 \quad (8)$$

Le calcul des carrés de la dispersion des valeurs bi-horaires  $X_i$  ( $i = 1$  à  $12$ ), telles qu'elles sont données par M. VANDENPLAS, autour des moyennes  $A_0$ , est indiqué par la formule :

$$\sigma^2 = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (A_0 - X_i)^2$$

Il a été effectué pour les différents tableaux de températures publiés dans [7], ce qui donne les résultats consignés aux tableaux VIIa à VIIf.

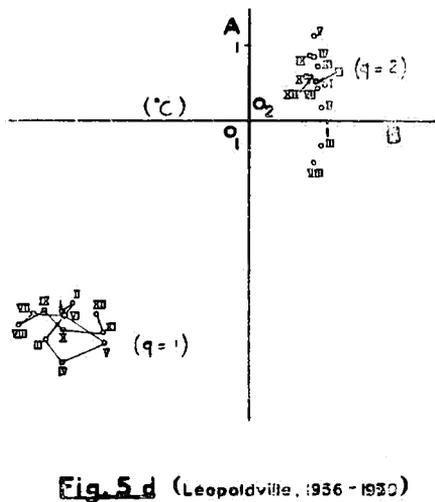
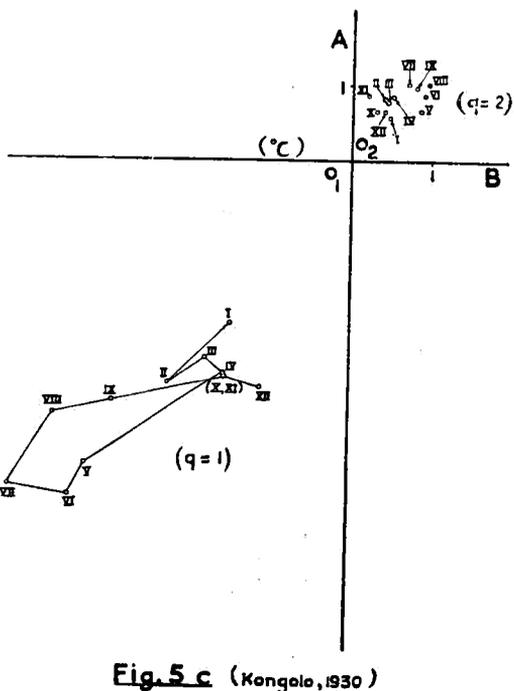
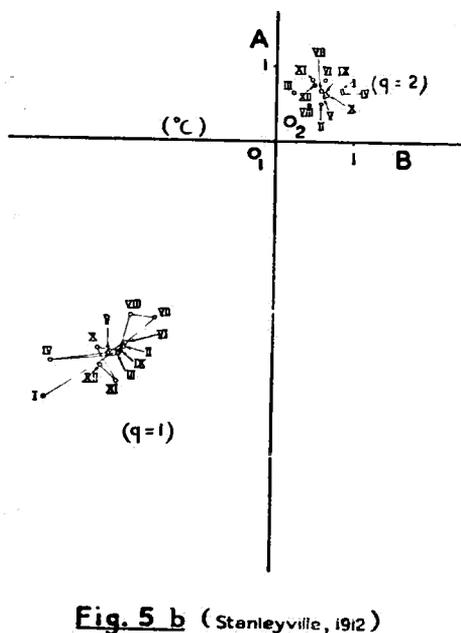
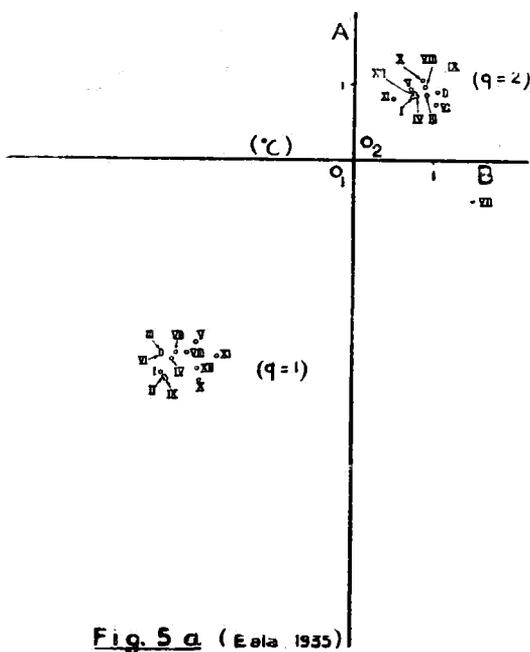
L'inspection de ces chiffres révèle la bonne concordance qui apparaît entre les variations diurnes de températures extérieures et leur approximation par une série de FOURIER à nombre réduit de termes. On peut se convaincre de l'influence généralement très faible des termes d'amplitudes  $a_3$  et  $a_4$  ; ces derniers pourront en général être complètement négligés dans l'étude pratique du comportement thermique de l'habitation.

Les diagrammes polaires des deux premiers vecteurs  $(a_1, \phi_1)$  et  $(a_2, \phi_2)$  sont reproduits dans les *fig. 5a* à *5f* pour les différentes stations considérées.

Les points correspondant aux différents mois ont été marqués par les chiffres romains de I à XII. Rappelons que les vecteurs définis par les affixes ( $q = 2$ ) tournent à une vitesse double de celle des vecteurs principaux ( $q = 1$ ), et effectuent une rotation complète en 12 heures.

Ces diagrammes sont remarquables, tout d'abord par la disposition des points représentatifs pour les deux premières harmoniques. Les affixes relatives à l'harmonique 2 se placent avec une certaine dispersion relative dans le premier quadrant pour Eala, Stanleyville, Kongolo et Élisabethville ; ils tendent à avancer vers le deuxième quadrant à Tshibinda et à reculer vers le quatrième à Léopoldville.

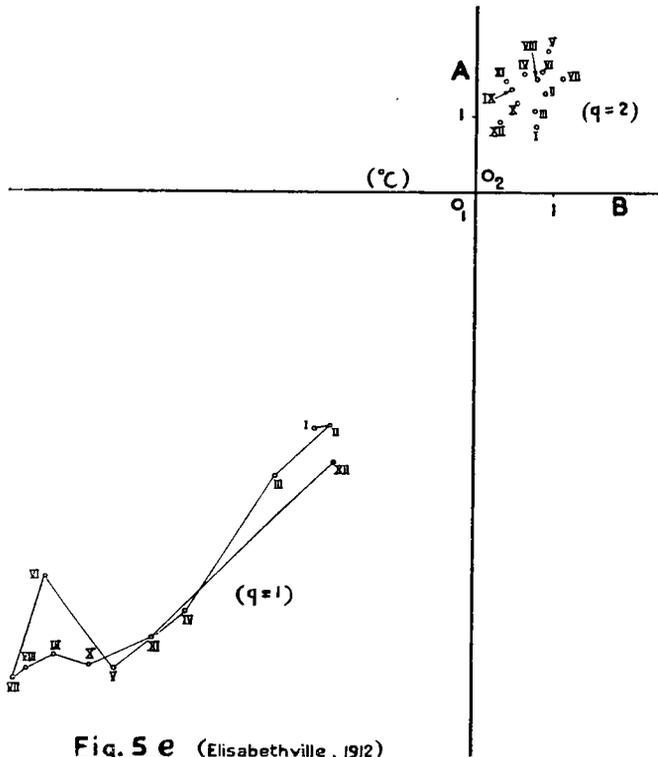
Une comparaison stricte des angles de phase des différents diagrammes demanderait que l'on tienne compte chaque fois de l'heure locale astronomique.



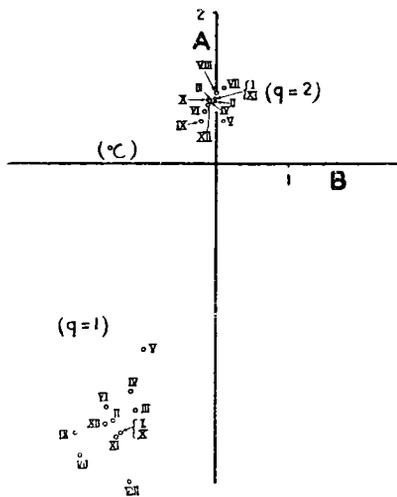
**Fig. 5 c** (Kongolo, 1930)

**Fig. 5 d** (Leopoldville, 1936-1937)

FIG. 5 (p. 29-30). — Affixes des vecteurs représentant les deux premières sinusoides ( $q = 1$  et  $2$ ) des variations diurnes moyennes de la température à l'ombre pour les 12 mois de l'année (de I à XII), en différents points du Congo belge.



**Fig. 5 e** (Elisabethville, 1912)



**Fig. 5 f** (Tshibinda, 1930-1932)

EALA (1935).  
Tableau IVa.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>0</sub>	25,80	25,09	25,72	25,30	25,35	25,14	25,25	24,72	25,26	24,55	23,99	24,96
A <sub>1</sub>	- 2,85	- 2,91	- 2,57	- 2,66	- 2,45	- 2,61	- 2,59	- 2,59	- 2,94	- 2,96	- 2,62	- 2,80
B <sub>1</sub>	- 2,52	- 2,47	- 2,50	- 2,36	- 2,03	- 2,51	- 2,31	- 2,18	- 2,45	- 2,00	- 1,78	- 2,04
A <sub>2</sub>	+ 0,85	+ 0,92	+ 0,87	+ 0,86	+ 0,95	+ 0,74	+ 0,54	+ 0,97	+ 1,19	+ 1,06	+ 0,80	+ 0,90
B <sub>2</sub>	+ 0,72	+ 1,05	+ 0,91	+ 0,76	+ 0,72	+ 1,02	+ 1,50	+ 0,83	+ 1,12	+ 0,85	+ 0,50	+ 0,77
A <sub>3</sub>	+ 0,07	+ 0,02	+ 0,02	+ 0,07	+ 0,33	+ 0,23	+ 0,25	+ 0,09	+ 0,22	+ 0,03	- 0,07	+ 0,01
B <sub>3</sub>	0,00	0,00	- 0,15	- 0,07	- 0,18	- 0,32	- 0,25	- 0,22	- 0,27	- 0,23	+ 0,12	- 0,01
A <sub>4</sub>	- 0,37	- 0,21	- 0,48	- 0,27	- 0,30	- 0,44	- 0,51	- 0,36	- 0,43	- 0,32	- 0,08	- 0,17
B <sub>4</sub>	- 0,12	- 0,13	- 0,13	- 0,20	0,00	- 0,01	+ 0,02	+ 0,03	- 0,06	+ 0,04	- 0,19	- 0,08

Tableau Va.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>1</sub> <sup>2</sup>	8,1225	8,4681	5,6949	7,0756	6,0025	6,8121	6,7081	6,7081	8,6436	8,7616	6,8644	7,8400
B <sub>1</sub> <sup>2</sup>	6,3504	6,1009	6,2509	5,5696	4,1209	6,3001	5,3361	4,7524	6,0025	4,0000	3,1684	4,1616
A <sub>2</sub> <sup>2</sup>	0,7225	0,8464	0,7569	0,7396	0,9025	0,5476	0,2916	0,9409	1,4161	1,1236	0,6400	0,8100
B <sub>2</sub> <sup>2</sup>	0,5184	1,1025	0,8281	0,5776	0,5184	1,0404	2,2500	0,6889	1,2544	0,7225	0,2500	0,5929
A <sub>3</sub> <sup>2</sup>	0,0049	0,0004	0,0004	0,0049	0,1089	0,0329	0,9625	0,0081	0,0484	0,0009	0,0049	0,0001
B <sub>3</sub> <sup>2</sup>	0,0000	0,0000	0,0225	0,0049	0,0324	0,1021	0,9625	0,0484	0,0729	0,0529	0,0144	0,0001
A <sub>4</sub> <sup>2</sup>	0,1369	0,0441	0,2301	0,0729	0,0900	0,1936	0,2601	0,1296	0,1849	0,1024	0,0064	0,0289
B <sub>4</sub> <sup>2</sup>	0,0144	0,0169	0,0169	0,0400	0,0000	0,0001	0,0004	0,0009	0,0036	0,0016	0,0361	0,0064
Σ	15,8700	16,5793	14,7101	14,0851	11,7756	15,0492	14,9713	13,2773	17,6264	14,7655	10,9846	13,4400

STANLEYVILLE (1952).  
Tableau IVb.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>0</sub>	24,50	23,98	22,69	25,74	24,42	23,59	23,34	23,25	23,53	24,08	23,92	23,97
A <sub>1</sub>	- 3,46	- 2,72	- 2,87	- 2,97	- 2,85	- 2,72	- 2,37	- 2,33	- 2,83	- 2,79	- 3,23	- 3,02
B <sub>1</sub>	- 3,00	- 1,97	- 2,04	- 2,92	- 2,16	- 1,95	- 2,05	- 1,88	- 2,06	- 2,31	- 2,06	- 2,27
A <sub>2</sub>	+ 0,69	+ 0,50	+ 0,64	+ 0,67	+ 0,57	+ 0,81	+ 0,67	+ 0,48	+ 0,73	+ 0,62	+ 0,84	+ 0,75
B <sub>2</sub>	+ 0,82	+ 0,58	- 0,22	+ 0,85	+ 0,62	+ 0,62	+ 0,58	+ 0,43	+ 0,61	+ 0,65	+ 0,46	+ 0,48
A <sub>3</sub>	+ 0,02	+ 0,33	+ 0,18	+ 0,10	+ 0,05	0,00	+ 0,09	+ 0,22	+ 0,13	+ 0,18	+ 0,18	+ 0,17
B <sub>3</sub>	- 0,12	+ 0,13	+ 0,20	+ 0,02	+ 0,10	+ 0,05	+ 0,02	+ 0,12	- 0,07	+ 0,05	+ 0,01	+ 0,15
A <sub>4</sub>	- 0,17	- 0,25	- 0,24	- 0,27	- 0,02	- 0,14	- 0,17	- 0,25	- 0,28	- 0,22	- 0,32	- 0,50
B <sub>4</sub>	- 0,01	- 0,08	- 0,15	- 0,10	+ 0,01	- 0,01	- 0,08	- 0,03	+ 0,06	- 0,02	- 0,01	- 0,01

STANLEYVILLE.  
Tableau Vb.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>1</sub> <sup>2</sup>	11,9716	7,3981	8,2369	8,8209	8,1225	7,3984	5,6169	5,4289	8,0089	7,7841	10,4329	9,1204
B <sub>1</sub> <sup>2</sup>	9,0000	3,8809	4,1616	8,5264	4,6656	3,8025	4,2025	3,5344	4,0000	5,3361	4,2436	5,1529
A <sub>2</sub> <sup>2</sup>	0,4761	0,2500	0,4096	0,4489	0,3249	0,6561	0,4489	0,2304	0,5329	0,3844	0,7056	0,5625
B <sub>2</sub> <sup>2</sup>	0,6724	0,3364	0,0484	0,7225	0,3844	0,3844	0,3364	0,1849	0,3721	0,4225	0,2116	0,2304
A <sub>3</sub> <sup>2</sup>	0,0004	0,1089	0,0324	0,0100	0,0025	0,0000	0,0081	0,0484	0,0196	0,0324	0,0324	0,0289
B <sub>3</sub> <sup>2</sup>	0,0144	0,0169	0,0400	0,0004	0,0100	0,0025	0,0004	0,0144	0,0049	0,0025	0,0001	0,0225
A <sub>4</sub> <sup>2</sup>	0,0289	0,0625	0,0576	0,0729	0,0004	0,0196	0,0289	0,0625	0,0784	0,0484	0,0784	0,0900
B <sub>4</sub> <sup>2</sup>	0,0001	0,0064	0,0225	0,0100	0,0001	0,0001	0,0064	0,0009	0,0036	0,0004	0,0001	0,0001
Σ	22,1639	12,0604	13,0090	18,6120	13,5104	12,2636	10,6485	9,5048	13,0204	14,0108	15,7047	15,2077

KONGOLO (1930).  
Tableau IVc.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Jun	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>0</sub>	24,48	25,62	24,96	24,70	26,16	25,02	25,20	25,99	26,42	25,32	24,86	25,46
A <sub>1</sub>	- 2,17	- 2,97	- 2,64	- 2,83	- 4,06	- 4,49	- 4,36	- 3,40	- 3,22	- 2,88	- 2,90	- 3,01
B <sub>1</sub>	- 1,59	- 2,39	- 1,90	- 1,66	- 3,47	- 3,67	- 4,43	- 3,89	- 3,13	- 1,63	- 1,63	- 2,19
A <sub>2</sub>	+ 0,60	+ 0,84	+ 0,79	+ 0,85	+ 0,67	+ 0,88	+ 1,02	+ 1,04	+ 0,97	+ 0,67	+ 0,88	+ 0,66
B <sub>2</sub>	+ 0,46	+ 0,39	+ 0,43	+ 0,49	+ 0,85	+ 0,78	+ 0,69	+ 0,94	+ 0,79	+ 0,29	+ 0,20	+ 0,39
A <sub>3</sub>	- 0,10	- 0,12	- 0,10	- 0,12	+ 0,23	+ 0,17	+ 0,18	- 0,07	- 0,12	- 0,22	0,00	- 0,12
B <sub>3</sub>	- 0,17	- 0,07	+ 0,15	+ 0,12	+ 0,38	+ 0,45	+ 0,33	+ 0,28	+ 0,13	+ 0,25	+ 0,25	+ 0,10
A <sub>4</sub>	+ 0,08	+ 0,31	- 0,06	- 0,20	- 0,26	- 0,20	- 0,25	- 0,42	- 0,13	- 0,27	- 0,12	+ 0,24
B <sub>4</sub>	- 0,17	- 0,24	- 0,13	- 0,06	+ 0,24	- 0,06	- 0,11	- 0,33	- 0,13	- 0,09	- 0,09	+ 0,01

KONGOLO.

Tableau Vc.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Jun	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sup>1</sup>	4,7089	8,8209	6,9696	8,0089	16,4836	20,1601	19,0096	11,5600	9,7344	8,2944	8,4100	9,0601
B <sup>1</sup>	2,5281	5,7121	3,6100	2,7556	12,0409	13,4689	19,6249	15,1321	9,7969	2,6569	2,6569	4,7962
A <sup>2</sup>	0,3600	0,7056	0,6241	0,7225	0,4489	0,7744	1,0404	1,0816	0,9409	0,4489	0,7744	0,4356
B <sup>2</sup>	0,2116	0,1521	0,1849	0,2401	0,7225	0,6084	0,4761	0,8836	0,6241	0,0841	0,0400	0,1521
A <sup>3</sup>	0,0100	0,0144	0,0100	0,0144	0,0529	0,0289	0,0324	0,0049	0,0144	0,0484	0,0000	0,0144
B <sup>3</sup>	0,0289	0,0049	0,0225	0,0144	0,1444	0,2025	0,1089	0,0784	0,0169	0,0625	0,0625	0,0100
A <sup>4</sup>	0,0064	0,0961	0,0036	0,0400	0,0676	0,0400	0,0625	0,1764	0,0169	0,0729	0,0144	0,0576
B <sup>4</sup>	0,0289	0,0576	0,0169	0,0036	0,0576	0,0036	0,0121	0,1089	0,0169	0,0081	0,0081	0,0001
Σ	7,8828	15,5637	11,4416	11,7995	30,0184	35,2868	40,3669	29,0259	21,1614	11,6762	11,9663	14,5260

## LÉOPOLDVILLE (1936 à 1939).

## Tableau IVd.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>0</sub>	24,77	25,08	25,04	25,09	24,56	23,10	21,19	22,35	23,84	24,56	24,43	24,35
A <sub>1</sub>	- 2,56	- 2,41	- 2,86	- 3,21	- 2,96	- 2,58	- 2,56	- 2,70	- 2,53	- 2,79	- 2,83	- 2,55
B <sub>1</sub>	- 2,48	- 2,32	- 2,68	- 2,49	- 1,91	- 2,46	- 2,81	- 3,00	- 2,70	- 2,46	- 1,93	- 2,02
A <sub>2</sub>	+ 0,49	+ 0,18	- 0,62	+ 0,87	+ 1,15	+ 0,54	+ 0,45	- 0,55	+ 0,88	+ 0,60	+ 0,73	+ 0,58
B <sub>2</sub>	+ 0,97	+ 0,92	+ 0,92	+ 0,81	+ 0,82	+ 0,85	+ 0,86	+ 0,71	+ 0,76	+ 0,72	+ 0,87	+ 0,78
A <sub>3</sub>	+ 0,25	+ 0,18	+ 0,18	+ 0,07	+ 0,13	+ 0,25	+ 0,18	+ 0,18	+ 0,18	+ 0,28	+ 0,18	+ 0,18
B <sub>3</sub>	- 0,08	- 0,05	+ 0,02	- 0,02	- 0,20	- 0,08	- 0,13	- 0,05	+ 0,03	- 0,07	- 0,18	- 0,08
A <sub>4</sub>	- 0,19	- 0,30	- 0,18	- 0,22	- 0,54	- 0,19	- 0,18	- 0,18	- 0,29	- 0,28	- 0,57	- 0,20
B <sub>4</sub>	- 0,13	- 0,17	- 0,12	- 0,14	- 0,07	- 0,13	- 0,12	- 0,07	- 0,07	- 0,12	- 0,06	- 0,06

## LÉOPOLDVILLE.

## Tableau Vd.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>1</sub>	6,5536	5,8081	8,1796	10,3041	8,7616	6,6564	6,5536	7,3411	6,4009	7,7841	8,0089	6,5025
B <sub>1</sub>	5,1504	5,3824	7,1824	6,2001	3,6481	6,0516	7,8961	9,0000	7,2900	6,0516	3,7249	4,0804
A <sub>2</sub>	0,2401	0,0324	0,3844	0,7569	1,3225	0,1916	0,2025	0,3025	0,7744	0,3600	0,5329	0,8464
B <sub>2</sub>	0,9409	0,8464	0,8464	0,6561	0,6724	0,7225	0,7396	0,6241	0,5776	0,5184	0,7569	0,3364
A <sub>3</sub>	0,0625	0,0324	0,0324	0,0049	0,0169	0,0025	0,0324	0,0324	0,0324	0,0784	0,0324	0,0324
B <sub>3</sub>	0,0064	0,0025	0,0004	0,0004	0,0400	0,0064	0,0169	0,0025	0,0009	0,0049	0,0324	0,0064
A <sub>4</sub>	0,0361	0,0300	0,0324	0,0484	0,2916	0,0361	0,0324	0,0324	0,0841	0,0784	0,3249	0,0400
B <sub>4</sub>	0,0169	0,0289	0,0147	0,0196	0,0049	0,0169	0,0144	0,0049	0,0049	0,0144	0,0036	0,0036
Σ	14,0069	12,2231	16,0724	17,9905	14,7580	13,8440	15,4879	17,3429	15,1652	14,8902	13,4169	11,8481

ÉLISABETHVILLE (1912).

Tableau IVe.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>0</sub>	20,72	20,47	20,54	20,44	18,50	15,14	14,24	16,77	20,75	22,36	22,82	19,86
A <sub>1</sub>	- 3,16	3,11	- 3,79	- 5,59	- 6,33	- 5,11	- 6,48	- 6,35	- 6,15	- 6,30	- 5,94	- 3,59
B <sub>1</sub>	- 2,15	- 1,95	- 2,65	- 3,84	- 4,76	- 5,69	- 6,14	- 5,95	- 5,57	- 5,10	- 4,29	- 1,90
A <sub>2</sub>	+ 0,87	+ 1,32	+ 1,10	+ 1,57	+ 1,87	+ 1,61	+ 1,51	+ 1,50	+ 1,37	+ 1,20	+ 1,48	+ 0,95
B <sub>2</sub>	+ 0,79	+ 0,89	+ 0,75	+ 0,61	+ 0,94	+ 0,85	+ 1,11	+ 0,78	+ 0,43	+ 0,52	+ 0,37	+ 0,30
A <sub>3</sub>	+ 0,05	- 0,10	+ 0,05	+ 0,22	+ 0,18	+ 0,20	+ 0,23	+ 0,38	+ 0,59	+ 0,75	+ 0,40	+ 0,10
B <sub>3</sub>	+ 0,07	- 0,03	+ 0,40	+ 0,60	+ 0,62	+ 0,72	+ 0,82	+ 0,78	+ 0,65	+ 0,70	+ 0,50	+ 0,18
A <sub>4</sub>	- 0,12	- 0,28	- 0,22	- 0,51	- 0,53	- 0,39	- 0,29	- 0,35	- 0,54	- 0,48	+ 0,12	- 0,10
B <sub>4</sub>	- 0,16	- 0,18	- 0,26	- 0,29	- 0,48	- 0,33	- 0,42	+ 0,38	- 0,17	- 0,02	+ 0,09	- 0,04

ÉLISABETHVILLE.

Tableau Ve.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>1</sub>	9,9856	9,6721	14,3641	31,2481	40,0689	32,6041	41,9904	40,3225	37,8225	39,6900	35,2836	12,8881
B <sub>1</sub>	4,6225	3,8025	7,0225	14,7456	22,6576	32,3761	37,6996	35,4025	31,0249	26,0100	18,4041	3,6100
A <sub>2</sub>	0,7569	1,7424	1,2100	2,4619	3,4969	2,5921	2,2801	2,2500	1,8769	1,4400	2,1904	0,9025
B <sub>2</sub>	0,6241	0,7921	0,5625	0,3721	0,8836	0,7225	1,2321	0,6084	0,1849	0,2704	0,1369	0,0900
A <sub>3</sub>	0,0025	0,0100	0,0025	0,0481	0,0321	0,0400	0,0529	0,1414	0,3481	0,5625	0,1600	0,0100
B <sub>3</sub>	0,0049	0,0909	0,1600	0,3600	0,3814	0,5184	0,6724	0,6084	0,4225	0,4900	0,2500	0,0324
A <sub>4</sub>	0,0144	0,0729	0,0484	0,2601	0,2809	0,1521	0,0841	0,1225	0,2916	0,2304	0,0144	0,0100
B <sub>4</sub>	0,0256	0,0324	0,0676	0,0841	0,2304	0,1089	0,1764	0,1444	0,0289	0,0004	0,0049	0,0016
Σ	16,0365	16,1253	23,4376	49,5833	68,0351	69,1142	84,1880	79,6031	72,0003	68,6937	46,4303	17,5446

TSHIBINDA (1930 à 1932).  
Tableau IVf.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sub>0</sub>	15,43	15,41	15,20	15,44	14,99	14,45	14,15	14,67	15,47	15,16	14,92	15,31
A <sub>1</sub>	- 3,56	- 3,40	- 3,27	- 3,01	- 2,46	- 3,22	- 3,85	- 4,24	- 3,58	- 3,57	- 3,63	- 3,45
B <sub>1</sub>	- 1,22	- 1,32	- 1,01	- 1,08	- 0,93	- 1,41	- 1,78	- 2,10	- 1,84	- 1,21	- 1,29	- 1,43
A <sub>2</sub>	+ 0,87	+ 0,81	+ 0,86	+ 0,83	+ 0,57	+ 0,71	+ 1,01	+ 0,95	+ 0,58	+ 0,85	+ 0,86	+ 0,79
B <sub>2</sub>	- 0,01	- 0,01	- 0,07	- 0,07	+ 0,08	- 0,16	- 0,10	0,00	- 0,20	- 0,11	- 0,02	- 0,13
A <sub>3</sub>	+ 0,33	+ 0,28	+ 0,32	- 0,33	+ 0,25	+ 0,28	- 0,40	+ 0,60	+ 0,32	+ 0,50	+ 0,37	+ 0,30
B <sub>3</sub>	+ 0,07	+ 0,18	- 0,23	+ 0,15	- 0,13	+ 0,05	+ 0,27	+ 0,10	+ 0,50	+ 0,22	+ 0,18	+ 0,18
A <sub>4</sub>	- 0,36	- 0,36	- 0,37	- 0,34	- 0,27	- 0,34	- 0,42	- 0,55	+ 0,33	- 0,43	- 0,37	- 0,41
B <sub>4</sub>	- 0,08	+ 0,15	+ 0,07	- 0,07	0,00	- 0,07	- 0,07	+ 0,19	+ 0,11	- 0,09	- 0,21	+ 0,07

Tableau Vf.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
A <sup>1</sup>	12,6736	11,5600	10,6929	9,0601	6,0516	10,3684	14,8225	17,9776	12,8164	12,7449	13,1769	11,9025
B <sup>1</sup>	1,4884	1,7424	1,0201	1,1664	0,8649	1,9881	3,1684	4,4100	3,3856	1,4641	1,6641	2,0449
A <sup>2</sup>	0,7569	0,6561	0,7396	0,6889	0,3249	0,5041	1,0201	0,9025	0,3364	0,7225	0,7396	0,6241
B <sup>2</sup>	0,0001	0,0001	0,0049	0,0049	0,0064	0,0259	0,0100	0,0000	0,0400	0,0121	0,0004	0,0169
A <sup>3</sup>	0,1089	0,0784	0,1024	0,1024	0,0625	0,0784	0,1600	0,3600	0,1024	0,2500	0,1369	0,0900
B <sup>3</sup>	0,0049	0,0324	0,0529	0,0225	0,0169	0,0025	0,0729	0,0100	0,2500	0,0484	0,0324	0,0324
A <sup>4</sup>	0,1296	0,1296	0,1369	0,1156	0,0729	0,1156	0,1764	0,3025	0,1089	0,1849	0,1369	0,1681
B <sup>4</sup>	0,0064	0,0225	0,0049	0,0049	0,0000	0,0049	0,0049	0,0361	0,0121	0,0081	0,0441	0,0049
Σ	15,1688	14,2255	12,7546	11,1657	7,4001	13,0879	19,4352	23,9937	17,0518	15,4350	15,9313	14,8838

EALA (1935).

Tableau VIa.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$\lambda_0$	24,48	25,62	24,96	24,70	26,16	25,02	25,20	25,99	26,42	25,32	24,86	25,46
$a_1$	3,81	3,82	3,58	3,56	3,18	3,52	3,47	3,38	3,82	3,57	3,17	3,46
$tg \theta_1$	1,130	1,178	1,028	1,127	1,206	1,039	1,121	1,188	1,200	1,480	1,471	1,372
$t_1$	8 h 45	8 h 41	8 h 56	8 h 45	8 h 38	8 h 55	8 h 46	8 h 40	8 h 39	8 h 16	8 h 17	8 h 24
$a_2$	1,11	1,40	1,26	1,15	1,19	0,77	1,59	1,28	1,63	1,36	0,94	1,18
$tg \theta_2$	1,180	0,876	0,956	1,131	1,319	0,725	0,360	1,168	1,062	1,247	1,600	1,168
$t_2$	10 h 20	10 h 38	10 h 32	10 h 23	10 h 14	10 h 48	12 h 40	10 h 21	10 h 26	10 h 17	10 h 04	10 h 21
$a_3$	0,07	0,02	0,15	0,10	0,38	0,39	0,34	0,24	0,35	0,23	0,14	0,01
$a_4$	0,39	0,25	0,50	0,34	0,30	0,44	0,51	0,36	0,43	0,32	0,21	0,19
$a_2/a_1$	0,291	0,366	0,351	0,323	0,374	0,218	0,458	0,378	0,426	0,380	0,296	0,341
$a_3/a_1$	0,018	0,005	0,041	0,028	0,112	0,110	0,097	0,071	0,091	0,064	0,044	0,002
$a_4/a_1$	0,102	0,065	0,139	0,095	0,094	0,125	0,146	0,106	0,112	0,089	0,066	0,054

Tableau VIIa.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$\sigma^2$	7,9530	8,4167	7,3550	7,1750	5,9633	7,5316	7,8350	6,6431	8,9246	7,4975	5,6142	6,7398
$\frac{1}{2} \sum a_p^2$	7,9350	8,2896	7,3067	7,0425	5,8878	7,5246	7,4856	6,6386	8,8132	7,3827	5,4923	6,7200
$\sigma'^2$	0,0180	0,1271	0,0483	0,1325	0,0755	0,0070	0,3494	0,0045	0,1114	0,1148	0,1219	0,0198
$\sigma'^2/\sigma^2$	0,0022	0,0151	0,0065	0,0184	0,0126	0,0009	0,0445	0,0006	0,0124	0,0153	0,0217	0,0029

STANLEYVILLE (1912).  
Tableau VIb.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$\lambda_0$	24,50	23,98	22,69	25,74	24,42	23,59	23,34	23,25	23,53	24,08	23,92	23,97
$a_1$	4,58	3,36	3,52	4,16	3,57	3,35	3,13	2,99	3,46	3,62	3,83	3,78
$\lg \sigma_1$	1,153	1,380	1,406	1,017	1,319	1,394	1,156	1,239	1,415	1,207	1,567	1,330
$t_1$	8 h 43	8 h 23	8 h 21	8 h 57	8 h 29	8 h 23	8 h 43	8 h 35	8 h 21	8 h 38	8 h 10	8 h 28
$a_2$	1,07	0,77	0,68	1,08	0,84	1,02	0,89	0,65	0,95	0,90	0,96	0,89
$\lg \sigma_2$	0,841	0,862	2,909	0,788	0,919	1,306	1,155	1,116	1,196	0,953	1,826	1,562
$t_2$	10 h 40	10 h 39	9 h 51	10 h 44	10 h 35	10 h 15	10 h 22	10 h 23	10 h 20	10 h 32	9 h 57	10 h 05
$a_3$	0,12	0,35	0,27	0,10	0,11	0,05	0,09	0,25	0,16	0,19	0,18	0,23
$a_4$	0,17	0,26	0,28	0,29	0,02	0,14	0,19	0,25	0,29	0,22	0,28	0,30
$a_2/a_1$	0,233	0,229	0,193	0,259	0,235	0,304	0,284	0,217	0,274	0,248	0,250	0,235
$a_3/a_1$	0,026	0,101	0,076	0,024	0,030	0,014	0,028	0,083	0,046	0,052	0,046	0,060
$a_4/a_1$	0,037	0,077	0,079	0,069	0,005	0,041	0,060	0,083	0,083	0,060	0,073	0,079

Tableau VIIb.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$\sigma^2$	11,7717	6,5467	6,5758	9,3283	7,0858	6,1391	5,5602	5,5602	6,7068	7,0223	7,9236	7,6462
$\frac{1}{2} \Sigma a_i^2$	11,0818	6,0302	6,5045	9,3060	6,7552	6,1318	5,3242	4,7524	6,5102	7,0054	7,8523	7,6038
$\sigma'^2$	0,6899	0,5165	0,0713	0,0223	0,3306	0,0073	0,2360	0,8693	0,1966	0,0169	0,0713	0,0424
$\sigma'^2/\sigma^2$	0,0586	0,0788	0,0108	0,0023	0,0466	0,0011	0,0424	0,1546	0,0293	0,0024	0,0089	0,0055

KONGOLO (1930).  
Tableau VIc.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$A_0$	25,80	25,09	25,72	25,30	25,35	25,14	25,25	24,72	25,26	24,55	23,99	24,96
$a_1$	2,69	3,81	3,25	3,28	5,35	5,80	6,22	5,17	4,42	3,31	3,33	3,72
$tg \sigma_1$	1,364	1,242	1,389	1,704	1,170	1,223	0,984	0,874	1,028	1,766	1,779	1,374
$t_1$	8 h 25	8 h 35	8 h 23	8 h 02	8 h 42	8 h 36	9 h 01	9 h 16	8 h 55	7 h 58	7 h 58	8 h 24
$a_2$	0,76	0,93	0,90	0,98	1,08	1,18	1,23	1,40	1,25	0,73	0,90	0,77
$tg \sigma_2$	1,304	2,153	1,837	1,734	0,788	1,128	1,478	1,106	1,227	2,310	4,400	1,692
$t_2$	10 h 15	9 h 50	9 h 57	10 h 00	10 h 45	10 h 22	10 h 08	10 h 24	10 h 18	9 h 47	9 h 25	10 h 01
$a_3$	0,20	0,14	0,18	0,17	0,44	0,48	0,38	0,29	0,18	0,33	0,25	0,16
$a_4$	0,19	0,39	0,14	0,21	0,35	0,21	0,27	0,53	0,18	0,28	0,15	0,24
$a_2/a_1$	0,282	0,244	0,276	0,298	0,201	0,203	0,197	0,270	0,282	0,220	0,270	0,206
$a_3/a_1$	0,074	0,036	0,055	0,051	0,082	0,082	0,061	0,056	0,040	0,099	0,075	0,043
$a_4/a_1$	0,070	0,102	0,043	0,064	0,065	0,036	0,043	0,102	0,040	0,084	0,045	0,064

Tableau VIc.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$\sigma^2$	4,3481	7,9024	6,0258	5,9600	15,4891	17,7119	20,3819	14,9524	10,8269	6,5502	6,0474	7,4480
$\frac{1}{2} \Sigma \sigma_p^2$	3,9414	7,7828	5,7828	5,8778	15,0092	17,6434	20,1834	14,5129	10,5782	5,8381	5,9831	7,2630
$\sigma^2$	0,4067	0,1196	0,2430	0,0822	0,4799	0,0685	0,1985	0,4395	0,2487	0,7121	0,0643	0,1850
$\sigma^2/\sigma^2$	0,0935	0,0151	0,0403	0,0137	0,0309	0,0038	0,0097	0,0293	0,0229	0,1087	0,0106	0,0248

## LÉOPOLDVILLE (1936-1939).

## Tableau Vid.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	→ Juin	→ Juillet	→ Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$A_0$	24,77	25,08	25,04	25,09	24,56	23,10	21,19	22,35	23,84	24,56	24,43	24,35
$a_1$	3,56	3,34	3,92	3,94	3,52	3,56	3,80	4,04	3,70	3,72	3,42	3,25
$tg \theta_1$	1,032	1,038	1,067	1,289	1,549	1,048	0,911	0,900	0,927	1,134	1,466	1,262
$t_1$	8 h 56	8 h 56	8 h 52	8 h 31	8 h 11	8 h 54	9 h 11	9 h 12	9 h 07	8 h 45	8 h 17	8 h 33
$a_2$	1,09	0,94	1,11	1,19	1,41	0,96	0,97	0,96	1,16	0,94	1,13	1,09
$tg \omega_2$	0,505	0,195	- 0,673	1,074	1,402	0,635	0,523	0,774	1,157	0,833	0,839	0,743
$t_2$	11 h 05	11 h 38	13 h 08	10 h 26	10 h 11	10 h 55	11 h 08	13 h 15	10 h 22	10 h 41	10 h 40	10 h 47
$a_3$	0,26	0,19	0,18	0,07	0,24	0,26	0,22	0,19	0,18	0,29	0,25	0,20
$a_4$	0,23	0,34	0,22	0,26	0,54	0,23	0,22	0,19	0,30	0,30	0,57	0,21
$a_2/a_1$	0,305	0,281	0,283	0,302	0,400	0,269	0,255	0,237	0,313	0,252	0,330	0,335
$a_3/a_1$	0,073	0,056	0,045	0,017	0,068	0,073	0,057	0,047	0,048	0,077	0,073	0,061
$a_4/a_1$	0,064	0,102	0,056	0,065	0,153	0,064	0,057	0,047	0,081	0,080	0,134	0,064

## Tableau Vid.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	→ Juin	→ Juillet	→ Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$\sigma^2$	7,3336	6,5347	8,3374	8,9952	7,7656	7,3144	7,7474	8,7131	7,6441	7,6386	6,9689	6,0225
$\frac{1}{2} \Sigma a_p$	6,9854	6,1115	8,3362	8,9944	7,3790	6,9220	7,7438	8,6714	7,5826	7,4451	6,7084	5,9240
$\sigma'^2$	0,3482	0,4232	0,0012	0,0008	0,3866	0,3924	0,0036	0,0417	0,0615	0,1935	0,2605	0,0985
$(\sigma'^2 / \sigma^2)$	0,0474	0,0647	0,0001	0,0001	0,0497	0,0530	0,0004	0,0047	0,0080	0,0253	0,0373	0,1613

ÉLISABETHVILLE (1912).

Tableau VIe.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$A_0$	20,72	20,47	20,54	20,44	18,50	15,14	14,24	16,77	20,75	22,36	22,82	19,86
$a_1$	3,82	3,67	4,62	6,78	7,92	8,06	8,93	8,70	8,30	8,11	6,61	4,06
tg $\theta_1$	1,469	1,594	1,430	1,455	1,329	1,003	1,055	1,067	1,104	1,235	1,384	1,889
$t_1$	8 h 16	8 h 09	8 h 20	8 h 18	8 h 27	8 h 59	8 h 54	8 h 52	8 h 48	8 h 36	8 h 24	7 h 52
$a_2$	1,17	1,59	1,33	1,68	2,09	1,82	1,87	1,69	1,44	1,31	1,52	1,00
tg $\theta_2$	1,101	1,483	1,466	2,573	1,989	1,894	1,360	1,923	3,186	2,307	4,000	3,166
$t_2$	10 h 24	10 h 08	10 h 08	9 h 43	9 h 54	9 h 56	10 h 12	9 h 55	9 h 34	9 h 47	9 h 28	9 h 35
$a_3$	0,09	0,10	0,40	0,64	0,65	0,75	0,85	0,87	0,88	1,03	0,64	0,21
$a_4$	0,20	0,32	0,34	0,59	0,72	0,50	0,50	0,51	0,57	0,48	0,12	0,11
$a_2/a_1$	0,306	0,433	0,287	0,247	0,263	0,225	0,209	0,194	0,173	0,161	0,229	0,246
$a_3/a_1$	0,023	0,027	0,086	0,091	0,082	0,093	0,095	0,100	0,106	0,127	0,096	0,051
$a_4/a_1$	0,052	0,087	0,073	0,087	0,090	0,062	0,055	0,058	0,068	0,059	0,018	0,027

Tableau VIIe.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$a^2$	8,0336	8,0872	11,9474	24,8268	34,1010	34,6191	42,1274	38,9339	36,0939	35,5058	28,3437	8,7831
$\frac{1}{2} \sum a_i^2$	8,0182	8,0626	11,7188	24,7916	34,0175	34,5571	42,0940	38,8015	36,0001	35,3468	28,2221	8,7723
$\sigma^2$	0,0154	0,0246	0,2286	0,9352	0,0835	0,0620	0,0334	0,1324	0,0938	0,1590	0,1216	0,0108
$(\sigma^2/\sigma^2)$	0,0019	0,0030	0,0191	0,0014	0,0024	0,0017	0,0007	0,0034	0,0025	0,0044	0,0042	0,0012

TSHIBINDA (1930-1932).  
Tableau VI.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$A_0$	15,43	15,41	15,20	15,44	14,99	14,45	15,15	14,57	15,47	15,16	14,92	15,31
$a_1$	3,83	3,65	3,42	3,20	2,63	3,52	4,24	1,73	4,02	3,77	3,85	3,73
tg $\alpha_1$	2,918	2,576	3,238	2,787	2,615	2,284	2,163	2,019	1,946	2,950	2,814	2,412
$t_1$	7 h 16	7 h 26	7 h 04	7 h 20	7 h 23	7 h 35	7 h 40	7 h 46	7 h 49	7 h 15	7 h 19	7 h 31
$a_2$	0,87	0,81	0,86	0,83	0,58	0,73	1,02	0,95	0,61	0,86	0,86	0,80
tg $\alpha_2$	- 8,700	- 8,100	-12,286	-11,857	7,125	4,437	10,100	$\infty$	- 2,900	- 7,727	- 4,300	- 6,077
$t_2$	8 h 47	8 h 46	8 h 58	8 h 54	9 h 16	8 h 20	9 h 11	9 h 00	8 h 22	8 h 45	8 h 34	8 h 41
$a_3$	0,34	0,33	0,39	0,35	0,28	0,28	0,48	0,61	0,59	0,55	0,41	0,35
$a_4$	0,37	0,39	0,38	0,35	0,27	0,35	0,43	0,58	0,35	0,30	0,43	0,42
$a_2/a_1$	0,227	0,221	0,251	0,259	0,220	0,207	0,240	0,200	0,151	0,228	0,223	0,214
$a_3/a_1$	0,088	0,090	0,114	0,109	0,106	0,079	0,113	0,128	0,146	0,145	0,106	0,093
$a_4/a_1$	0,096	0,106	0,111	0,109	0,102	0,099	0,101	0,122	0,087	0,079	0,111	0,112

Tableau VIII.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
$\sigma^2$	7,7145	7,1341	6,4267	5,6359	3,7156	6,6248	9,8092	12,0399	9,0919	8,0240	8,0044	7,5778
$\frac{1}{2} \Sigma a_p^2$	7,5844	7,1127	6,3773	5,5828	3,7000	6,5439	9,7176	11,9993	8,5259	7,7175	7,9656	7,4415
$\sigma^2$	0,1301	0,0214	0,0494	0,0531	0,0156	0,0809	0,0916	0,0406	0,5660	0,3065	0,0388	0,1363
$\sigma^2/\sigma^2$	0,0168	0,0029	0,0076	0,0094	0,0041	0,0122	0,0093	0,0033	0,0662	0,0381	0,0048	0,0179

Quant aux affixes de la première harmonique, ils sont fort groupés dans le troisième quadrant à Eala, Stanleyville et Léopoldville, qui montrent ici une nette parenté ; à Tshibinda se marque encore une tendance à l'avance de phase, tandis qu'à Kongolo, le groupement s'étire radialement, caractéristique qui s'affirme de façon encore plus remarquable à Élisabethville, bien connue pour ses écarts saisonniers de température. En ces deux derniers endroits, les plus éloignés de l'Équateur, apparaît une véritable trajectoire en forme de 8, liée aux variations saisonnières à ces latitudes.

Un coup d'œil à la *fig. 19*, qui reproduit les différentes zones climatiques de KOEPPEN [4], montre que la correspondance de ces zones avec les caractéristiques de températures révélées par les diagrammes 5a à 5f n'est pas bonne.

Ce résultat n'est pas étonnant si l'on songe que la classification de KOEPPEN ne tient compte que des précipitations et des températures moyennes ; elle ne fait pas intervenir directement les amplitudes de températures, par ailleurs si importantes dans notre cas.

### 2.5 Régime des vents.

La ventilation à l'intérieur des habitations est en relation directe avec le vent extérieur et dépend aussi bien de sa direction que de son intensité. Par ailleurs, nous verrons que les échanges thermiques entre les parois et l'air ambiant dépendent, sur les faces extérieures, du vent, alors que, sur les faces intérieures, elles sont surtout influencées par le renouvellement d'air par ventilation.

L'étude du régime des vents dans un endroit donné révèle en général une périodicité saisonnière et une périodicité diurne.

Les variations annuelles concernent de vastes régions qui peuvent être soumises à de grands courants, dont

les trois principaux sont, suivant diverses régions du Congo belge et suivant les saisons :

- a) Les vents de l'Océan Atlantique : mousson S.-W. ou alizé S.-E. incurvé vers la dépression équatoriale ;
- b) L'alizé S.-E. de l'Océan Indien ;
- c) Le courant sec venant du Soudan.

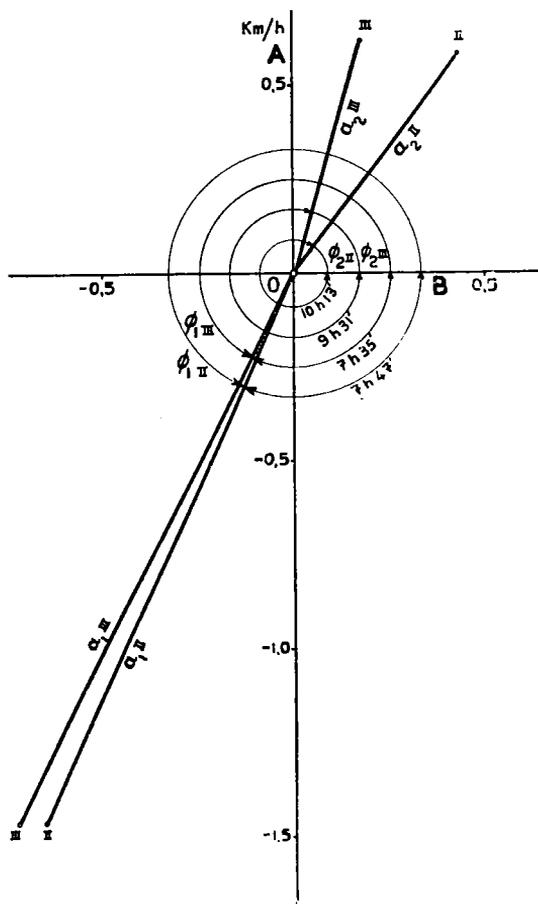


FIG. 6. — Deux premières composantes harmoniques du vent à Lwiro, mois de février et de mars 1954.

Quant aux variations diurnes, elles dépendent surtout de la topographie ; rappelons l'alternance de la brise

Tableau VIII.

Heures	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
2.1954	1,92	2,04	1,89	2,09	1,93	6,39	8,19	8,39	7,00	3,75	2,71	2,25	1,90
3.1954	1,51	1,44	1,42	1,40	2,45	6,20	9,01	8,20	5,87	3,82	3,83	2,02	1,53

Mesures anémométriques (500 m/heure), Lwiro, février et mars 1954.

Tableau IX.

	Février		Mars	
	Février	Mars	Février	Mars
$A_0$	4,04	3,93	—	—
$A_1$	-2,92	-2,92	$a_1$	3,20
$B_1$	-1,31	-1,46	$\text{tg } \theta_1$	2,30
$A_2$	+1,17	+1,24	$t_1$	7 h 35
$B_2$	+0,87	+0,35	$a_2$	1,46
$A_3$	-0,32	-0,74	$\text{tg } \theta_2$	1,34
$B_3$	-0,09	-0,03	$t_2$	10 h 13
$A_4$	-0,05	+0,14	$a_3$	0,33
$B_4$	-0,35	+0,06	$a_4$	0,35
—	—	—	$a_2/a_1$	0,456
—	—	—	$a_3/a_1$	0,103
—	—	—	$a_4/a_1$	0,109

Coefficients ( $A_p, B_p$ ) de la série de FOURIER (1) et amplitudes  $a_q$  et déphasages  $\phi_q$  de la série sous sa forme (5), relatifs à la variation moyenne du vent à Lwiro (Kivu) durant les mois de février (II) et mars (III) 1954. L'unité correspond à 500 m/heure.

diurne de vallée et de la brise nocturne de montagne dans les pays à haut relief, ainsi que celle du vent de mer ou de lac soufflant le jour et du vent de terre soufflant la nuit au bord de grandes étendues d'eau.

Mais d'une façon générale, il est bien connu qu'il apparaît normalement sur les continents un maximum de brise au début de l'après-midi. Ce phénomène est un effet de la convection thermique et se trouve vérifié par des observations triquotidiennes effectuées à Eala (1933 à 1939, [3]) ; la basse atmosphère y semble généralement plus calme la nuit que le jour, et le maximum de brise se manifeste au milieu de la journée.

Des données suffisamment détaillées nous font malheureusement défaut en ce qui concerne les différentes régions de la Colonie et il ne nous est possible que de donner un seul exemple tiré des enregistrements fournis par l'anémographe de la Station climatologique de l'I. R. S. A. C. à Lwiro.

Le dépouillement des anémogrammes montre qu'à Lwiro, la brise diurne souffle presque toujours du lac (E.-W.), tandis que, pendant la nuit, le sens normal est W.-E.

Nous ne tenons compte dans les tableaux suivants que de l'intensité, sans nous soucier du sens, ni même de la direction pratiquement constante. L'anémographe de Lwiro totalise ses enregistrements et permet des mesures bi-horaires aisées, à partir desquelles des moyennes mensuelles ont été déduites (Tableau VIII), pour les mois de février et mars 1954.

Les coefficients  $A_p$  et  $B_p$  de la série de FOURIER (1) sont donnés par le tableau IX.

A partir de ces valeurs, les amplitudes et déphasage qui apparaissent dans (5) ont été calculés et portés dans le tableau X.

Les vecteurs  $(a_1, \phi_1)$  et  $(a_2, \phi_2)$  ont été tracés dans la fig. 6 pour les deux mois considérés.

## 2.6 Humidité.

Il va sans dire qu'après la température, l'humidité est un facteur important pour le confort humain.

Elle apparaît surtout comme liée au régime des températures et des convections.

On la caractérise souvent par l'humidité relative, grandeur qui est enregistrée directement par les thermohygrographes à cheveux. On sait que l'humidité relative  $H_r$ , exprimée en pour cent, peut être définie en fonction de la tension de vapeur d'eau  $e$  par la formule :

$$H_r = 100 \frac{e}{E}$$

dans laquelle  $e$  et  $E$  représentent respectivement la tension actuelle et la tension maximum de la vapeur d'eau dans l'air à la même température.

Il semble bien établi que c'est la tension de vapeur  $e$ , et non l'humidité relative  $H_r$ , qui caractérise le mieux le rôle de l'humidité, aussi bien dans la sensation de confort humain que dans l'écologie des végétaux.

La grandeur  $H_r$  dépend fortement de la température par la tension maximum  $E$  ; elle présente sur les thermohygrogrammes des variations caractéristiquement inverses de celles de la température.

Comme les autres facteurs climatologiques déjà considérés, l'humidité présente une variation moyenne à double périodicité, saisonnière et diurne.

On trouvera des valeurs moyennes mensuelles de la tension de vapeur pour différents points de la Colonie dans un ouvrage de A. VANDENPLAS [8] (p. 42). Nous nous contenterons de calculer les premiers termes des séries de FOURIER pour les variations annuelles à Eala, Tshibinda, Léopoldville et Elisabethville.

Les tableaux XIIa et XIIb donnent respectivement les premiers coefficients (A, B) et ( $a, \phi$ ) des formules

(1) et (5), et la fig. 7 (a et b) reproduit les vecteurs correspondant aux deux premiers termes.

Ces figures mettent en évidence de façon fort suggestive les différences dans la variation de la tension de vapeur d'une région à l'autre.

Tableau XIIa (mm).

*Variation annuelle de la tension de vapeur d'eau.*

	Eala	Tshibinda	Léopoldville	Elisabethville
A <sub>0</sub>	20,67	11,38	19,48	12,42
A <sub>1</sub>	+ 0,27	- 0,84	+ 1,49	+ 3,76
B <sub>1</sub>	- 0,36	+ 0,65	+ 0,63	+ 1,47
A <sub>2</sub>	- 0,07	- 0,44	- 1,02	- 0,49
B <sub>2</sub>	- 0,17	+ 0,54	- 0,68	- 0,19
A <sub>3</sub>	+ 0,15	+ 0,20	+ 0,22	- 0,35
B <sub>3</sub>	+ 0,05	+ 0,07	+ 0,18	+ 0,47
A <sub>4</sub>	- 0,18	- 0,09	- 0,06	+ 0,17
B <sub>4</sub>	- 0,12	+ 0,70	- 0,01	+ 0,16

Tableau XIIb.

	Eala	Tshibinda	Léopoldville	Élisabethville
a <sub>1</sub>	0,450	1,062	1,618	4,038
tg α <sub>1</sub>	-0,750	-1,292	+2,365	+2,558
a <sub>2</sub>	0,184	0,697	1,227	0,526
tg α <sub>2</sub>	+0,412	-0,815	+1,500	+2,579
a <sub>3</sub>	0,158	0,212	0,284	0,586
a <sub>4</sub>	0,216	0,706	0,061	0,234
a <sub>2</sub> /a <sub>1</sub>	0,409	0,656	0,758	0,130
a <sub>3</sub> /a <sub>1</sub>	0,351	0,200	0,176	0,145
a <sub>4</sub> /a <sub>1</sub>	0,480	0,665	0,038	0,058

En ce qui concerne les variations diurnes, nous ne disposons que de peu de données sur la tension de vapeur. On ne peut, sans précautions, déduire des valeurs bi-horaires prises en moyenne sur un mois et des valeurs analogues de la température dont dépend la tension de vapeur saturée E, les moyennes bi-horaires de e. On a, en effet, en désignant par des barres l'opération de moyenne :

$$\bar{e} = \frac{\bar{E} \cdot \bar{Hr}}{100} \neq \frac{\bar{E} \cdot \bar{Hr}}{100}$$

Contentons-nous ici de suivre la variation diurne de la tension de vapeur à Eala, à partir des valeurs bi-horaires mentionnées par BERNARD [3] et correspondant à des moyennes annuelles.

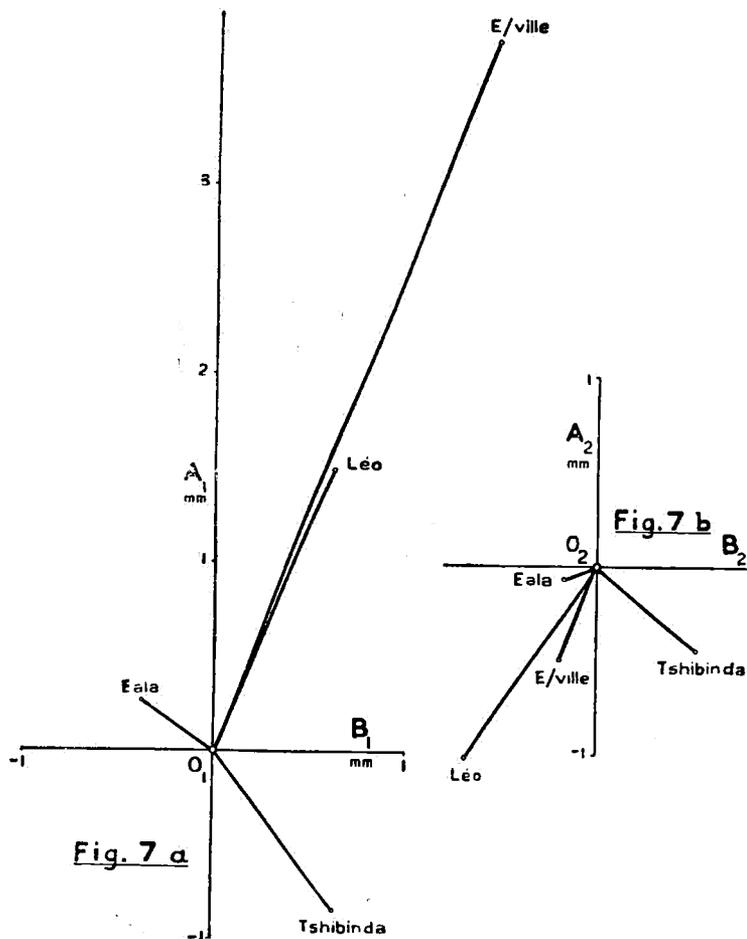


FIG. 7. — Deux premières composantes harmoniques des variations annuelles de la tension de vapeur en quatre points du Congo belge.

Il est intéressant d'évaluer l'importance des premiers termes de la série de FOURIER qui représente la variation de la tension de vapeur, à partir des valeurs suivantes :

Tableau XIII.

*Moyennes annuelles de la variation diurne de la tension de vapeur à Eala.*

Heures	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$e$ mm	18,0	17,4	17,1	16,8	18,4	21,1	21,3	20,8	20,6	21,6	19,7	18,6

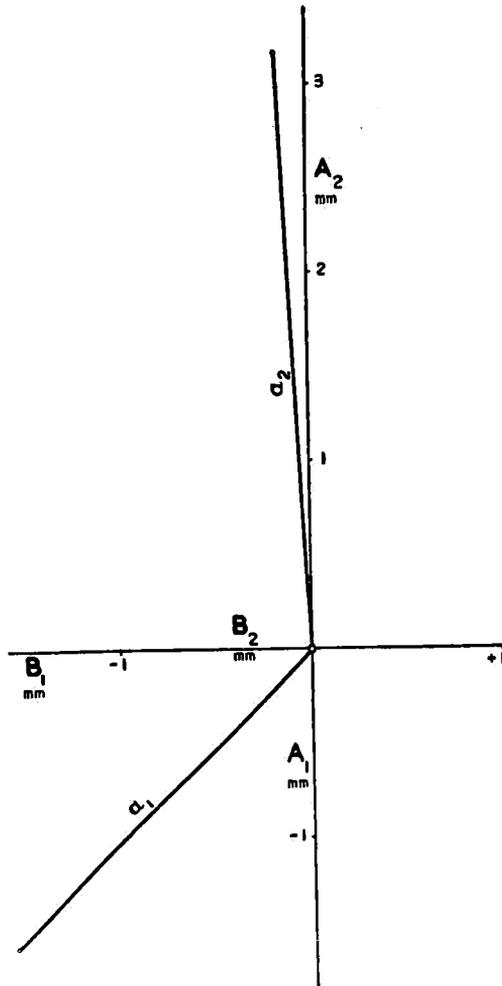


FIG. 8. — Deux premières composantes harmoniques de la variation diurne, de la tension de vapeur à Eala (Moyennes annuelles).

Les tableaux XIV et XV reproduisent les coefficients (A, B) et ( $a$ ,  $\phi$ ) des séries de FOURIER (1) et (5), calculés à partir de ces valeurs. La fig. 8 représente les vecteurs correspondants.

L'évolution de l'humidité de l'air dans une région donnée dépend évidemment du régime des précipitations. Celles-ci ont par elles-même une importance certaine dans l'économie climatique de l'habitation, d'abord par une action directe sur l'humidité des parois, en fonction de la porosité de celles-ci, ensuite par un refroidissement sensible des parois mouillées, au moment de la pluie et surtout lors d'une évaporation ultérieure.

Ici encore l'aspect important de la conservation des matériaux n'est pas considéré.

Tableau XIV.

*Variation diurne de la tension de vapeur d'eau à Eala.*

$A_0$	$A_1$	$B_1$	$A_2$	$B_2$	$A_3$	$B_3$	$A_4$	$B_4$
19,28	-1,58	-1,57	+3,17	-0,17	-0,18	+0,65	+0,14	-0,05

Tableau XV.

$a_1$	$\text{tg } \phi_1$	$a_2$	$\text{tg } \phi_2$	$a_3$	$a_4$	$a_2/a_1$	$a_3/a_1$	$a_4/a_1$
2,226	1,006	3,172	-18,64	0,675	0,149	1,424	0,303	0,067

### 3. — ÉTUDE THERMIQUE DE L'HABITATION

3.0 Plusieurs ouvrages ont paru ces dernières années au sujet du comportement climatologique de l'habitation.

Parmi ceux-ci, citons celui de N. S. BILLINGTON [9]. Nous nous sommes rapidement convaincu que les méthodes d'analyse déjà existantes du comportement thermique des habitations, si elles conviennent pour les régions tempérées où le problème le plus intéressant se présente en hiver, ne peuvent être considérées comme satisfaisantes pour les régions tropicales, où la ventilation joue un rôle souvent important.

Le problème pratique est de pouvoir caractériser de façon quantitative, et même de pouvoir expliquer, la supériorité d'un type d'habitation sur un autre, du point de vue climatologique.

Nous verrons que ce côté pratique de la question nous amène à aborder le problème plus théorique des échanges thermiques entre l'habitation et son environnement.

#### 3.1 *Étude expérimentale.*

Le travail expérimental a dû être entamé avec un nombre assez réduit d'instruments de mesure : des thermomètres météorologiques, des thermomètres à maxima et minima, des katathermomètres, des thermohygrographes, tous de marque FUESS, un peu plus tard des actinographes ROBITSCH et des anémomètres CASSELLA. Il est évident qu'un travail plus détaillé ne peut être mené à bien qu'avec un équipement plus complet et plus précis.

Pour les raisons exposées précédemment, cet appareillage a été utilisé pour étudier le comportement d'habitations situées en dehors des agglomérations, dans différents types de climat au voisinage du Centre I. R. S. A. C. de Lwiro.

La méthode de travail consistait à disposer un thermohygrographe à l'intérieur de l'habitation, non loin d'un mur. Un second thermohygrographe était disposé à l'extérieur, sous abri, au voisinage du même mur. Toujours à l'extérieur, non loin de là, un actinographe assurait l'enregistrement de la radiation globale reçue par une surface horizontale. Des mesures discontinues étaient effectuées non seulement à l'anémomètre, mais encore à l'aide de thermomètres et de psychromètres, de façon à obtenir un contrôle des enregistrements fournis par les thermohygrographes.

Par la force des choses, ce travail était confié à des Africains, dont le savoir-faire n'était pas toujours à la mesure de leur bonne volonté.

Les enregistrements étaient hebdomadaires, sauf dans certains cas où une surveillance personnelle pouvait être assurée pendant un jour ou deux.

Nous pensons que de longues périodes de mesure ont le double avantage de permettre d'extraire par des moyennes les composantes périodiques des climats extérieurs et intérieurs et de compenser, de façon qu'on peut espérer statistique, les erreurs de mesure dues à l'inertie de l'instrument.

Après une période de mise au point des appareils, des mesures furent effectuées :

a) Au poste avancé de l'I. R. S. A. C., à Irangi, en climat de forêt humide. Les mesures y portèrent sur un gîte en bois, et plus tard sur une chaumière à murs de pisé. Les premiers enregistrements accusèrent un nombre élevé de déchets ;

b) Au poste avancé de l'I. R. S. A. C., au Mutura, en climat de savane boisée. Des mesures furent effectuées durant plusieurs mois dans une cabane démontable en aluminium ALTENT et en même temps sur une chaumière à murs en pisé ;

c) A Uvira, près du Centre d'Hydrobiologie de l'I. R. S. A. C., en climat de savane, soumis à l'influence du lac voisin. Les mesures ne furent effectuées que sur une chaumière à murs de pisé. Remarquons que ces murs de pisé sont toujours renforcés d'un entrelacis de branchages, qui en forme le squelette ;

d) Enfin des mesures effectuées à Lwiro et intéressantes surtout du point de vue des transferts d'humidité, ne seront pas utilisées ici.

### 3.2 *Interprétation des mesures.*

Des mesures climatologiques sur des habitations tropicales ont déjà été effectuées ailleurs, à plusieurs reprises. Parmi celles-ci, il faut citer un travail remarquable de C. PEEL [10] en Sierra Leone. Mais l'accent a toujours été mis, à notre connaissance, sur le côté descriptif. L'objectif le plus urgent nous semble être un travail d'analyse qui, par la suite, permette d'opérer une synthèse, en donnant un tableau d'ensemble où chaque cas particulier puisse être classé.

Une première remarque, d'ailleurs suggérée par le bon sens, s'impose au dépouillement de diagrammes de températures à l'intérieur et à l'extérieur des habitations, à propos de l'étroite corrélation qui apparaît entre les variations diurnes de la température.

Les grandeurs à extraire de ces diagrammes devront se rapporter à des périodes suffisamment courtes, tout en respectant la notion de corrélation précédente. Ainsi il n'apparaît pas intéressant de s'attacher à la détermination des fréquences degré par degré des moyennes,

ou des maxima et minima de températures. Le choix des grandeurs à mesurer devra s'inspirer de cette remarque.

Il est naturel d'admettre que de deux maisons soumises au même climat tropical, la meilleure est celle dont la température interne moyenne est la moins élevée et dont les amplitudes de variation diurne de la température sont les plus faibles. Il est difficile de décider dès l'abord de l'importance relative de ces deux aspects : température moyenne, amplitude de la température. Seule l'expérience, basée sur des tests physiologiques et sur des enquêtes sur l'appréciation de confort relatif aux habitants peut trancher la question pour un climat donné et pour un type moyen de tempérament donné. Température moyenne et écarts de températures sont des grandeurs habituellement décrites en climatologie générale.

Dans notre cas cependant, nous aurons à nous attacher à l'observation des écarts diurnes de température, sans nous soucier des amplitudes, par exemple, mensuelles, puisque les variations les plus rapides sont les plus significatives du point de vue confort.

Des mesures effectuées à Irangi dans le gîte en bois, à toit de tôle, nous pouvons extraire deux journées consécutives intéressantes, à variations de température relativement fortes, la première sereine, la seconde marquée par un peu de pluie le matin. En définissant la température moyenne par la moyenne entre les températures extrêmes ( $M$  et  $m$  du même jour), nous obtenons le tableau suivant :

Tableau XVI.

Date	Extérieur		Intérieur		Rapport
	$t_{\mu}^{\circ}\text{C}$	$M - m$	$t_{\mu}^{\circ}\text{C}$	$M' - m'$	$\frac{M' - m'}{M - m}$
8.11.54	22,8	12,7	22,5	6,7	0,527
9.11.54	22,4	11,6	22,2	6,5	0,560

On se rend immédiatement compte de la précision qu'il faudrait exiger des mesures pour pouvoir attacher une signification quelconque aux chiffres tirés d'un nombre limité de lectures, surtout en ce qui concerne les températures moyennes.

Voici encore des mesures se rapportant à la deuxième quinzaine du mois de mars 1955, et qui furent effectuées à l'intérieur et à l'extérieur de la chaumière à murs de pisé, à Irangi.

Tableau XVII.

Date Mars 1955.	Extérieur		Intérieur		Rapport
	$t_{\mu}^{\circ}$	M — m	$t'_{\mu}^{\circ}$	M' — m'	$\frac{M' - m'}{M - m}$
15.3.55	23,5	13,0	22,0	5,3	0,408
16.3.55	24,8	12,4	23,2	6,0	0,483
17.3.55	25,4	14,5	23,5	6,4	0,441
18.3.55	24,5	11,0	23,0	4,5	0,409
19.3.55	21,7	6,5	21,5	3,0	0,462
20.3.55	23,5	9,2	21,1	1,6	0,174
21.3.55	23,5	10,3	22,9	5,3	0,514
22.3.55	24,7	11,6	23,4	5,1	0,440
23.3.55	23,7	10,0	22,2	3,8	0,380
24.3.55	23,2	7,9	22,4	2,7	0,342
25.3.55	23,7	9,5	22,1	3,9	0,410
26.3.55	23,6	9,9	21,9	4,2	0,424
27.3.55	23,8	8,2	22,9	3,9	0,475
28.3.55	23,6	8,3	22,2	3,6	0,433
29.3.55	24,6	11,4	22,4	4,6	0,403
30.3.55	24,2	10,5	22,8	4,1	0,390
31.3.55	22,8	8,5	22,3	2,6	0,306

Ce tableau nous montre immédiatement que le rapport des amplitudes de température se tient au voisinage d'une valeur moyenne de l'ordre de 0,405, mais qu'elle peut s'en écarter sensiblement. La journée du 20 mars et la suivante sont à cet égard remarquables. Nous y reviendrons lors de l'étude de l'influence de l'humidité sur la climatologie des habitations. Ceci doit nous convaincre de l'intérêt qu'il y a à effectuer des enregistrements sur des périodes assez longues.

Le tableau XVIII indique des résultats obtenus à partir d'enregistrements de températures, pris à une hauteur d'un mètre :

- 1) A l'extérieur à l'ombre, dans un *kraal* édifié dans le Mutara (climat de savane arborée) ;
- 2) A l'intérieur d'une chaumière à murs de pisé ;
- 3) A l'intérieur d'une maisonnette démontable en aluminium (type polygonal).

Ces enregistrements hebdomadaires concernent les mois d'octobre et novembre 1954 et janvier 1955. Le mois de décembre 1954 comporte des lacunes et n'a pas été retenu.

Ces deux habitations étaient situées non loin l'une de l'autre, dans le *kraal*, et la température extérieure a été enregistrée dans l'espace intermédiaire, sous un abri.

Tableau XVIII.

Intervalles de temps	Extérieur		Habitation en aluminium			Chaumière en pisé		
	°t (M—m)		°t (M'—m') $\left( \frac{M'-m'}{M-m} \right)$			°t (M''—m'') $\left( \frac{M''-m''}{M-m} \right)$		
4-X au 10-X 1954	18,49	13,76	19,72	8,40	0,610	19,82	5,47	0,397
11-X au 17-X 1954	20,12	15,17	21,12	10,27	0,677	21,00	7,53	0,496
18-X au 24-X 1954	20,08	14,14	21,56	10,29	0,728	21,47	6,91	0,489
25-X au 31-X 1954	18,66	11,21	20,75	7,66	0,683	20,60	4,90	0,437
1-XI au 7-XI 1954	18,25	11,56	18,70	9,81	0,849	20,02	5,67	0,490
8-XI au 14-XI 1954	19,48	13,59	21,04	9,81	0,722	20,75	6,29	0,463
15-XI au 21-XI 1954	18,76	13,96	19,70	10,34	0,741	20,40	6,16	0,441
22-XI au 28-XI 1954	19,68	13,84	21,15	9,91	0,716	21,12	6,07	0,438
3-I au 9-I 1955	19,80	13,20	21,00	10,71	0,811	21,02	6,59	0,499
10-I au 16-I 1955	21,28	16,26	22,94	12,70	0,781	22,39	8,00	0,492
17-I au 23-I 1955	18,26	14,90	21,41	10,94	0,734	20,62	6,24	0,419
24-I au 30-I 1955	18,62	10,57	20,02	8,19	0,775	20,10	5,59	0,529

Les moyennes ont été prises de semaine en semaine du lundi à 7 heures du matin jusqu'au lundi suivant à

la même heure. Elles ont été déterminées au planimètre en divisant la surface mesurée par la base du diagramme.

Quant aux amplitudes de variation diurne, elles ont été définies, comme plus haut, par la différence des températures extrêmes,  $M_n - m_n$ , le minimum précédant toujours le maximum et se produisant habituellement le matin du même jour ( $n$ ), généralement entre 4 heures et 6 heures à l'extérieur, et un peu plus tard à l'intérieur des habitations. Les valeurs rapportées ci-dessous sont les moyennes (indice  $\mu$ ) de ces amplitudes par semaine.

Le rapport de l'amplitude diurne de température dans une habitation à l'amplitude correspondante à l'extérieur :  $\left(\frac{M' - m'}{M - m}\right)$ , pour la maisonnette en aluminium, et  $\left(\frac{M'' - m''}{M - m}\right)$ , pour la chaumière en pisé, constituent des caractéristiques intéressantes dans notre étude. Ce sont les moyennes de ces rapports qui ont été consignées dans le tableau XVIII.

Il est utile de construire un tableau analogue pour des intervalles de quatre semaines caractérisant les mêmes mois décrits au tableau XVIII. Les moyennes du tableau XIX ont été effectuées chaque fois sur 28 jours ; il en est ainsi en particulier pour les rapports des amplitudes diurnes.

Tableau XIX.

Intervalles de temps	Extérieur		Habitation en aluminium			Chaumière en pisé		
	${}^o_t \mu (M - m) \mu$	${}^o_t \mu (M' - m') \mu$	${}^o_t \mu \left(\frac{M' - m'}{M - m}\right) \mu$	${}^o_t \mu (M'' - m'') \mu$	${}^o_t \mu \left(\frac{M'' - m''}{M - m}\right) \mu$			
4-X au 31-X 1954	19,34	13,57	20,79	9,15	0,669	20,75	6,20	0,444
1-XI au 28-XI 1954	19,04	13,24	20,15	9,97	0,742	20,57	6,05	0,453
3-I au 30-I 1955	19,49	13,75	21,34	10,64	0,777	21,03	6,60	0,479

Les diagrammes étant relevés tous les lundis vers 7 heures, il eût été un peu plus commode de mesurer les amplitudes  $M_n - m_{n+1}$ . La mesure des valeurs journalières de

$$\frac{(M_n - m_n) \text{ int.}}{(M_n - m_n) \text{ ext.}} \text{ et de } \frac{(M_n - m_{n+1}) \text{ int.}}{(M_n - m_{n+1}) \text{ ext.}}$$

nous a permis de déterminer, en même temps que les moyennes de ces grandeurs sur les intervalles de 4 semaines en octobre, novembre et janvier, les écarts  $\Delta_{in}$  et  $\Delta_{i(n+1)}$  à partir de ces moyennes, et enfin les dispersions

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum \Delta_{in}^2}{28}} \text{ et } \sigma_{n+1} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_{i(n+1)}^2}{28}}$$

Voici d'abord le tableau (XX) des valeurs moyennes des amplitudes  $(M_n - m_{n+1})$  et des rapports

$$r_{n+1} = \frac{(M_n - m_{n+1}) \text{ int.}}{(M_n - m_{n+1}) \text{ ext.}}$$

Tableau XX.

Intervalles de temps	Extérieur	Habitation en aluminium		Chaumière en pisé
	$(M_n - m_{n+1})$	$(M'_n - m'_{n+1})$	$r'_{n+1}$	$(M''_n - m''_{n+1}) r''_{n+1}$
4-X au 31-X 1954	13,66	9,22	0,675	6,45 0,472
1-XI au 28-XI 1954	15,23	10,05	0,672	6,02 0,394
3-I au 30-I 1955	13,74	10,60	0,771	6,70 0,489

Il est intéressant de mettre en regard les dispersions des valeurs du rapport  $r$  des amplitudes diurnes calculé des deux façons différentes, pour les 3 mois considérés (Tableau XXI).

Tableau XXI.

Mois		$r_n$	$\sigma_n$	$r_{n+1}$	$\sigma_{n+1}$	$\sigma_n/r_n$	$\sigma_{n+1}/r_{n+1}$
4-X au 31-X 1954	Habitation en aluminium	0,669	0,0805	0,675	0,0680	0,120	0,101
	Chaumière en pisé	0,444	0,1045	0,472	0,1050	0,235	0,213
1-XI au 28-XI 1954	Habitation en aluminium	0,742	0,0997	0,672	0,1425	0,134	0,212
	Chaumière en pisé	0,453	0,0889	0,394	0,0785	0,196	0,199
3-I au 30-I 1955	Habitation en aluminium	0,777	0,0595	0,771	0,0600	0,077	0,078
	Chaumière en pisé	0,479	0,0864	0,489	0,0598	0,180	0,122

On remarque que si la dispersion relative  $\sigma/r$  est en moyenne moindre dans le cas de l'habitation en aluminium lorsque les amplitudes de températures sont déterminées en faisant précéder le maximum du minimum, la situation se trouve inversée dans le cas de la construction en pisé. Ceci peut être dû à la capacité thermique plus grande de celle-ci. Comme ces dispersions restent du même ordre de grandeur, il semble préférable de garder la première définition ( $M_n - m_n$ ), ce qui a l'avantage de correspondre à la définition de l'amplitude diurne adoptée en climatologie.

L'examen du tableau XIX fait ressortir les conclusions suivantes en ce qui concerne le comportement thermique des deux habitations étudiées. Tout d'abord, les températures moyennes à l'intérieur sont supérieures de 1 à 2 degrés à celle de l'extérieur pour la saison considérée (octobre-janvier). La différence des températures moyennes entre les deux habitations ne sont pas significatives dans notre cas, car elles sont de l'ordre de grandeur de l'imprécision des appareils enregistreurs (0,1 à 0,2 °C).

Il en est autrement pour ce qui regarde les amplitudes diurnes de température. Le rapport des amplitudes diurnes mesurées à l'intérieur et à l'extérieur est beau-

coup plus petit pour la chaumière en pisé, que celui de la maisonnette en aluminium. Ceci ne constitue qu'une simple vérification de la stabilité thermique plus grande de la construction en pisé, stabilité assez évidente a priori.

Nous pouvons dire que la chaumière en pisé réduit en moyenne par un facteur 0,459 l'amplitude de la température extérieure, tandis que la construction en aluminium ne la réduit que par un facteur moyen égal à 0,729.

Les mesures de moyennes et d'amplitudes des températures, toutes intéressantes qu'elles soient pour constater la valeur d'une habitation dans un climat donné, ne nous permettent pas d'analyser le rôle des différents éléments qui concourent à donner à l'habitation le comportement observé.

L'étude fonctionnelle doit nous permettre d'expliquer quantitativement pourquoi l'habitation présente telles caractéristiques thermiques et non d'autres. Ce n'est que de cette façon qu'on peut arriver à déterminer de manière précise les modifications à apporter à une construction projetée, pour obtenir des caractéristiques minima requises.

Cette attitude active devant le problème de l'habitation nous amène à le définir dans des termes mathématiques. Il s'agit de traduire par des équations la corrélation qui existe entre les variations de températures intérieures et extérieures.

Pour diviser la difficulté, nous allons considérer successivement les problèmes suivants :

a) *Le problème de la paroi.*

Une paroi est soumise sur sa face « externe » à des variations thermiques données. Ces variations sont d'abord supposées périodiques. Nous supposons qu'une certaine ventilation s'exerce du côté « interne » ; notons que le problème a déjà été considéré sans faire intervenir

ce facteur, très gênant à vrai dire [9, réf. 68]. Ensuite l'effet de fluctuations désordonnées, superposées aux variations périodiques principales, est pris en considération.

b) *Le problème de l'habitation.*

Celle-ci est délimitée par des parois, généralement planes. Pour ne pas entrer dans des complications démesurées, une moyenne de l'effet thermique des différentes parois est envisagée.

3.3 *Le problème thermique de la paroi.*

3.30 Nous allons envisager le problème de la transmission calorifique à travers une paroi dans des conditions telles que sa solution puisse nous servir à résoudre le problème de l'habitation, grâce à une adaptation qui consistera en définitive à utiliser des paramètres moyens.

Nous pouvons nous assigner pour objectif la détermination des variations thermiques de l'air du côté « intérieur » de la paroi, étant *donné* :

1) Le climat de radiation et de température à l'extérieur ;

2) L'orientation et les caractéristiques physiques et géométriques de la paroi ;

3) La ventilation interne et externe, dont les caractères, on le sait, sont nettement différents : la ventilation externe a pour effet d'accélérer les échanges par convection dans un courant d'air à turbulence généralement élevée, tandis que la ventilation interne, si elle augmente quelque peu la convection turbulente, a pour résultat de renouveler l'air du côté intérieur, par un mélange progressif.

Bref, si la paroi est soumise par sa face externe à des sollicitations thermiques définies par la température

de l'air extérieur et par le rayonnement solaire direct et indirect, auquel s'ajoute un échange de radiations avec les corps environnants, elle transmet la chaleur par sa face interne à un certain volume d'air dont la température est maintenue uniforme par un brassage supposé constant.

De plus, et ceci correspond à peu près à ce qui se passe dans une pièce dont la ventilation est bien répartie, nous admettons que ce volume d'air est renouvelé par un apport plus ou moins grand d'air extérieur et par un processus de mélange continu et uniforme. Il faudrait ajouter le rayonnement direct de la paroi sur les objets qui se trouvent à l'intérieur ; nous verrons plus loin comment il en est tenu compte, dans le coefficient de conductance superficielle  $h''$ .

Nous supposons ici, quitte à revenir sur ce point plus tard, que la paroi est faite d'un matériau homogène.

Pour sérier les difficultés, nous faisons d'abord l'hypothèse d'une ventilation constante, tandis que les variations thermiques imposées par le climat sont supposées périodiques. Dans un chapitre ultérieur, le problème d'une ventilation périodique sera envisagé, et pour finir, nous examinerons l'effet de fluctuations aperiodiques superposées à ces variations périodiques.

### 3.31 *Les équations du processus thermique. Solution périodique pour une ventilation constante.*

Nous emploierons dans ce qui suit les notations complexes qui sont, on le verra, des plus commodes. Il est entendu que lorsque nous écrivons la série de FOURIER :

$$y = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} Y_p e^{ip\omega t} \quad (j = \sqrt{-1})$$

pour définir une fonction  $y$  réelle et périodique, de période fondamentale  $2\pi/\omega$ , nous supposerons toujours

que le coefficient  $Y_{-p}$  est la conjuguée complexe du coefficient  $Y_p$ .

Considérons le problème suivant : un mur homogène dont l'épaisseur constante  $d$  est petite comparée à ses autres dimensions, reçoit par sa face extérieure un flux calorifique déterminé par la température  $T_a$  de l'air ambiant et par le rayonnement solaire, d'intensité  $I$ . Si  $\alpha$  est le coefficient d'absorption, l'énergie calorifique absorbée est  $\alpha I$ .

Soit  $T_e$  la température de la paroi extérieure (température d'irradiation), et  $h'$  le coefficient d'échange calorifique avec l'air ambiant. On a :

$$-k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_e = \alpha I - h' (T_e - T'_a) \quad (1)$$

$n$  étant la coordonnée normale à la paroi, comptée à partir de la face extérieure vers l'intérieur, et  $k$  le coefficient de conductivité thermique.

Rappelons que la température  $T_a$  est en réalité la moyenne des températures atteintes par les différents points de la paroi extérieure. Nous introduisons la même notion de moyenne (sur une surface ou dans un volume) pour toutes les températures définies dans la suite et admettrons la validité pratique de cette hypothèse.

En appelant :

$$T' = T'_a + \alpha I / h' \quad (2)$$

la température « extérieure » équivalente, on a :

$$k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_e = h' (T_e - T') \quad (3)$$

Nous supposons  $T'$  périodique dans le temps et *donnée* par la série de FOURIER :

$$T' = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} T'_q e^{qj\omega t} \quad (4)$$

Quant à la paroi intérieure, elle est soumise à un échange thermique défini par l'équation

$$k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_i = h'' (T_a'' - T_i) \quad (5)$$

où  $T_a''$  est la température de l'air ambiant intérieur, au voisinage du mur. La température  $T_a''$  est influencée par le flux thermique provenant du mur, et par un apport d'air de ventilation venant de l'extérieur, à la température  $T''$ , de sorte que :

$$C \frac{\partial T_a''}{\partial t} = -k \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_i + W(T'' - T_a'') \quad (6)$$

en désignant par  $C$  la capacité thermique du volume d'air ambiant correspondant, du point de vue de l'échange thermique, à l'unité de surface du mur, et  $W$  un coefficient proportionnel au débit d'air de ventilation, que nous supposerons d'abord constant. Nous supposons  $T''$  donné :

$$T'' = \sum_{\alpha=-\infty}^{+\infty} T_a'' e^{q_i \omega t} \quad (7)$$

Éliminons  $T''$  entre (5) et (6), en posant  $k/h'' = K''$  :

$$C \frac{\partial}{\partial t} \left[ K'' \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_i + T_i \right] + \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_i (k + WK'') + WT_i = WT'' \quad (8)$$

Les équations (3) et (8) constituent les conditions aux limites, respectivement pour  $n = 0$  et  $n = d$ , de l'équation différentielle :

$$\text{div. } (k \text{ grad. } T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

dans laquelle  $\rho$  est la densité et  $c$  la chaleur spécifique du matériau qui constitue le mur.

A cause de l'homogénéité du mur et de sa géométrie, le problème ne comporte qu'une dimension spatiale et (9) devient :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial n^2} = a^2 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (a^2 = \rho c / k) \quad (10)$$

La périodicité qui transparait dans les conditions aux limites nous conduit à poser :

$$T = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} T_q e^{qj\omega t} \quad (11)$$

chacun des coefficients  $T_q$  ne dépendant que de la variable  $n$ . Nous ne tenons compte de cette manière que du comportement en régime, et négligeons les phénomènes transitoires qui dépendent des conditions initiales ( $t = 0$ ).

La substitution de (11) dans (10) donne pour chaque indice  $q$  :

$$\frac{d^2 T_q}{dn^2} = a^2 q j \omega T_q \quad (12)$$

et par intégration, en admettant que  $a^2$  soit constant :

$$T_q = A_q e^{\lambda n(1+j)\sqrt{a}} + B_q e^{-\lambda n(1+j)\sqrt{a}} \quad (13)$$

en posant  $\lambda = a \sqrt{\frac{\omega}{2}}$ .

Les constantes  $A_q$  et  $B_q$  sont déterminées par les conditions aux limites (3) et (8). Celles-ci s'écrivent :

$$n = 0 : \quad -K' \frac{dT_q}{dn} + T_q = T'_q \quad (14)$$

$$n = d : \quad K''(1+\beta+jq\gamma) \frac{dT_q}{dn} + (\beta+jq\gamma)T_q = \beta T''_q \quad (15)$$

en posant  $k/h' = K'$ ,  $W/h'' = \beta$  et  $C\omega/h'' = \gamma$ .

On obtient le système :

$$\begin{aligned} A_q [1 - K' \lambda \sqrt{a} (1+j)] + B_q [1 + K' \lambda \sqrt{a} (1+j)] &= T'_q \\ A_q [\beta + jq\gamma + K'' \lambda \sqrt{a} (1+j)(1+\beta+jq\gamma)] e^{\lambda d(1+j)\sqrt{a}} \\ + B_q [\beta + jq\gamma - K'' \lambda \sqrt{a} (1+j)(1+\beta+jq\gamma)] e^{-\lambda d(1+j)\sqrt{a}} &= \beta T''_q \end{aligned}$$

d'où, en posant

$$\lambda d = \delta, \quad \lambda K' = \kappa' \text{ et } \lambda K'' = \kappa'' :$$

$$A_a = \frac{1}{2D_a} \left\{ \beta T'_a [1 + \kappa' \sqrt{\bar{q}}(1+j)] - T'_a [\beta + j\gamma q - \kappa''(1+j) \sqrt{\bar{q}}(1 + \beta + j\gamma q)] e^{-\delta(1+j) \sqrt{\bar{q}}} \right\} \quad (16)$$

$$B_a = \frac{1}{2D_a} \left\{ T'_a [\beta + j\gamma q + \kappa'' \sqrt{\bar{q}}(1+j)(1 + \beta + j\gamma q)] e^{\delta(1+j) \sqrt{\bar{q}}} - \beta T'_a [1 - \kappa' \sqrt{\bar{q}}(1+j)] \right\} \quad (17)$$

avec

$$D_a = [\beta + j\gamma q + 2\kappa' \kappa'' j q (1 + \beta + j\gamma q)] sh[\delta(1+j) \sqrt{\bar{q}}] + (1+j) \sqrt{\bar{q}} [\beta \kappa' + \kappa''(1 + \beta + j\gamma q)] ch[\delta(1+j) \sqrt{\bar{q}}].$$

Le rapport entre les amplitudes et le déphasage entre les composantes de fréquence  $q\omega/2\pi$  des températures  $T'_a$  et  $T''_a$  sont donnés par le module et l'argument de l'expression complexe :

$$R_a = \frac{\left( K'' \frac{dT'_a}{dn} + T'_a \right)_i}{T''_a} \quad (18)$$

où le numérateur a été déduit de l'équation (5). Posons  $T'_a/T''_a = \rho_a + j\sigma_a$ , de façon à mettre en évidence un déphasage possible entre les composantes de fréquence  $q\omega/2\pi$  des températures  $T'$  et  $T''$  ; le rapport (18) devient, en utilisant (13), (16) et (17) :

$$R_a = \frac{1}{D_a} \left\{ \beta \left[ (1 + 2j\kappa' \kappa'' q) sh[\delta(1+j) \sqrt{\bar{q}}] + (\kappa' + \kappa'') \sqrt{\bar{q}}(1+j) ch[\delta(1+j) \sqrt{\bar{q}}] \right] + \kappa'' \sqrt{\bar{q}}(1+j) (\rho_a + j\sigma_a) \right\} \quad (19)$$

Rappelons que dans cette expression les sinus et cosinus hyperboliques à arguments complexes peuvent

s'écrire, après séparation des parties réelles et imaginaires, sous les formes :

$$sh(\delta(1+j)\sqrt{q}) = sh(\delta\sqrt{q}) \cdot \cos(\delta\sqrt{q}) + j\sin(\delta\sqrt{q})ch(\delta\sqrt{q})$$

$$ch(\delta(1+j)\sqrt{q}) = ch(\delta\sqrt{q}) \cdot \cos(\delta\sqrt{q}) + j\sin(\delta\sqrt{q})sh(\delta\sqrt{q})$$

la quantité  $\delta\sqrt{q}$  étant réelle.

Si l'on écrit la quantité complexe  $R_q$  sous la forme  $r_q e^{j\psi_q}$  dans laquelle  $r_q = |R_q|$  est le module de  $R_q$  et  $\psi_q$  l'argument, on met en évidence le facteur de réduction  $r_q$  qui existe entre les amplitudes des oscillations sinusoidales correspondantes des températures de l'air à l'intérieur et à l'extérieur, tandis que le déphasage entre ces oscillations est donné par l'angle  $\psi_q$ .

Dans les circonstances envisagées dans notre étude nous aurons généralement  $r_q < 1$  et  $\psi_q < 0$ .

On vérifie immédiatement que le rapport  $R_q$  tend vers l'unité c'est-à-dire  $T''_a \rightarrow T''$ , lorsque la ventilation est prépondérante :  $\beta^2 \gg 1 + \gamma^2 q^2$ .

Si par contre la ventilation est négligeable  $\beta^2 \ll 1 + \gamma^2 q^2$  le rapport  $R$  tend vers la valeur :

$$R_{q_0} = \frac{K''(1+j)(\rho_a + j\sigma_a)\sqrt{q}}{D_{q_0}} \quad (20)$$

avec

$$D_{q_0} = j[\gamma + 2\kappa'\kappa''q(1+j\gamma q)]sh[\delta(1+j)\sqrt{q}] + (1+j)\kappa''\sqrt{q}(1+j\gamma q)ch[\delta(1+j)\sqrt{q}] \quad (21)$$

Il est intéressant de déterminer la modification que subit cette expression limite pour des valeurs petites de  $\beta$ , en utilisant l'approximation :

$$R_q = R_{q_0} + \beta \left( \frac{\partial R_q}{\partial \beta} \right)_{\beta=0} \quad (22)$$

on trouve :

$$\left( \frac{\partial R}{\partial \beta} \right)_{\beta=0} = \frac{1}{D_{q(\beta=0)}} \left\{ (1 + 2j\kappa'\kappa''q)sh[\delta(1+j)\sqrt{q}] + (\kappa' + \kappa'')\sqrt{q}(1+j)ch[\delta(1+j)\sqrt{q}][j - R_{q(\beta=0)}] \right\} \quad (23)$$

Le rapport  $R$  pour les valeurs moyennes ( $q = 0$ ) de  $T''_a$  et  $T''$  se trouve en faisant tendre  $q$  vers 0 dans (19), en notant que par hypothèse  $\sigma_0 = 0$  :

$$R_0 = \frac{\beta(\delta + \kappa' + \kappa'') + \kappa''\rho_0}{\beta(\delta + \kappa' + \kappa'') + \kappa''} \quad (24)$$

On remarque en guise de vérification que  $\sqrt{\omega}$ , qui apparaît implicitement en facteur au numérateur et au dénominateur de cette expression, pourrait évidemment être éliminé. Ce rapport montre le mieux l'influence de la ventilation sur la température moyenne de l'air à l'intérieur ( $T''_a$ ) ;  $R_0$  ne diffère de  $\rho_0$  que si  $\beta \neq 0$ .

Si la ventilation est nulle ( $\beta = 0$ ),  $R_0 = \rho_0$  et la valeur moyenne de  $T''_a$  est égale à celle de  $T'$ , température extérieure équivalente :  $T''_{a0} = T'_0$ .

### 3.32 Ordres de grandeur des paramètres thermiques.

Il est utile de délimiter dès à présent les ordres de grandeur dans lesquels peuvent se situer les différents coefficients utilisés dans le chapitre précédent.

En ce qui concerne les variations de la température et du rayonnement total, nous renvoyons à ce qui a été dit à propos des différents climats du Congo belge.

Le coefficient d'absorption  $a$  qui apparaît dans (1) et (2) peut prendre des valeurs très différentes suivant la nature du rayonnement incident et suivant la nature de la surface réceptrice et surtout la couleur.

Dans notre cas, à côté du rayonnement solaire total, direct et diffusé  $I_s$ , on peut être amené à considérer le rayonnement  $I_r$ , dû à la réflexion sur des corps voisins : murs, sol, etc...

En réalité le coefficient  $a$  correspond à une simplification schématique du phénomène beaucoup plus compliqué de l'échange thermique par rayonnement, entre la paroi (par sa face extérieure) et les corps environnants, y compris le soleil et les nuages, dont nous avons parlé précédemment.

Il convient ici de séparer le rayonnement solaire, direct, indirect et réfléchi,  $I = I_s + I_r$ , au total, reçu par la paroi, et l'échange thermique par rayonnement de corps noir (ou « gris », si l'émissivité  $\epsilon < 1$ ), entre la paroi et les corps environnants, à des températures peu élevées. Cet échange se calcule à partir de la formule de STEFAN-BOLTZMANN, et donne une émission de :

$$0,826 \times 10^{-10} \cdot \epsilon (T_p^4 - T_e^4) \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$$

si la température absolue  $T_p$  de la paroi est plus élevée que celle de l'environnement (températures absolues KELVIN). En fait il est d'usage dans la littérature technique de faire intervenir cette déperdition dans le coefficient de « conductance » superficielle dont il sera question plus loin.

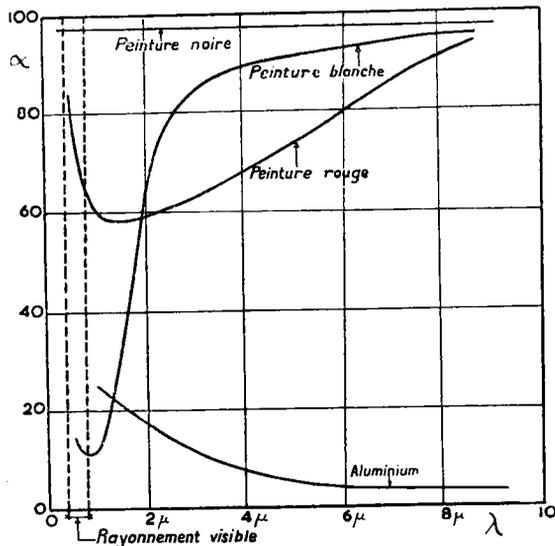


FIG. 9. — Courbes du coefficient d'absorption  $\alpha$ , en fonction de la longueur d'onde d'un rayonnement monochromatique incident, pour différentes surfaces (d'après des données renseignées par [9]).

Remarquons en passant que certains corps environnants peuvent atteindre une température  $T_e$  supérieure

à  $T_p$  (sol surchauffé rayonnant sur un mur) ; dans certains cas il conviendra d'en tenir compte. Notons toutefois que le rayonnement nocturne, dont il a été question au chapitre consacré au climat du rayonnement, pourrait intervenir pour caractériser la fonction  $I$  par des valeurs négatives durant la nuit.

En pratique, on peut admettre que l'énergie globale reçue  $I$ , en cal  $g/cm^2$  min, est mesurée directement par des instruments tels que l'actinographe de ROBITSCH (pour une face horizontale) ; le coefficient  $\alpha$  est à déterminer expérimentalement.

Des valeurs de  $\alpha$  pour le rayonnement solaire se trouvent dans la littérature ; voici quelques valeurs déduites de résultats publiés par BECKETT [11] pour le coefficient  $r = 1 - \alpha$  de réflexion diffuse.

Tableau XXII.

Briques ordinaires, rouges	$\alpha = 0,52$
Brique pourpre	0,77
Brique bleue	0,89
Béton, non peint	0,65
Tuiles d'argile rouges	0,60
Tuiles d'argile brunâtres	0,69
Tôle de fer galvanisée, neuve	0,64
Tôle de fer galvanisée, usagée	0,92
Feuilles bituminées	0,87
Asphalte, neuf	0,93-0,91
Asphalte, défraîchi	0,89-0,82
Peinture cellulosique, blanche	0,18
Peinture cellulosique, rouge	0,44
Peinture cellulosique, brune	0,79
Peinture cellulosique, noire	0,94
Peinture d'aluminium	0,54

L'influence de la peinture blanche est évidente ; ainsi, pour la tôle galvanisée blanchie à l'eau, BECKETT obtient  $\alpha = 0,22$ . Il ne faut cependant pas perdre de vue que les données précédentes ne sont valables que pour le rayonnement du type solaire, utilisé par BECKETT dans ses expériences.

Pour d'autres spectres de rayonnement (diffusé, réfléchi, etc.), il convient de refaire la détermination expérimentale, ou bien d'évaluer chaque fois l'expression

$$\alpha = \frac{\int \alpha(\lambda) I(\lambda) d\lambda}{\int I(\lambda) d\lambda}$$

où  $I(\lambda)$  est l'intensité spécifique de rayonnement de l'émetteur, considéré généralement comme un corps noir, et  $\alpha(\lambda)$  le coefficient d'absorption spécifique, fonction différente de la longueur d'onde  $\lambda$  pour chaque couleur réceptrice. La *fig. 9* donne quelques courbes de  $\alpha(\lambda)$  pour des peintures blanche, rouge et noire, ainsi que pour l'aluminium poli.

Rappelons que *pour une même longueur d'onde*, le coefficient d'absorption  $\alpha(\lambda)$  d'un corps est égal à son émissivité  $\epsilon(\lambda)$ , c'est-à-dire au rapport de l'intensité de radiation émise par ce corps, à l'intensité qui serait rayonnée par un « corps noir » à la même température.

En fait, il ne faut pas se faire d'illusion sur la précision des valeurs de  $\alpha$  données au tableau précédent ; des variations assez importantes peuvent se produire, d'après la fabrication et l'état de propreté.

Le « *Heating, Ventilating and Air Conditioning Guide* » de 1949 donne les domaines de valeurs pratiques suivants pour le coefficient d'absorption du rayonnement solaire, et pour l'émissivité  $\epsilon$  correspondant à des températures comprises entre 10°C et 38°C.

	$\alpha$ (rad. sol.)	$\epsilon$ (10°-38°)
Briques et tuiles rouges, béton, pierres, fer rouillé et peintures sombres	0,65-0,80	0,85-0,95
Briques jaunes et pierres claires	0,50-0,70	0,85-0,95
Briques et tuiles claires, plâtre et mur blanchi	0,30-0,50	0,85-0,95
Tôles et galvanisées, aluminium mat	0,40-0,65	0,20-0,30
Aluminium poli	0,10-0,40	0,02-0,04
Surfaces noires, non métalliques	0,85-0,98	0,90-0,98

(Ces dernières se rapprochent le mieux du « corps noir » idéal, pour lequel  $\alpha = 1$ ).

Les coefficients de conductance superficielle  $h'$  et  $h''$  tiennent compte à la fois de la déperdition par rayonnement noir et par convection, forcée ou non, par l'air ambiant. On admet que, dans les deux cas, cette déperdition est proportionnelle à la différence de température entre la paroi et l'air ambiant, et en écrivant  $h = h_r + h_c$ , on distingue dans le coefficient  $h$  les contributions provenant du rayonnement et de la convection.

En ce qui concerne le rayonnement, on admet ainsi que les corps environnants se trouvent (à peu près) à la température ambiante, elle-même assez peu différente de la température de la paroi pour permettre de considérer la différence des quatrièmes puissances comme proportionnelle à la différence des températures mêmes. Le coefficient  $h_r$  dépend ainsi du domaine de température considéré, mais aussi du coefficient d'absorption  $\alpha$  (ou d'émission  $\epsilon$ ).

Il a été établi expérimentalement [12] que la loi de convection thermique peut être représentée par une expression de la forme

$$H(T_p - T_a)^{4/5}$$

où  $T_p$  et  $T_a$  sont les températures de la paroi et de l'air ambiant. La simplification qui consiste à écrire plutôt  $h_c(T_r - T_p)$  fait dépendre le coefficient  $h_c$  de manière assez sensible de l'intervalle de température considéré.

Comme en outre il dépend de l'état de la surface, de l'orientation de la paroi et de la ventilation éventuelle, il ne faut pas s'étonner de trouver des valeurs expérimentales assez divergentes.

En air tranquille, on peut admettre pour  $h = h_r + h_c$  les valeurs suivantes, données par l'A. S. H. V. E. et converties en unités c. g. min. :

Tableau XXIII.

Orientation de la paroi	Émissivité	$h$ (gr. cal. cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
Verticale	0,83	0,01237
Verticale	0,05	0,00602
Horizontale, face supérieure	0,83	0,01587
Horizontale, face supérieure	0,05	0,00944
Horizontale, face inférieure	0,83	0,00985
Horizontale, face inférieure	0,05	0,00358

La différence entre les faces supérieures et inférieures de la paroi horizontale s'explique aisément pour le coefficient de déperdition par la tendance ascendante de l'air chaud. Il est permis de supposer qu'il suffit d'échanger ces valeurs s'il s'agit de *réchauffement* de la paroi.

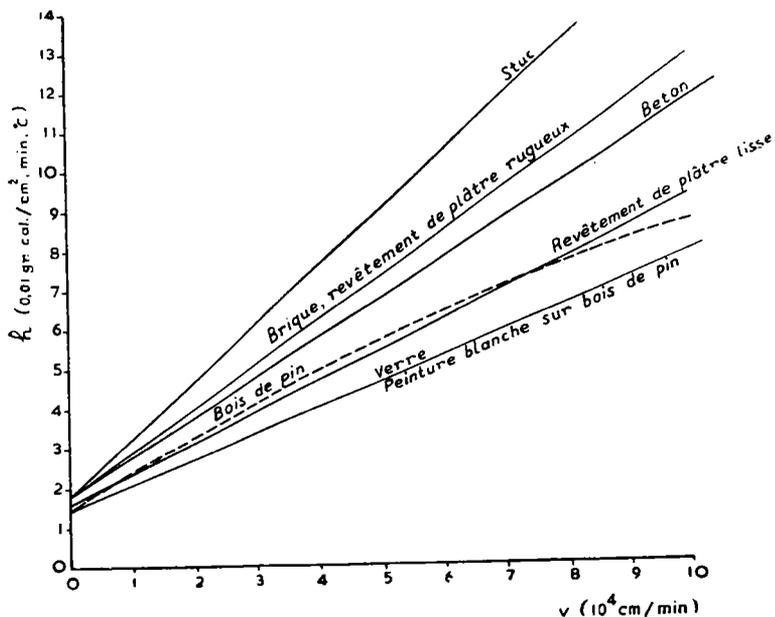


FIG. 10. — Courbes du coefficient de conductance superficielle  $h$  en fonction de la vitesse de ventilation, pour différentes surfaces (d'après des données mentionnées par [9]).

La ventilation tend à faire croître ces valeurs de  $h$ , et à ce moment l'état de surface intervient aussi de

manière sensible. La *Building Research Station* anglaise a publié des résultats dont nous extrayons les courbes de la *fig. 10*. Ce sont les coefficients de parois externes qui évidemment demandent de tenir compte au moins de l'intensité moyenne du vent, ainsi d'ailleurs que de sa direction.

Pour l'évaluation des domaines de variation approximatifs des paramètres, nous admettons  $h'_{\max} = 10h''$ , et  $h'_{\min} = h''$ , pour un matériau donné, et une même orientation.

Le coefficient de conductivité thermique  $k$  a fait l'objet d'un grand nombre de déterminations pour divers matériaux. Divisé par le produit  $\rho c$  de la densité du matériau et de sa chaleur spécifique, il représente la diffusivité  $a^{-2} = k/\rho c$ .

Des ordres de grandeur de  $k$  et  $a^{-2}$  sont donnés par le tableau suivant :

Tableau XXIV.

Matériaux	Conductivité therm. (k) cal/cm min °C	Densité g/cm <sup>3</sup>	Chaleur spécifique cal/g°C	Diffusivité a <sup>-2</sup> cm <sup>2</sup> /min
Briques	0,114	1,76	0,17	0,381
Béton de gravier	0,207	2,43	0,24	0,355
Béton cellulaire	0,0207	0,64	0,25	0,129
Bois	0,0207	0,64	0,34	0,095
Sable	0,0468	1,52	0,19	0,162 [9]
Chaume	0,0166	—	—	—
Brique pouzzolanique	0,033	0,80	—	— [17]

La capacité thermique de l'air  $C$ , rapportée à la surface du côté interne de la paroi, est évidemment proportionnelle à l'épaisseur d'air qui à partir de la paroi est supposée participer à l'échange thermique.

Il est évident que le processus de réchauffement est d'autant moins homogène que la turbulence est faible ; cette dernière dépend elle-même en partie de la ventilation.

Nous introduisons une épaisseur  $l$  d'air équivalente pour laquelle le processus est supposé fictivement homogène. En pratique, on pourrait admettre que dans une pièce d'habitation, cette épaisseur soit déterminée par le rapport du volume total de la pièce à la surface totale des parois qui la délimite. De toute façon, une grande précision n'est pas nécessaire, car la capacité thermique de l'air est faible ; dans bien des cas on pourra la négliger.

On a :  $C = \rho_e \cdot C_e \cdot l$ .

Pour  $p = 1000 \text{ mb}$ ,  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  (température virtuelle ajustée de l'air), on a

$$\rho_a = 1,188 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3 \text{ [13] ;}$$

$$e_a = 0,24 \text{ cal/g}^\circ\text{C ;}$$

et  $C = 0,285 \cdot 10^{-3} \text{ (cal/cm}^3 \text{ }^\circ\text{C)}.l$ .

Ainsi pour  $l = 100 \text{ cm}$  et  $l = 400 \text{ cm}$ , nous obtenons respectivement  $C = 0,0285$  et  $C = 0,114$ , valeurs que nous pouvons considérer comme extrêmes.

*L'effet d'échange thermique* par mélange avec l'air extérieur amené par la ventilation est caractérisé par le coefficient  $W$ . Sa valeur est assez difficile à estimer pour une paroi isolée, même si on fait l'hypothèse que le mélange se fait uniformément sur toute la face intérieure, dans un volume d'air équivalent qu'on lui attribue comme précédemment. L'usage que nous désirons faire de cette théorie nous conduit à anticiper sur les considérations qui nous permettront d'appliquer les résultats obtenus pour une paroi, au complexe de parois que représente une habitation, ou même un simple local. Aussi admettrons-nous que  $W$  puisse être représenté par le produit  $\rho_a c_a v S_0 / S$ , où  $v$  est la vitesse d'entrée de l'air extérieur par l'orifice de ventilation de surface  $S_0$  ; celle-ci est divisée par la surface totale  $S$  des parois intérieures.

La capacité thermique  $\rho_a c_a$  a déjà été déterminée ; les valeurs les plus grandes de  $\frac{S_0}{S}$  et  $v$  se situent respectivement aux environs de 0,1 et 6.000 cm/min, de sorte que  $W$  peut varier de 0 à 0,171 cal/cm<sup>2</sup> min °C.

Les différents paramètres sans dimensions

$$\begin{aligned} \kappa' &= \lambda k / h' & \kappa'' &= \lambda k / h'' \\ \gamma &= C \omega / h'' & \beta &= W / h'' \\ \delta &= \lambda d & \rho_a + j \sigma_a &= T'_a / T''_a \end{aligned}$$

avec  $\lambda = a \sqrt{\omega / 2} = \sqrt{\omega \rho c / 2 k}$

peuvent être évalués si l'on connaît les caractéristiques technologiques  $k, h', h''$ , géométriques  $l, \frac{S_0}{S}, d$  (épaisseur de la paroi) et climatologiques  $v, T'_a$  et  $T''_a$ .

Des ordres de grandeur des paramètres  $\kappa', \kappa'', \gamma$  et  $\beta$  peuvent se tirer des considérations précédentes. Dans l'expression de  $\lambda$  et de  $\gamma$  intervient  $\omega$ , fréquence angulaire fondamentale, qui dans notre cas correspond soit à la périodicité annuelle, soit à la périodicité diurne. Nous nous limiterons ici à la fréquence diurne :

$$\omega = \frac{2\pi}{24 \times 60} \text{ min}^{-1} \text{ et } (\omega/2)^{1/2} = 0,0467 \text{ min}^{-1/2}.$$

Voici dans ces conditions les maxima (M) et minima (m) (approximatifs) que l'on trouve.

Tableau XXV.

Matériau	$\lambda$ cm	$\kappa''$		$\kappa'$		$\delta$		Épaisseur de la paroi
		M	m	M	m	M	m	
Briques	0,0756	2,410	0,697	1,434	0,543	4,53	0,756	60 $\geq d$ cm $\geq 10$
Béton de gravier	0,0784	4,535	1,313	2,697	1,023	2,34	0,392	30 $\geq d$ cm $\geq 5$
Béton cellulaire	0,1300	0,752	0,218	0,447	0,170	2,60	0,650	20 $\geq d$ cm $\geq 5$
Bois	0,1515	0,876	0,254	0,521	0,198	0,91	0,303	6 $\geq d$ cm $\geq 2$
Sable	0,1161	1,518	0,439	0,903	0,343	—	—	—

En outre nous obtenons

$$\gamma_M = 0,139, \quad \gamma_m = 0,010$$

et 
$$\beta_M = 47,8, \quad \beta_m = 0$$

Pour calculer les valeurs précédentes nous avons admis que

$$h''_{\min.} = 0,00358 \text{ (plafond, } \epsilon = 0,05)$$

$$h''_{\max.} = 0,01237 \text{ (mur, } \epsilon = 0,83)$$

$$h'_{\min.} = 0,00602 \text{ (mur, } \epsilon = 0,05)$$

$$h'_{\max.} = 0,01587 \text{ (toit plat, } \epsilon = 0,83)$$

$$C_{\max.} = 0,114 \quad (l = 400 \text{ cm})$$

$$C_{\min.} = 0,0285 \quad (l = 100 \text{ cm})$$

$$W_{\max.} = 0,171 \quad (v_{\max.} = 6.000 \text{ cm/min. } S_0/S = 0,1)$$

$$W_{\min.} = 0 \quad (v_{\min.} = 0 \text{ ou } S_0/S = 0)$$

ces grandeurs étant exprimées en unités cm, gr, min, cal, °C.

Sans tenir compte du paramètre  $\beta$ , toujours positif et qui représente l'effet de la ventilation, l'on s'aperçoit que le terme  $j\gamma q$ , provenant de la faible capacité thermique de l'air, pourra souvent être négligé devant le terme 1 qui le précède chaque fois dans l'expression D, (18), du moins pour les premiers termes de la série de FOURIER ( $q = 1, 2, \dots$ ), les seuls intéressants du point de vue pratique.

Le paramètre  $\gamma$  pourra être complètement négligé s'il s'agit de la périodicité annuelle; dans ce cas

$$\omega = \frac{2\pi}{24 \times 60 \times 365} \text{ min}^{-1}; \text{ les valeurs de } \gamma \text{ doivent alors}$$

être divisées par le nombre de jours dans l'année, soit 365, tandis que les valeurs de  $\lambda$ ,  $\kappa''$ ,  $\kappa'$  et  $\delta$  mentionnées dans le tableau XXV doivent être divisées par  $\sqrt{365}$ , soit 19,1.

Enfin, on peut déjà se faire une idée du rapport complexe  $T'_a/T''_a = \rho_a + j\sigma_a$  si l'on admet que la température de l'air de ventilation  $T''$  est celle de l'air à l'extérieur sous abri,  $T'_a$ .

En écrivant :

$$I = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} I_q e^{jq\omega t}$$

c'est-à-dire en procédant à la décomposition en série de FOURIER de la courbe de l'intensité de rayonnement reçue par la paroi, on a :

$$\rho_a + j\sigma_a = \frac{T''_{aa} + \alpha I_a / h'}{T'_a} = 1 + \frac{\alpha I_a}{h' T''_{aa}}$$

Admettons qu'il s'agisse d'une paroi horizontale ;  $I_q$  représente alors la composante de fréquence angulaire  $q\omega$  du rayonnement global ; soit alors, d'après les valeurs déjà données pour  $\alpha$ ,  $\epsilon$  et  $h'$  pour le béton, par exemple,  $\alpha = 0,65$ , ( $\epsilon = 0,83$ ) et  $h' = 2 \times 0,01587 = 0,03174$ . On a :  $\rho_a + j\sigma_a = 1 + 20,5 I_q / T''_{aa}$ .

Par temps complètement couvert, on peut prendre  $I_q = 0$ , et dans ce cas  $\rho_a + j\sigma_a$  se réduit à l'unité. Mais il s'agit là d'un cas limite. Prenons par exemple les valeurs données pour  $I_1$  dans la *fig. 2a* (Léopoldville, 1952) et pour  $T''_{a1}$  dans la *fig. 5d* (Léopoldville, 1936-1939) et admettons que, si les années pour lesquelles ces diagrammes ont été construits ne sont pas les mêmes, les ordres de grandeur restent valables. Les variations extrêmes du vecteur  $I_1$  correspondent aux mois de juin et mars. Pour juin on a  $I_1 = 0,297 e^{j1,44\pi}$  et pour mars,  $I_1 = 0,650 e^{j1,50\pi}$ . Quant au vecteur  $T''_{a1}$  il varie peu dans le diagramme *5d* et l'on peut prendre dans les deux cas une valeur approximative :  $T''_{a1} = 3,8 e^{j1,28\pi}$  d'où, dans le premier cas

$$\rho_1 + j\sigma_1 = 1 + 1,6 e^{j0,19\pi} = 2,32 + j 0,90$$

et dans le second

$$\rho_1 + j\sigma_1 = 1 + 3,5e^{j0,25\pi} = 3,47 + j 2,47$$

### 3.33. Exemple théorique et représentation graphique.

L'expression (19) du rapport complexe  $R_q$  entre le vecteur  $T''_{a_1}$  de fréquence angulaire  $q\omega$ , qui représente la composante fréquentielle de la variation de la température de l'air intérieur, et le vecteur  $T''_a$  de même fréquence, qui se rapporte à la température de l'air de ventilation, ne se présente pas sous une forme simple, par suite du nombre relativement élevé de paramètres :  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\kappa'$ ,  $\kappa''$  et  $\delta$ . Nous supposons que le rapport  $T'_q/T''_a = \rho_q + j\sigma_q$ , qui dépend surtout des conditions climatiques extérieures, est donné.

Théoriquement il suffirait, pour déterminer les grandeurs réelles  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\kappa'$ ,  $\kappa''$  et  $\delta$ , de connaître  $R_0$ ,  $R_1$  et  $R_2$ , les deux dernières de ces valeurs étant complexes. Le calcul à partir de (19) serait loin d'être aisé, mais heureusement le problème ne se pose pas en pratique de cette manière, comme nous le verrons dans la suite.

Il est cependant utile de se faire au moins par la voie graphique une idée de la variation de  $R_q$  en fonction de  $\beta$ ,  $\gamma q$ ,  $\kappa' \sqrt{q}$ ,  $\kappa'' \sqrt{q}$ ,  $\delta \sqrt{q}$  et  $\rho_q + j\sigma_q$ , lorsque certains de ces paramètres sont fixés.

Les paramètres pour lesquels la dépendance de  $R_q$  est la plus simple sont  $\gamma$  et  $\rho_q + j\sigma_q$ . En effet  $R_q$  dépend linéairement de  $\rho_q + j\sigma_q$ , et  $R_q^{-1}$  pareillement de  $\gamma$ .

Si l'on fait varier  $\rho_q + j\sigma_q$  proportionnellement à lui-même en fixant les autres paramètres, c'est-à-dire si l'on pose  $\rho_q + j\sigma_q = x.(a + bj)$  et si l'on fait varier le coefficient réel  $x$ , l'affixe du vecteur  $R_q$  parcourra une droite.

Si d'autre part l'on ne fait varier que le paramètre (réel)  $\gamma$ , cet affixe parcourt un cercle. Il suffit en effet

d'écrire  $R_a = r_a e^{j\psi_a}$  pour remarquer que  $R_a$  est le symétrique par rapport à l'axe  $\psi_a = 0$  du vecteur  $r_a e^{-j\psi_a}$ ; ce dernier est en module l'inverse du vecteur  $r_a^{-1} e^{-j\psi_a}$  dont il possède le même argument. L'extrémité du vecteur polaire  $R_a^{-1} = r_a^{-1} e^{-j\psi_a}$  parcourt une droite lorsqu'on ne fait varier que le paramètre  $\gamma$ , et l'on sait que le lieu conjugué (inverse) d'une droite est un cercle passant par l'origine.

Nous sommes ainsi conduits à construire des diagrammes pour lesquels tous les paramètres, sauf  $\rho + j\sigma$  et  $\gamma$  ont reçu des valeurs assorties. Ces diagrammes polaires comporteront des réseaux gradués de droites et de cercles correspondant respectivement à des valeurs fixes de  $\gamma$  et de  $x$ , pour  $\rho + j\sigma = x(a + bj)$ .

Il est intéressant d'appliquer cette méthode à un cas concret, en se réservant de choisir diverses valeurs du paramètre  $\beta$ , de façon à mettre en évidence l'effet de la ventilation.

Le paramètre  $\delta\sqrt{q} = ad\sqrt{q\omega/2}$  est celui de la résistance thermique de la paroi. Comme ce sont les fonctions hyperboliques (à arguments complexes) qui apportent le plus de complication à l'expression (19), nous sommes amenés à choisir à titre d'exemple des valeurs de  $d\sqrt{q}$  qui la simplifient le plus.

Les valeurs  $\delta\sqrt{q/\pi} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi$ , où  $n$  est entier, donnent :

$$sh[\delta\sqrt{q}(1 + j)] = j(-1)^n ch(\delta\sqrt{q})$$

et

$$ch[\delta\sqrt{q}(1 + j)] = j(-1)^n sh(\delta\sqrt{q})$$

et (19) devient alors :

$$R_a = \frac{r'_a + j r''_a}{s'_a + j s''_a} \tag{25}$$

en posant :

$$\begin{aligned}
 r'_a &= \beta[ch(\delta\sqrt{q}) + (\kappa' + \kappa'')\sqrt{q}sh(\delta\sqrt{q})] \\
 &\quad + (-1)^n(\rho_a + \sigma_a)\kappa''\sqrt{q} \\
 r''_a &= \beta[2\kappa'\kappa''qch(\delta\sqrt{q}) + (\kappa' + \kappa'')\sqrt{q}sh(\delta\sqrt{q})] \\
 &\quad - (-1)^n(\rho_a - \sigma_a)\kappa''\sqrt{q} \\
 s'_a &= (\beta - 2\kappa'\kappa''\gamma q^2)ch(\delta\sqrt{q}) \\
 &\quad + [(\kappa' + \kappa'')\beta + \kappa'' - \kappa''\gamma q]\sqrt{q}sh(\delta\sqrt{q}) \\
 s''_a &= (\gamma + 2\kappa'\kappa''(1 + \beta))qch(\delta\sqrt{q}) \\
 &\quad + [\kappa'\beta + \kappa''(1 + \beta) + \kappa''\gamma q]\sqrt{q}sh(\delta\sqrt{q})
 \end{aligned} \tag{26}$$

Prenons, pour fixer les idées,  $n = 0$  dans (26) ; on a alors  $\delta\sqrt{q} = \pi/2$  et les expressions (26) deviennent :

$$\begin{aligned}
 r'_a &= \beta[2,51 + 2,30(\kappa' + \kappa'')\sqrt{q}] + (\rho_a + \sigma_a)\kappa''\sqrt{q} \\
 r''_a &= \beta[5,02\kappa'\kappa''q + 2,30(\kappa' + \kappa'')\sqrt{q}] - (\rho_a - \sigma_a)\kappa''\sqrt{q} \\
 s'_a &= 2,51(\beta - 2\kappa'\kappa''\gamma q^2) \\
 &\quad + 2,30\sqrt{q}[(\kappa' + \kappa'')\beta + \kappa''(1 - \gamma q)] \\
 s''_a &= 2,51[\gamma + 2\kappa'\kappa''(1 + \beta)]q \\
 &\quad + 2,30[\kappa'\beta + \kappa''(1 + \beta + \gamma q)]\sqrt{q}
 \end{aligned} \tag{27}$$

A partir d'ici nous allons particulariser davantage le problème en choisissant des valeurs des paramètres variables en moyenne pour la maçonnerie de brique ; ces valeurs ont été puisées dans [9].

En prenant pour la diffusivité  $a^{-2}$  la valeur  $0,270 \text{ cm}^2/\text{min}$  on trouve  $\lambda = 0,09 \text{ cm}^{-1}$ .

L'hypothèse  $n = 0$  donne alors à partir de (26),  $d = \frac{17,45 \text{ cm}}{\sqrt{q}}$ . Pour l'oscillation thermique fondamentale ( $q = 1$ ), les données précédentes donnent  $d = 17,45 \text{ cm}$ ,

tandis que s'il s'agissait de l'harmonique  $q = 2$ , l'épaisseur considérée serait :

$$\frac{17,45}{\sqrt{2}} = 12,34 \text{ cm.}$$

On peut admettre pour la brique, suivant la même référence :

$$k = 5 \text{ B. Th. U. in. /ft}^2 \text{ hr.}^\circ \text{F.}$$

$$h'' \text{ (surface interne)} = 1,5 \text{ B. Th. U /ft}^2 \text{ .hr.}^\circ \text{F (suivant ASHVE)} = 0,013 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}^\circ \text{C.}$$

$$h' \text{ (surface externe)} = 3,0 \text{ B. Th. U /ft}^2 \text{ .hr.}^\circ \text{F (suivant ASHVE)} = 0.026 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}^\circ \text{C.}$$

$$\text{On a dès lors } K' = k/h' = 1,67 \text{ in.} = 4,23 \text{ cm.,}$$

$$K'' = k/h'' = 3,34 \text{ in.} = 8,46 \text{ cm.}$$

La valeur double du coefficient  $h$  de conductance superficielle à l'extérieur, comparée à sa valeur à l'intérieur, provient de l'influence du vent ; il va sans dire qu'il s'agit là d'une valeur moyenne, qui en réalité dépend aussi bien de l'importance du vent que de son orientation par rapport à la paroi [9, p. 23].

On a ainsi :

$$\kappa' = K'\lambda = 0,381, \quad \kappa'' = 0,762$$

De cette façon, (27) devient :

$$\begin{aligned} r'_a &= \beta(2,51 + 2,63\sqrt{q}) + 0,76\sqrt{q}(\rho_a + \sigma_a) \\ r''_a &= \beta(1,45q + 2,63\sqrt{q}) - 0,76\sqrt{q}(\rho_a - \sigma_a) \\ s'_a &= \beta(2,51 + 2,63\sqrt{q}) + 1,75 - \gamma q(1,45q + 1,75\sqrt{q}) \quad (28) \\ s''_a &= \beta(1,45q + 2,63\sqrt{q}) + 1,45q \\ &\quad + 1,75\sqrt{q} + \gamma q(2,51 + 1,75\sqrt{q}) \end{aligned}$$

Nous allons étudier la valeur de ce que nous pourrions appeler le coefficient de transfert  $R_a$ , obtenu en substi-

tuant les expressions (28) dans (25), pour la première harmonique  $q = 1$ .

Supposons d'abord qu'il n'y ait pas de déphasage entre la température « totale » d'insolation  $T'_1$ , et la température « d'aération »  $T''_1$ , dans la même composante fondamentale  $q = 1$ . Ceci revient à poser  $\sigma_1 = 0$ . Dans ce cas, nous déduisons de (28) et (25) :

$$R_1 = \frac{5,14\beta + 0,76\rho_1 + j(4,08\beta - 0,76\rho_1)}{5,14\beta + 1,75 - 3,21\gamma + j(4,08\beta + 3,21 + 4,26\gamma)} \quad (29)$$

Il ne reste plus ainsi que trois paramètres  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\rho_1$ , et une étude des variations de la quantité complexe  $R_1$  se fera le plus aisément sur des diagrammes polaires du vecteur tracés chaque fois pour une valeur donnée de l'un des paramètres, les deux autres déterminant, par leurs variations indépendantes, un réseau de courbes. Ainsi que nous l'avons vu, puisque  $R_1$  et  $R_1^{-1}$  dépendent respectivement de  $\rho_1$  et de  $\gamma$ , nous avons intérêt à tracer des diagrammes différents pour diverses valeurs fixes de  $\beta$ . De cette manière les diagrammes ne comporteront que des droites et des cercles.

Les calculs ont porté sur deux cas :  $\beta = 0$  (ventilation nulle), et  $\beta = 1$  (ventilation moyenne) ; la valeur de  $R_1$  a été déterminée chaque fois pour les différentes combinaisons de valeurs de  $\gamma$  et  $\rho_1$  indiquées dans le tableau suivant :

$\beta = 1$	$\gamma = 0,01$	0,03	0,06	0,10
$\rho_1 = 1$	$R_1 = 0,644 - 0,203j$	$0,641 - 0,210j$	$0,636 - 0,219j$	$0,628 - 0,231j$
$\rho_1 = 2$	$0,640 - 0,310j$	$0,636 - 0,3165j$	$0,629 - 0,325j$	$0,619 - 0,3365j$
$\rho_1 = 3$	$0,636 - 0,417j$	$0,631 - 0,423j$	$0,622 - 0,431j$	$0,610 - 0,442j$
$\rho_1 = 4$	$0,632 - 0,524j$	$0,626 - 0,5295j$	$0,615 - 0,537j$	$0,601 - 0,5475j$

Quant à l'hypothèse  $\beta = 0$ , elle donne :

pour $\gamma = 0,01$	$R_1 = -\rho(0,086 + 0,280j)$
$\gamma = 0,03$	$R_1 = -\rho(0,093 + 0,274j)$
$\gamma = 0,06$	$R_1 = -\rho(0,101 + 0,265j)$
$\gamma = 0,10$	$R_1 = -\rho(0,110 + 0,253j)$

Ces différentes valeurs de  $R_1$  apparaissent dans le diagramme polaire de la fig. 11 ; on y vérifie tout d'abord l'influence relativement faible du paramètre  $\gamma$  qui représente la capacité thermique de l'air. Mais le résultat le plus remarquable est le rôle très important joué par le paramètre  $\beta$  de la ventilation.

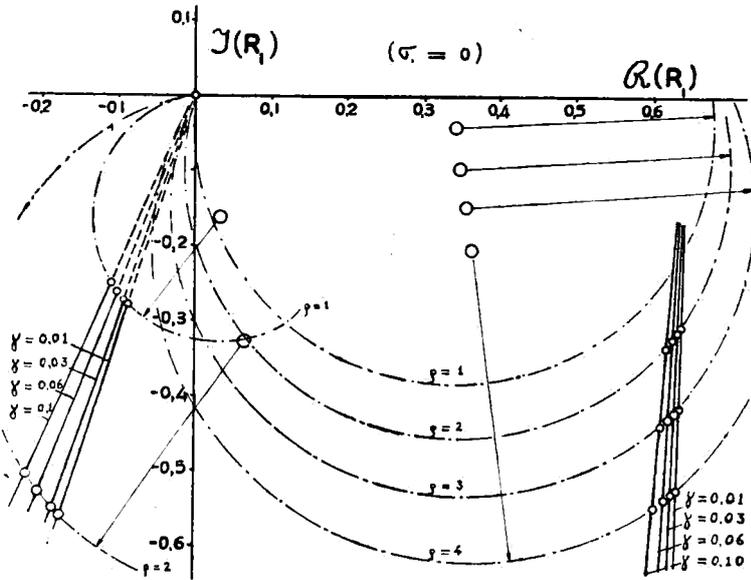


FIG. 11. — Affixes du coefficient de transfert fondamental  $R_1$  pour  $\beta = 0$  (ventilation nulle, points à gauche), et pour  $\beta = 1$  (points à droite), pour différentes valeurs des paramètres  $\rho_1$  et  $\gamma$ , dans l'hypothèse  $\sigma_1 = 0$ .

L'angle de phase  $\psi_1$ , fortement négatif lorsque  $\beta = 0$  se trouve ramené à des valeurs beaucoup plus faibles lorsque  $\beta = 1$ .

Or, d'après les considérations faites précédemment, la valeur  $\beta = 1$  semble peu élevée. En l'explicitant, on a :

$$\frac{\rho_a \cdot c_a \cdot v}{h''} \cdot \frac{S_0}{S} = 1$$

avec

$$\begin{aligned} \rho_a \cdot c_a &= 0,285 \cdot 10^{-3} \text{ cal/cm}^3 \cdot \text{°C} \\ h'' &= 0,013 \text{ cal/cm}^2 \text{ min. °C} \end{aligned}$$

on trouve  $v.S_0/S = 45,6$  cm/min, de sorte que pour  $S_0/S = 0,1$ , la vitesse équivalente de ventilation est de l'ordre de  $456$  cm/min =  $7,6$  cm/s.

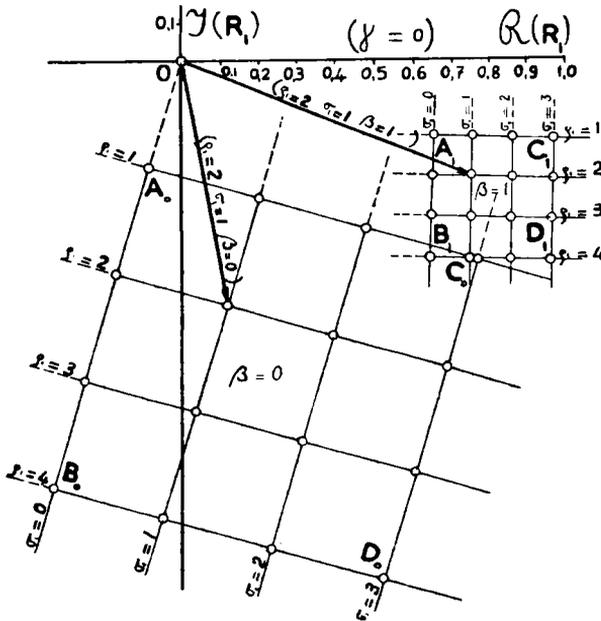


FIG. 12. — Affixes du coefficient de transfert fondamental  $R_1$  pour  $\beta = 0$  (ventilation nulle, grand quadrillage), et pour  $\beta = 1$  (petit quadrillage) pour différentes valeurs des paramètres  $\rho_1$  et  $\sigma_1$ , avec l'approximation  $\gamma = 0$ .

Cet exemple montre toute l'importance qu'il faut attacher à la ventilation dans l'étude des variations de température d'un volume d'air séparé de l'extérieur par une paroi.

Il est intéressant de reprendre l'exemple précédent à partir des expressions (28) en prenant de nouveau  $q = 1$  (oscillation fondamentale), mais en supposant  $\sigma_1 \neq 0$  et tout en négligeant  $\gamma$ .

On trouve alors, au lieu de (29) :

$$R_1 = \frac{5,14\beta + 0,76(\rho_1 + \sigma_1) + j[4,08\beta - 0,76(\rho_1 - \sigma_1)]}{5,14\beta + 1,75 + j(4,08\beta + 3,21)} \quad (30)$$

d'où le tableau :

		$\sigma_1 = 0$	$\sigma_1 = 3$
$\beta = 0$	$\rho_1 = 1$	$-0,083 - 0,282j (A_0)$	$0,766 - 0,531j (C_0)$
	$\rho_1 = 4$	$-0,333 - 1,13 j (B_0)$	$0,517 - 1,38 j (D_0)$
$\beta = 1$	$\rho_1 = 1$	$0,645 - 0,200j (A_1)$	$0,968 - 0,209j (C_1)$
	$\rho_1 = 4$	$0,636 - 0,522j (B_1)$	$0,959 - 0,531j (D_1)$

La *fig. 12* donne les réseaux rectilignes  $\rho_1 = 1, 2, 3, 4, \dots$ ,  $\sigma_1 = 0, 1, 2, 3, \dots$  pour les deux cas  $\beta_1 = 0$  et  $\beta_1 = 1$ . Les mailles de ces réseaux sont carrées, ce qui s'explique immédiatement si l'on considère la transformation d'axes  $\mathcal{R}(R_1) = L_1(\rho_1, \sigma_1)$ ,  $\mathcal{T}(R_2) = L_2(\rho_1, \sigma_1)$  définies par l'expression ci-dessus pour les parties réelles et imaginaires de  $R_1$  ; les fonctions  $L_1$  et  $L_2$  sont linéaires. Cette remarque reste valable pour l'expression générale (19) de  $R_1$ .

Une forte diminution en valeur absolue se manifeste une fois de plus dans le déphasage négatif du vecteur  $R_1$ , lorsqu'on passe de  $\beta = 0$  à  $\beta = 1$ , pour des valeurs données de  $\rho_1$  et  $\sigma_1$ . En comparant les arguments des affixes homologues,  $A_0$  et  $A_1$ , etc..., on voit que cet effet est le plus sensible pour les petites valeurs de  $\rho_1$  et de  $\sigma_1$ . Quant au module de  $R_1$ , on constate une tendance à la croissance pour les petites valeurs de  $\rho_1$  et  $\sigma_1$ , et à la décroissance pour les grandes valeurs de ces paramètres, lors du passage de  $\beta = 0$  à  $\beta = 1$ .

### 3.34 Variations périodiques des températures et de la ventilation.

Une étude plus attentive du paramètre  $\beta = \frac{W}{h''}$ , qui nous a servi à caractériser l'influence de la ventilation dans les échanges thermiques, a fait ressortir le rôle

capital que joue ce facteur dans l'étude thermique de l'habitation.

Remarquons que la ventilation dans une habitation est elle-même sous l'influence, d'abord de facteurs externes tels que la répartition des températures et le régime des brises, qui généralement varient *de manière assez périodique, avec une fréquence journalière*, ensuite de facteurs internes, tels que les coutumes des habitants en ce qui concerne l'ouverture ou la fermeture des portes et des fenêtres, habitudes qui dénotent en général la même périodicité.

Nous sommes ainsi conduit à poser :

$$W = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} W_p e^{ip\omega t} \quad (31)$$

expression dans laquelle comme précédemment  $W_p$  et  $W_{-p}$  sont conjugués, et donc  $W_0$  est réel.

On sait que la grandeur  $W$  ne peut jamais devenir négative ; la condition  $W \geq 0$  montre que le terme constant  $W_0$  est toujours l'un des termes les plus importants, sinon le plus important, ce qui justifie la première hypothèse  $W = \text{const} = W_0$  considérée au chapitre précédent.

L'analyse développée au chapitre 3.31 demeure inchangée jusqu'à la formule (13) incluse, pour l'expression de la température dans la paroi. En particulier l'équation (10) de conduction thermique demeure, ainsi que les conditions limites (3) et (8). Dans cette dernière équation il suffira de substituer l'expression (31) de  $W$ .

La détermination des coefficients  $A_q$  et  $B_q$  de (13) à partir de ces prémisses ne présente aucune difficulté théorique.

Seulement il apparaît, par l'effet modulateur du coefficient périodique  $W$ , un couplage entre les coefficients  $A$  et  $B$  de différentes harmoniques  $q$ .

Pour ne pas compliquer les écritures, nous allons expli-

citer les équations en nous limitant à l'hypothèse d'une modulation de  $W$  simplement sinusoïdale :

$$W = W_0 + W_1 e^{j\omega t} + W_{-1} e^{-j\omega t} \quad (32)$$

Dans ces conditions, la substitution de (11) dans (8) donne, pour  $n = d$ , en posant  $\beta_a = W_a/h''$  :

$$\begin{aligned} K'' \frac{\partial T_0}{\partial n} + \beta_0 \left( K'' \frac{\partial T_0}{\partial n} + T_0 \right) \\ + 2\Re \left[ \beta_1 \left( K'' \frac{\partial T_{-1}}{\partial n} + T_{-1} \right) \right] = \beta_0 T_0'' + 2\Re[\beta_1 T_{-1}''] \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} K'' \frac{dT_q}{dn} (1 + qj\gamma) + j\gamma T_q + \left[ \beta_{-1} \left( K'' \frac{\partial T_{q+1}}{\partial n} + T_{q+1} \right) \right. \\ \left. + \beta_0 \left( K'' \frac{\partial T_q}{\partial n} + T_q \right) + \beta_1 \left( K'' \frac{\partial T_{q-1}}{\partial n} + T_{q-1} \right) \right] \\ = \beta_{-1} T_{q+1}'' + \beta_0 T_q'' + \beta_q T_{q-1}'' \quad (q = 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (34)$$

Ces équations remplacent les conditions (15) tandis que les conditions (14) restent inchangées.

Nous nous contenterons ici, en nous inspirant d'une façon générale de la nature physique du problème et en particulier des résultats de nos expériences, de supposer que les conditions d'une convergence rapide de la série (11) sont réalisées.

De plus, comme nous ne désirons obtenir qu'une idée de l'influence d'une ventilation périodique, nous allons encore simplifier le problème en supposant que  $W_1$  est petit comparé à  $W_0$ , ce qui nous permet de déterminer en première approximation les  $T_q$  comme nous l'avons fait au chapitre 3.31 et d'introduire ensuite ces valeurs dans les équations (33) et (34) dans tous les termes qui se trouvent multipliés par  $W_1$  ou  $W_{-1}$ .

Logiquement nous devons alors négliger aussi les termes en  $C$  (capacité thermique de l'air) dont nous avons déjà reconnu la faible influence.

Désignons par  $T_q^*$  les expressions trouvées au chapitre

3.31 pour les coefficients  $T_a$ ; les équations (33) et (34) se réduisent dans ces conditions à :

$$\begin{aligned} K'' \frac{dT_0}{dn} + \beta_0 \left( K'' \frac{dT_0}{dn} + T_0 \right) \\ = 2R \left[ \beta_1 \frac{K''}{\beta_0} \frac{dT_{-1}^*}{dn} \right] + \beta_0 T_0'' \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} K'' \frac{dT_a}{dn} + \beta_0 \left( K'' \frac{dT_a}{dn} + T_a \right) \\ = \frac{\beta_{-1} K''}{\beta_0} \frac{dT_{a+1}^*}{dn} + \frac{\beta_1 K''}{\beta_0} \frac{dT_{a-1}^*}{dn} + \beta_0 T_a'' \end{aligned} \quad (36)$$

Jointes aux conditions (14), ces expressions doivent permettre la détermination des coefficients  $A_a$  et  $B_a$  de (13) avec la même aisance qu'au chapitre 2.31.

Il suffira de remplacer dans (16) et (17) l'expression  $\beta T_a''$  par :

$$\begin{aligned} \beta_0 T_0'' + \frac{\beta_{-1}}{\beta_0} K'' \frac{dT_{a+1}^*}{dn} + \frac{\beta_1}{\beta_0} K'' \frac{dT_{a-1}^*}{dn} \\ = \beta_0 T_0'' + \frac{\kappa''(1+j)\sqrt{q+1}\beta_{-1}}{\beta_0} (A_{a+1}^* - B_{a+1}^*) \\ + \frac{\kappa''(1+j)\sqrt{q-1}\beta_1}{\beta_0} (A_{a-1}^* - B_{a-1}^*) \end{aligned} \quad (37)$$

les coefficients A et B étant eux-mêmes donnés par les formules (16) et (17) dans lesquelles on aura posé  $\gamma = 0$ .

3.35 *Fluctuations apériodiques du régime des températures et de la ventilation.*

L'examen de thermogrammes et d'anémogrammes pris consécutivement durant plusieurs jours à l'extérieur révèle l'existence de fluctuations apparemment désordonnées qui viennent se superposer sur une variation moyenne régulière, dont la période est journalière. Il

en est évidemment de même pour la variation des températures et de la ventilation à l'intérieur d'une habitation, ces grandeurs étant en étroite dépendance avec les variations thermiques et aérodynamiques du climat extérieur.

Aussi l'analyse des enregistrements peut-elle se faire de deux manières : ou bien par la détermination de courbes moyennes à partir de l'ensemble des diagrammes d'un nombre suffisant de jours, la moyenne s'effectuant dans notre cas sur les parties homologues des journées d'enregistrement, ou bien en portant l'attention sur certains modes d'évolution typique de la grandeur déterminante (ici la température résultante à l'extérieur), en extrayant de l'enregistrement certaines journées ou suites de journées caractéristiques que l'on considère comme plus intéressantes pour l'analyse projetée.

a) Dans le premier cas, l'on admet qu'à la variation typique et périodique de la grandeur étudiée se superpose une variation désordonnée dont l'effet doit tendre à disparaître par suite de l'opération de moyenne effectuée aussi bien sur les diagrammes que sur les équations qui régissent la variation des températures intérieures en fonction des autres données climatologiques de l'extérieur.

Ceci se traduit par l'hypothèse :

$$\begin{aligned} T' &= T'_p + T'_s = \Sigma T'_q e^{jq\omega t} + T'_s \\ T'' &= T''_p + T''_s = \Sigma T''_q e^{jq\omega t} + T''_s \\ W &= W_p + W_s = \Sigma W_q e^{jq\omega t} + W_s \end{aligned} \quad (38)$$

Dans ces expressions,  $T'_s$ ,  $T''_s$  et  $W_s$  sont des fonctions de  $t$  à moyennes nulles.

A la solution  $T_p$  de l'équation linéaire (9) répondant aux conditions aux limites périodiques ( $T'_s = T''_s = W_s = 0$ ), il suffit d'ajouter le terme correcteur  $T_c$  que

nous montrerons *dans certaines conditions* être aussi une fonction de  $t$  à moyenne nulle, de façon à justifier l'opération de moyenne précédente sur la fonction inconnue  $T$ .

Nous voulons montrer que si les conditions extérieures sont données par (3) et (8), avec (30), la solution est donnée par l'expression :

$$T = \Sigma T_q e^{jq\omega t} + T_c = T_p + T_c \quad (39)$$

dans laquelle  $T_p$  a été déterminé précédemment en fonction des  $T'_p$ ,  $T''_p$ , etc. et où  $T_c$  est une fonction qui généralement tend en moyenne vers zéro sur un intervalle suffisamment grand, ainsi qu'il est supposé pour les fonctions  $T'_s$ ,  $T''_s$  et  $W_s$ .

Comme l'équation (9) est linéaire, de même que les conditions (3) et (8), la substitution de (39) donne :

$$\frac{\partial^2 T_c}{\partial n^2} = a^2 \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (40)$$

avec les conditions aux limites :

$$k \left( \frac{\partial T_c}{\partial n} \right)_e = h' (T_{ce} - T'_s) \quad (41)$$

et :

$$\begin{aligned} C \frac{\partial}{\partial t} \left[ K'' \left( \frac{\partial T_c}{\partial n} \right)_i + T_{ci} \right] + \left( \frac{\partial T_c}{\partial n} \right)_i (k + WK'') \\ + \left( \frac{\partial T_p}{\partial n} \right)_i W_s K'' + T_{ci} W + T_p W_s = T'_s W + T''_p W_s \end{aligned} \quad (42)$$

Désignons par une barre l'opération qui donne la moyenne pour chaque instant de la journée sur un certain nombre  $n$  de jours.

Ainsi sur l'intervalle  $0 \leq t \leq J$ , ( $J = 24$  heures) :

$$\bar{Y}(t) = \frac{1}{n} \left\{ y(t) + y(J+t) + \dots + y[(n-1)J+t] \right\}$$

Effectuant cette opération (linéaire) sur l'équation (40) et sur les conditions (40) et (42), nous obtenons :

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_c}{\partial x^2} = a^2 \frac{\partial \bar{T}_c}{\partial t} \quad (43)$$

$$(n = 0) \quad k \left( \frac{\partial \bar{T}_c}{\partial n} \right)_e = h' \bar{T}_{ce} \quad (44)$$

$$(n = d) \quad C \frac{\partial}{\partial t} \left[ K'' \left( \frac{\partial \bar{T}_c}{\partial n} \right)_i + \bar{T}_{ci} \right] + \frac{\partial \bar{T}_{ci}}{\partial n} (k + W_p K'') + \bar{T}_{ci} W_p = \overline{(T''_s - T''_{ac})} W_s \quad (45)$$

Dans les deux dernières équations on a tenu compte de ce que si  $Z_p$  est périodique de période  $J$ ,  $\overline{Y.Z_p} = \overline{Y}.Z_p$  et que par hypothèse :

$$\bar{T}'_s = \bar{T}''_s = \bar{W}_s = 0$$

puisque les composantes périodiques ont été définies par  $\bar{T}'_p = T'$ , etc. ( $0 \leq t \leq J$ ). En outre nous avons tenu compte de (5) en écrivant :

$$T''_a = T''_{ap} + T''_{ac}$$

de sorte que

$$K'' \left( \frac{\partial T_c}{\partial n} \right)_i + T_{ci} = T''_{ac}$$

L'ensemble formé par l'équation (43) et ses conditions frontières (44)-(45) montre que la solution  $T_c = 0$  ne peut exister que si

$$\overline{(T''_s - T''_{ac})} W_s = 0 \quad (46)$$

Cette condition peut encore s'écrire sous la forme

$$\overline{(T'' - T''_{ac})} W_s = 0 \quad (47)$$

puisque l'adjonction de parties périodiques dans la

parenthèse ne modifie pas la moyenne de ce produit.

En pratique, seul l'examen de mesures expérimentales permettra de *vérifier* directement si l'hypothèse (47) est valable. Dans l'affirmative, la fonction  $T_p$  qui a fait l'objet de l'analyse du chapitre 3.31 se confond avec la moyenne  $T$ .

S'il n'en est pas ainsi, la moyenne  $\bar{T}$  pourra être déterminée par la même analyse, à partir du système :

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial n^2} = a^2 \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \quad (48)$$

$$k \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial n} \right)_e = h' (\bar{T}_e - \bar{T}') \quad (49)$$

$$C \frac{\partial}{\partial t} \left[ K'' \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial n} \right)_i + \bar{T}_i \right] + \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial n} \right)_i (k + K'' \bar{W}) + \bar{W} \cdot \bar{T}_i = \bar{W} \cdot \bar{T}'' + (\bar{T}'' - \bar{T}_a'') \bar{W}_s \quad (50)$$

La seule modification par rapport au système (10), (3), (8) est l'apparition du premier membre de (47) dans le second membre de (50).

On conçoit qu'une corrélation importante peut parfaitement exister entre les fluctuations de la ventilation et celles de la différence de température entre l'air de ventilation et l'air ambiant à l'intérieur. Seule l'expérience peut montrer si cette correction n'est pas négligeable et s'il convient d'apporter certaines précautions dans l'interprétation des diagrammes à l'aide de l'analyse harmonique du chapitre 3.31.

b) Les fluctuations observées sur les thermogrammes enregistrés à l'intérieur et à l'extérieur des habitations peuvent encore avoir un intérêt autre que celui de donner des effets statistiques, tels que celui que nous venons de voir.

Ceci est surtout vrai des fluctuations dont la singularité par rapport à la marche normale « moyenne » des tem-

pératures est la mieux marquée. Ces dernières peuvent provenir, par exemple, d'une insolation brusque et relativement courte due au passage, au milieu d'un long intervalle de ciel couvert, d'une éclaircie devant le soleil.

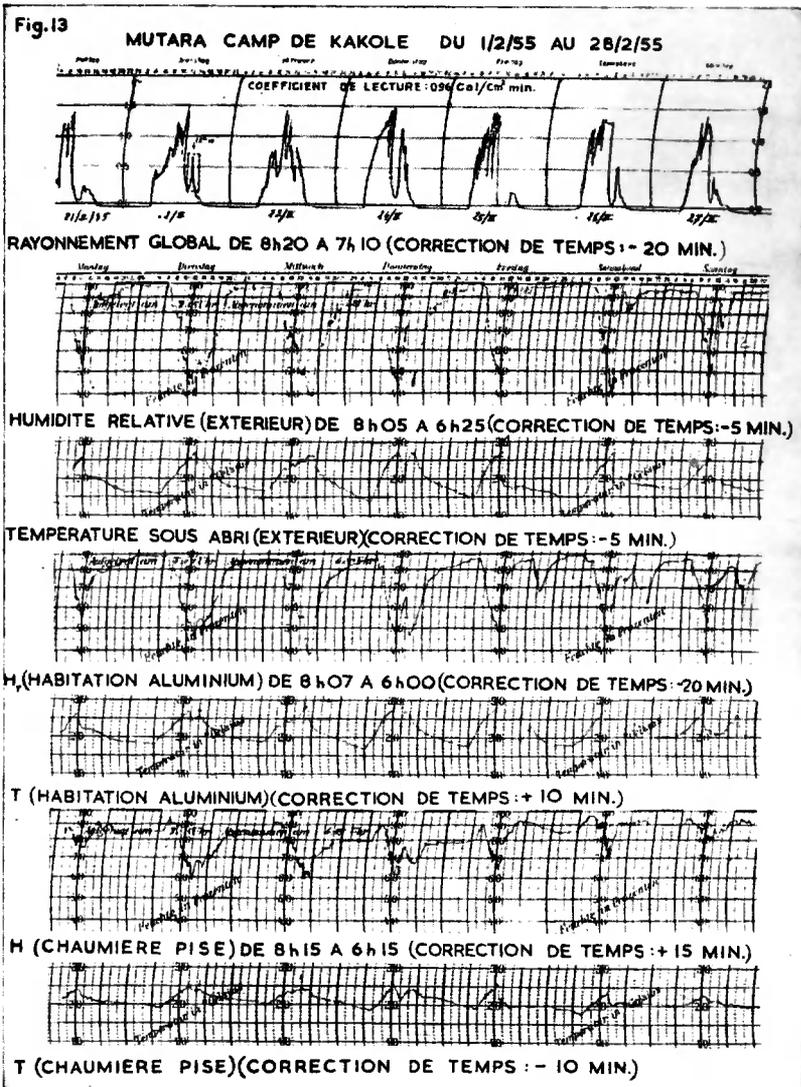


FIG. 13. — Les diagrammes hebdomadaires relevés du 21 au 28 février 1955 dans le kraal (fig. 15) du Mutara (Ruanda) se composent d'un actinogramme et de trois thermohygrogrammes (extérieur, habitation aluminium, chaumière pisé).

La *figure 13* qui reproduit un actinogramme et trois thermohygrogrammes pris au Mutara durant la semaine du 21 au 28 février 1955 montre fort bien l'effet de radiations intenses et passagères sur les températures à l'extérieur et à l'intérieur des habitations.

Prenons, par exemple, la brusque montée de la courbe du rayonnement global qui s'est produite le 22 février vers 15 h 10. Alors qu'il y correspond sur la courbe de température, à l'extérieur, une crête vers 15 h 55, celle-ci n'apparaît dans les habitations en aluminium et en pisé qu'à 16 h 10 et 16 h 25 respectivement.

On conçoit que l'étude de ces fluctuations soit susceptible de fournir des renseignements précieux.

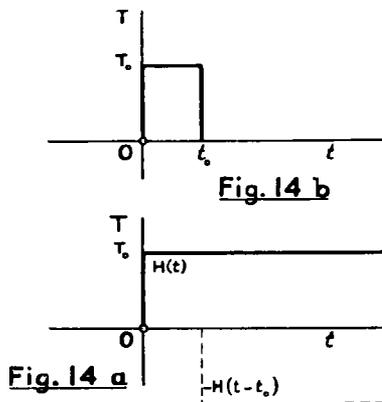


FIG. 14. — Formes théoriques d'une variation brusque de la « température d'insolation ».

Contentons-nous ici d'aborder le problème dans les conditions les plus simples. Calculons à cet effet la vitesse avec laquelle se propage la crête d'une onde thermique  $T(x, t)$  pénétrant dans un milieu semi-infini lorsque la face, qui le délimite, est soumise à une brusque montée de température  $T_0$  durant un laps de temps  $t_0$  (*fig. 14a*). Nous supposons qu'à l'instant initial l'équilibre thermique existe dans le milieu indéfini.

On sait qu'en soumettant cette face à une variation

brusque  $T_0$  de température qui se maintient par la suite, variation qui se représente par la *Step Function* «  $T_0 \cdot H(t)$  » (fig. 14b) :

$$T(0, t) = T_0 \cdot H(t) \quad (51)$$

l'accroissement de température dans le milieu indéfini est donné par [19]

$$T(x, t) = T_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{2\sqrt{t}}{ax} \right] \quad (52)$$

expression dans laquelle  $\operatorname{erf}(z)$  est la fonction dite « d'erreur » bien connue en calcul des probabilités (intégrale de la courbe « en cloche ») :

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi \quad (53)$$

La variation imposée de température, qui nous intéresse à la frontière  $x = 0$ , peut être représentée en faisant suivre la première *Step Function* d'une seconde qui annule la première à l'instant  $t_1$

$$T(0, t) = T_0 [H(t) - H(t - t_0)] \quad (54)$$

Le principe de superposition, valable puisque l'équation de la transmission de chaleur (7) est linéaire, nous permet d'écrire à partir de (52) la solution

$$T(x, t) = T_0 \left( \operatorname{erf} \frac{ax}{2\sqrt{t-t_1}} - \operatorname{erf} \frac{ax}{2\sqrt{t}} \right) \quad (55)$$

L'instant auquel la crête de l'onde représentée par (55) passe par le point  $x$  est donné par la condition :

$$\frac{dT}{dt} = 0$$

ce qui, par la substitution de (55), donne en posant

$$\zeta(\tau) = \frac{x^2 a^2}{6t(1-\tau)} \text{ et } \tau = t_1/t :$$

$$\left[ \zeta(0) \exp(-\zeta(0)) \right]^{3/2} - \left[ \zeta(\tau) \exp(-\zeta(\tau)) \right]^{3/2} = 0 \quad (56)$$

En pratique, il est surtout intéressant d'envisager le cas d'une paroi dont l'épaisseur est telle que le temps mis par la vague thermique à la franchir soit grand par rapport à la durée de la sollicitation sur la face externe :

$$\tau = t_1/t \ll 1.$$

La condition (56), écrite sous la forme :

$$\zeta(\tau) \cdot e^{-\zeta(\tau)} - \zeta(0) \cdot e^{-\zeta(0)} = 0 \quad (57)$$

peut être décomposée en série suivant les puissances croissantes de  $(t_1/t)$ .

En nous limitant ici aux premiers termes nous trouvons :

$$\zeta_0 = 1 - \frac{\tau}{2} - \frac{\tau^2}{6}$$

D'où nous tirons :

$$t \approx \frac{x^2 a^2}{6} \left( 1 + \frac{\tau}{2} + \frac{\tau^2}{12} \right) \quad (58)$$

Une première approximation s'obtient en posant  $t_1/t = 0$ .

On retrouve alors :

$$t_0 = \frac{x^2 a^2}{6} \quad (59)$$

C'est le temps qu'il faut à l'onde provoquée par une « impulsion » thermique sur la face extérieure pour

atteindre la profondeur  $x$  ; nous aurions pu la déterminer en annulant la dérivée seconde de (52) par rapport à  $t$ , (55) se réduisant à la dérivée première. On retrouve aussi l'expression bien connue de la vitesse de cette onde à l'arrivée :

$$\frac{dx}{dt_0} = \frac{3}{a^2 x} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{3}{2t_0}} \quad (60)$$

Nous pouvons, toujours dans l'hypothèse  $(t_1/t) \ll 1$  pour laquelle (58) est valable, nous servir de l'approximation (58) pour écrire :

$$t \sim \frac{x^2 a^2}{6} + \frac{t_1}{2} + \frac{t_1^2}{3x^2 a^2} \quad (61)$$

Si l'onde thermique s'était propagée sans s'élargir, on eût dû trouver

$$t = \frac{x^2 a^2}{6} + \frac{t_1}{2} ;$$

la valeur plus grande indiquée par (61) tient compte de la dyssymétrie décroissante de l'onde. Rappelons que (61) n'est valable que si  $t_1$  est très petit par rapport à  $t$ .

Il est évident que le temps (61) mis par l'onde à atteindre une profondeur  $x$  dans un milieu semi-infini, n'est pas le même que celui qu'il mettra à franchir l'épaisseur  $x = d$  d'une paroi. Les conditions de transfert thermique à la frontière  $x = d$  interviennent et modifient l'expression (52) de l'onde. Mais comme ces conditions font intervenir des grandeurs normalement variables telles que la température de l'air ambiant, que nous considérons comme étrangères au problème actuel, et puisque les mêmes réserves pourraient être formulées quant aux conditions de frontière pour  $x = 0$ , nous nous contenterons d'admettre qu'avant et après la transmission de l'onde d'une face à l'autre de la paroi les mêmes conditions d'équilibre thermique se retrouvent et que la

propagation thermique est suffisamment peu modifiée pour justifier l'expression (61), elle-même approchée.

Le problème considéré ci-avant n'est pas celui qui correspond à l'effet d'une radiation brusque, intense et passagère. Mais en fait le résultat précédent peut servir par une simple transposition.

L'action thermique du rayonnement I se traduit en effet par un flux de chaleur F dans la paroi considérée, suivant l'équation :

$$F = \left( k \frac{\partial T}{\partial n} \right)_e \approx \alpha I \quad (62)$$

$\alpha$  étant comme précédemment le coefficient d'absorption. En réalité l'approximation (62) a été écrite en admettant que durant l'intervalle de temps nécessaire à la transmission de l'onde à travers la paroi, les échanges de température avec l'extérieur sont négligeables comparés à l'apport dû au « choc » radiothermique.

Or ce flux F obéit à la même équation (10) que celle de la température. Il suffit en effet, dans le cas général, de multiplier par l'opérateur ( $k$  grad) les deux membres de (9). En réalité l'équation (10) resterait valable pour F, même si le coefficient  $k$  était variable dans l'espace, ce qui n'est pas vrai pour T.

Ramenons-nous aux conditions du problème posé dans 3.31. On trouve à la face extérieure de la paroi, suivant (1) et (2) :

$$T' = T'_a + \frac{\alpha I}{h'} = T_e + K' \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_e \quad (63)$$

et à la face intérieure, d'après (5) :

$$T''_a = T_i + K'' \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_i \quad (64)$$

Admettons un instant qu'on ait  $K' = K''$ .

La quantité  $T + K'' \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)$  obéit à l'équation (10).

Si on lui assigne des conditions initiales correspondant à une augmentation de valeur brusque et passagère, à la face extérieure suivant la courbe donnée par (54), (fig. 14b), on observera le passage de la crête de l'onde correspondant à la face intérieure de la paroi à un instant  $t$  donné approximativement par (61) :

$$t = \frac{d^2 a^2}{6} + \frac{t_1}{2} + \frac{t_1^2}{3d^2 a^2}$$

Cette crête est précisément celle de la température de l'air ambiant à l'intérieur,  $T''$ , suivant (64).

En réalité  $K' \neq K''$ , et en reprenant (63) sous la forme :

$$T'_a + \frac{\alpha I}{h'} + (K'' - K') \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_e = T_e + K'' \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_e$$

l'approximation (62) permet d'écrire :

$$T'_a + \frac{\alpha I}{h''} \simeq T_e + K'' \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_e \quad (65)$$

D'après les valeurs admises précédemment

$$h'' = 0,5 h'$$

de sorte que la différence normale entre les conductances des faces externes ( $h'$ ) et interne ( $h''$ ) de la paroi a pour effet de doubler approximativement la composante R radiothermique de la température « équivalente » externe (63), du point de vue de sa répercussion sur la température  $T''$  de l'air à l'intérieur. Remarquons ici, qu'à l'encontre des conventions précédentes, il faudra attribuer à  $h''$  une valeur qui dépend de la ventilation près de la paroi considérée, et que  $T''$  devra être mesurée au voisinage de cette paroi.

Il est intéressant d'évaluer le rapport entre la hauteur de la crête de l'onde au point  $x$  et celle de la crête initiale, imposée à la face externe.

Revenons à l'expression (55) ; il suffit d'y substituer la

valeur de  $t$  au moment du passage de la crête pour obtenir son amplitude.

Opérons la substitution

$$\simeq \frac{x^2 a^2}{6} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{t_1}{t}\right)$$

équivalente à (61); nous trouvons à partir de (55) :

$$\frac{T_{\max.}}{T_0} = \operatorname{erf} \sqrt{\frac{3}{2\left(1 + \frac{1}{2} \frac{t_1}{t}\right)\left(1 - \frac{t_1}{t}\right)}} - \operatorname{erf} \sqrt{\frac{3}{2\left(1 + \frac{1}{2} \frac{t_1}{t}\right)}}$$

En développant en série potentielle par rapport à  $t_1/t$  et en nous arrêtant à la première puissance, nous trouvons :

$$\frac{T_{\max.}}{T_0} \simeq \frac{t_1}{t} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} e^{-\frac{3}{2}} \simeq 0,1543 \frac{t_1}{t} \quad (66)$$

ou, en fonction de la distance  $x$  :

$$\frac{T_{\max.}}{T_0} \simeq 0,926 \frac{t_1}{a^2 x^2} \quad (67)$$

Le rapport entre les amplitudes de l'onde à l'arrivée et au départ est, en première approximation, proportionnel à la durée  $t_1$  de l'onde rectangulaire au départ, au coefficient de diffusivité  $a^{-2}$ , et inversement proportionnel au carré de la distance  $x$ .

Ce résultat (66) ou (67) n'est valable que pour des distances  $x$  pour lesquelles le temps de parcours  $t$  est très grand par rapport à  $t_1$ .

Ce même rapport (66) ou (67) peut être utilisé dans le problème de la transmission de l'onde  $T + K'(\partial T/\partial n)$ , et dans ce cas  $t$  est le temps qui sépare le début de l'augmentation brusque de la sollicitation thermique extérieure (de durée  $t_1$ ) :

$$T'_a + \frac{aI}{h''}$$

de l'instant correspondant au maximum de  $T_a''$ , température de l'air à l'intérieur. Cependant  $x$  reste effectivement la distance parcourue, c'est-à-dire l'épaisseur de la paroi, et  $a^{-2}$  la diffusivité de celle-ci. Il suffira de remplacer, au premier membre de (67),  $T_{\max}$  par  $(T_a'')_{\max}$  et  $T_o$  par  $T_a' + \alpha I / h''$ .

### 3.4 *Le problème thermique de l'habitation.*

3.40 L'étude analytique des variations de température à travers une paroi doit évidemment être mise à la base de l'étude thermique de l'habitation. On peut ici procéder de deux manières.

3.41 La première consiste à décomposer l'habitation en ses différentes parois et à étendre l'analyse précédente à chacune de ces parties, en la complétant pour tenir compte de l'interaction thermique des parois (échange de rayonnements, raccordements aux angles, etc...).

Dans ce cas, les sollicitations thermiques extérieures devront être déterminées séparément pour chaque paroi externe, en fonction de l'orientation (rayonnement solaire, vents).

On conçoit toutes les difficultés qu'entraînerait pareille méthode, et le travail considérable qui en résulterait, souvent hors de proportion avec l'incertitude qui entache généralement les valeurs des paramètres  $h'$ ,  $h''$  etc. Seuls certains cas peuvent échapper à cette remarque ; il en est ainsi là où l'importance des ouvrages (grands bâtiments, cité de maisons semblables, orientées de la même façon), ou encore l'étude d'une disposition architecturale particulière, justifieraient une étude plus précise.

En général, on pourra retirer des résultats pratiquement très suffisants d'une étude d'ensemble, suivant la méthode suivante ; nous y négligeons les effets d'interaction entre les différentes parois.

Considérons d'abord, pour simplifier, une maisonnette définissable par ses seules parois extérieures, les parois

internes n'intervenant pas comme séparateurs thermiques. Ceci exclut provisoirement la présence d'un plafond. C'est ce que nous appellerons l'habitation « unicellulaire ».

Soit alors  $T'^k$  la température extérieure équivalente pour la paroi K. Cette température

$$T'^k = \left( T'_a + \frac{\alpha I}{h'} \right)_k \quad (68)$$

est déterminée par la température de l'air extérieur au voisinage de la paroi, par la radiation I reçue par la paroi, fonction de l'orientation de la paroi et des ombres portées éventuelles dues à des corps avoisinants, par le coefficient d'absorption  $\alpha$ , et par la conductance superficielle  $h'$  (voir 3.34) ; cette dernière dépend aussi de l'intensité du vent et de son orientation par rapport à la paroi  $k$ .

Nous n'entrerons pas ici dans des détails concernant la détermination de I ; on trouvera assez d'informations dans la littérature [1], [15], [16] pour en faire l'application sans grande difficulté de principe à une paroi située dans un climat tropical, sous une latitude et suivant une orientation données.

En général, la grandeur  $T'^k$  n'est à aucun moment uniforme sur la superficie de la paroi considérée. Une première opération de moyenne, sur cette superficie, est ici nécessaire.

La fonction  $T'^k$  du temps est supposée connue ou calculable ; admettons qu'elle soit périodique et développons-la en série de FOURIER :

$$T'^k = \sum_a T'_a{}^k e^{ja\omega t}.$$

Soit alors  $T''$  la température avant mélange de l'air de ventilation, la même pour toutes les parois ; écrivons aussi :

$$T'' = \sum_a T''_a e^{ja\omega t}.$$

Avec

$$T'_a{}^k / T''_a = \rho_a^k + j\sigma_a^k$$

et connaissant les caractéristiques  $K^k$ ,  $K''^k$ ,  $\beta^k$  ( $\gamma^k$  est négligé) de la paroi, nous pouvons déterminer le rapport complexe

$$R_q^k = T_{aa}''^k / T_a$$

de façon que la température de l'air à l'intérieur au voisinage de la paroi considérée soit donnée par l'expression :

$$T_a''^k = \sum_q R_q^k T_q'' e^{jq\omega t}$$

Soit  $S$  la surface totale des parois (murs, toit) et  $S^k$  la surface de la paroi  $k$  ; nous pourrions définir la température intérieure moyenne de l'habitation par :

$$T_a'' = \sum_k \frac{S^k T_a''^k}{S} = \sum_q T_{aq}'' e^{jq\omega t} \tag{69}$$

ce qui pour l'harmonique de rang  $q$ , donne :

$$T_{aq}'' = (T_q'' / S) \sum_k S^k R_q^k \tag{70}$$

d'où, pour l'habitation unicellulaire :

$$R_q = T_{aa}'' / T_q'' = \sum_k \frac{S^k R_q^k}{S} \tag{71}$$

S'il s'agit d'une construction pluricellulaire du point de vue thermique, il faut noter que la température intérieure d'une cellule représente la température extérieure de la cellule voisine, et ne peut être connue sans une analyse qui fait intervenir simultanément les différentes cellules de l'habitation. Si l'on remarque que  $R_q^k$  est une fonction linéaire de  $\rho_q^k + j\sigma_q^k$ , on voit que l'équation (70) fait dépendre la composante  $q$  de la température intérieure de façon linéaire des composantes homologues des températures équivalentes « extérieures » à la cellule considérée.

On dispose ainsi d'autant d'équations linéaires non homogènes que de cellules et donc que d'inconnues.

Nous ne considérons ici que le cas de l'habitation bi-

cellulaire, les deux parties étant constituées de l'ensemble des pièces proprement dites et de l'espace entre le plafond et le toit. En général si les portes sont ouvertes, on peut admettre que les parois intérieures ne jouent tout au plus qu'un rôle de capacité thermique, que nous négligerons ici.

Par ailleurs, l'extension à un plus grand nombre de cellules se ferait de façon analogue.

Écrivons l'équation (70) pour chacune des deux cellules que nous désignerons par les indices 1 et 2 :

$$\begin{aligned} T''_{aq1} &= (T''_{q1} / S_1) \left( \sum_{k1} S^{k1} R_q^{k1} + S_{1,2} R_q^{1,2} \right) \\ T''_{aq2} &= (T''_{q2} / S_2) \left( \sum_{k2} S^{k2} R_q^{k2} + S_{2,1} R_q^{2,1} \right) \end{aligned} \quad (72)$$

Les indices de sommation  $k_1$  et  $k_2$  se rapportent respectivement aux parois extérieures des cellules 1 et 2 ; celles-ci sont séparées par la paroi intérieure de surface  $S_{1,2} = S_{2,1}$ . On a

$$S_1 = \sum_{k1} S^{k1} + S_{1,2} \quad S_2 = \sum_{k2} S^{k2} + S_{2,1}$$

et nous avons admis que les températures avant mélange de l'air de ventilation pouvaient être différentes pour les deux cellules :

$$T''_{q1} \text{ et } T''_{q2}$$

Les coefficients de transfert  $R_q^{1,2}$  et  $R_q^{2,1}$  à travers la paroi commune diffèrent en ce qu'il faut y intervertir les rôles des paramètres  $h'$  et  $h''$ , tenir compte de coefficients différents de ventilation  $\beta$  et qu'on a :

$$\rho_q^{1,2} + j\sigma_q^{1,2} = \frac{T''_{aq2}}{T''_{aq1}} = (\rho_q^{2,1} + j\sigma_q^{2,1})^{-1}$$

si l'on néglige l'effet du rayonnement à l'intérieur de l'habitation.

Le système (72) comporte deux équations linéaires non homogènes dans les inconnues  $T''_{aq1}$  et  $T''_{aq2}$  qui se trouvent ainsi déterminées.

Nous n'entrerons pas ici plus avant dans cette analyse, dont on perçoit de suite la complication relative.

Rappelons pour terminer que les grandeurs  $T'_q$ ,  $T''_q$ ,  $T''_{aq}$ ,  $R_q$ , etc. sont complexes. On aura souvent intérêt à les représenter dans le plan complexe par des vecteurs. Les produits et sommes indiqués dans les formules (70), (71), etc. s'effectuent alors très simplement dans ce plan par les opérations correspondantes sur les vecteurs représentatifs.

3.42 Nous nous contenterons ici d'envisager une méthode simplifiée, inspirée des considérations précédentes.

Si l'on s'intéresse à la température de l'air de l'une des cellules de l'habitation, il est évident que, lorsque les sollicitations thermiques extérieures sont périodiques, avec par exemple une fréquence diurne, la variation de cette température présente la même périodicité. De manière plus précise, la décomposition en série de FOURIER complexe, sous la forme :

$$y = \sum_{q=-\infty}^{+\infty} Y_q e^{jq\omega t}$$

appliquée à toutes les grandeurs périodiques, permet de les caractériser en amplitude et en phase, dans leurs différentes harmoniques, par les coefficients complexes  $Y_q$ .

Les développements précédents montrent que la composante  $T''_{aq}$  de la température de l'air intérieur est une fonction linéaire des composantes de même rang de la température de l'air extérieur  $T'_{aq}$ , de l'intensité globale de rayonnement  $I_q$  et de la température de l'air de ventilation  $T''_q$ ; très souvent nous pourrions poser  $T_{aq} = T''_q$ . Mais de toute façon, dans un climat donné, on peut admettre que les rapports  $T'_{aq}/T''_q$  et  $I_q/T''_q$  sont des constantes complexes connues, de sorte qu'en

définitive nous pouvons écrire en première approximation :

$$T''_{a,q} = R_q \cdot T''_q. \quad (73)$$

Il faut ici remarquer que nous n'avons pas tenu compte de l'effet d'un vent variable sur le transfert thermique à l'extérieur.

En fait la variation des coefficients  $h'$  de conductance sur les surfaces externes sous l'effet du vent provoquerait l'apparition d'un effet couplé des différentes harmoniques  $T''_q$  et l'on aurait :

$$T''_{a,q} = \sum_{p=-\infty}^{+\infty} R_{q,p} T''_{q+p}. \quad (74)$$

Nous avons déjà constaté un effet analogue en introduisant une ventilation variable et périodique à l'intérieur de l'habitation. Si l'on néglige cette périodicité pour ne tenir compte que de la ventilation moyenne, nous pourrions nous servir de (73) dans la suite. Mais si la périodicité est suffisamment marquée, nous pourrions introduire un couplage entre des termes voisins et écrire :

$$T''_{a,q} = R_{q,-1} T''_{q-1} + R_q T''_q + R_{q,+1} T''_{q+1}$$

les coefficients  $R_{q,-1}$  et  $R_{q,+1}$  étant fonctions de l'amplitude et du déphasage de la première harmonique du vent.

Nous pensons que la détermination de ces coefficients complexes  $R_q$  pour  $q = 0$  et, éventuellement, des coefficients  $R_{q,p}$  pour  $q = 0, 1$  et  $p = -1, 0$  et  $+1$ , doit permettre d'obtenir une caractérisation quantitative intéressante du comportement thermique de l'habitation.

Une dernière étape à franchir dans la voie de la généralisation consiste à envisager l'habitation comme une grande coque, à laquelle peut s'étendre l'analyse faite précédemment sur le comportement thermique de l'écran partiel que forme une paroi plane.

Nous sommes ainsi conduits à introduire des paramètres tels que  $K' = \frac{k\lambda}{h'}$ , où  $k$  représente le coefficient de conductibilité thermique moyenne de la coque hétérogène,  $h'$  un coefficient de conductance superficielle moyenne des parois du côté intérieur, et  $\lambda = a\sqrt{\omega/2}$  un coefficient proportionnel à la racine carrée de la fréquence fondamentale du cycle de température considéré ; ensuite  $K'' = \frac{k\lambda}{h''}$ , où  $h''$  représente la conductance superficielle moyenne de la coque du côté extérieur. On négligera généralement le paramètre  $\gamma$ , proportionnel à la capacité thermique de l'air dans l'habitation.

Quant à  $\delta = d\lambda$ , il devra représenter une épaisseur moyenne équivalente de la coque.

Par ailleurs apparaîtront aussi des paramètres, définis comme précédemment et relatifs aux facteurs climatiques, tels que  $\beta = \frac{W}{h''}$ , où  $W$  est un coefficient croissant avec la ventilation interne et le mélange d'air qu'entraîne un apport d'air extérieur. Le paramètre complexe  $\rho_q + j\sigma_q$  continuera à représenter le rapport des vecteurs de l'harmonique de rang  $q$  de la température initiale de l'air de ventilation et de la température équivalente extérieure :

$$T'_q = T_{a_q} + \frac{\alpha I_q}{h'}$$

où  $\alpha$  est un coefficient d'absorption moyen du rayonnement global pour toute l'habitation ; ce rayonnement  $I$  est lui-même mesuré sur une surface horizontale. En réalité, il devrait être donné par le rayonnement spécifique moyen reçu par la projection horizontale de l'habitation (surface bâtie), en tenant compte des ombres portées dues à la présence d'arbres, etc. dans le voisinage.

La généralisation précédente ne peut être valable

que pour de petites constructions, par exemple du type bungalow. Nous considérons de toute manière que cette restriction doit être mise à la base de l'emploi de la méthode simplifiée exposée dans ce chapitre. Celle-ci revient à supposer que les échanges thermiques de l'habitation sont régis par des lois analogues à celles que nous avons analysées dans le cas de la paroi plane, [équation (10), conditions aux limites (3) et (8)].

Quant aux paramètres énumérés ci-avant, seule l'expérience devra permettre de mieux délimiter leurs domaines de variations, tout en révélant davantage le rôle qu'ils remplissent selon la signification physique que nous leur avons attribuée.

### 3.5 *Application de la théorie.*

3.50 Nous avons vu qu'il était possible de concevoir l'étude expérimentale des habitations de deux manières différentes : la méthode harmonique et la méthode impulsionnelle.

Dans le premier cas, il s'agit de dégager, des enregistrements effectués sur un nombre assez grand de périodes fondamentales, une variation moyenne que nous considérerons comme la composante périodique.

La méthode d'analyse en fonction du climat réel est probablement la plus précise, mais elle exige des enregistrements relativement longs. Nous avons admis qu'en ce qui concerne la périodicité diurne, qui par la force des choses sera la seule à nous occuper ici, des enregistrements couvrant quatre semaines étaient suffisants, et qu'à la rigueur quinze jours pouvaient convenir.

La méthode impulsionnelle, décrite au chapitre 3.35*b*, peut se contenter de quelques heures d'enregistrements, mais elle est moins exacte, car elle introduit des simplifications importantes sur la forme mathématique de l'onde thermique imposée à l'habitation. De plus, elle est incomplète, puisqu'elle ne donne qu'une idée de la

conductance et de la conductivité des parois. Elle convient mieux en quelque sorte à l'étude individuelle rapide des différentes parois.

Nous aurons l'occasion d'utiliser ces deux procédés dans les exemples suivants.

3.51 *Expériences effectuées au Mutara* (Ruanda, climat de savane boisée, chaud et sec, altitude 1.250 m).

Ainsi que nous l'avons indiqué brièvement au chapitre 3.32, des expériences ont été effectuées durant plusieurs mois dans un « kraal » servant de campement à des capteurs de mouches tsé-tsé, dans une chaumière en pisé et dans une maisonnette en aluminium du type ALTENT. Seules des mesures de température, humidité et rayonnement global ont pu être faites ; la *fig. 13* reproduit un actinogramme et 3 thermohygrogrammes pris durant la semaine du 21 au 28 février 1955.

Faute d'anémographe, la variation du vent n'a pu être enregistrée. Aussi l'interprétation des résultats suivant les directives de la théorie devra-t-elle se limiter à la forme la plus simple donnée par (73).

La *fig. 15* donne la disposition des différents instruments à l'extérieur et à l'intérieur des habitations. On remarquera que la maisonnette en aluminum comporte une cloison diamétrale, partielle. La chaumière est munie d'une « barza » minuscule à la façade d'entrée et sur les côtés ; les parois intérieures y séparent des pièces qui communiquent par de simple baies.

Le tableau XXVIa donne les valeurs moyennes bi-horaires du rayonnement global pour trois périodes de 28 jours, prises dans les mois d'octobre et novembre 1954, ainsi que janvier 1955.

La *fig. 16* donne les vecteurs  $(A_1, B_1)$  et  $(A_2, B_2)$  des deux premières harmoniques de ces variations périodiques moyennes ; les termes des séries de

FOURIER (1) et (5) ont été calculés sur 12 points et se trouvent mentionnés dans les tableaux XXVIb et XXVIc.

Les valeurs moyennes bi-horaires des températures ont été calculées pour les mêmes périodes et sont consignées dans le tableau XXVII. Alors que les lectures des températures se font au dixième du degré, les calculs ont été effectués en tenant compte du centième, de façon à ne pas ajouter une dispersion supplémentaire à celle due aux erreurs de mesure.

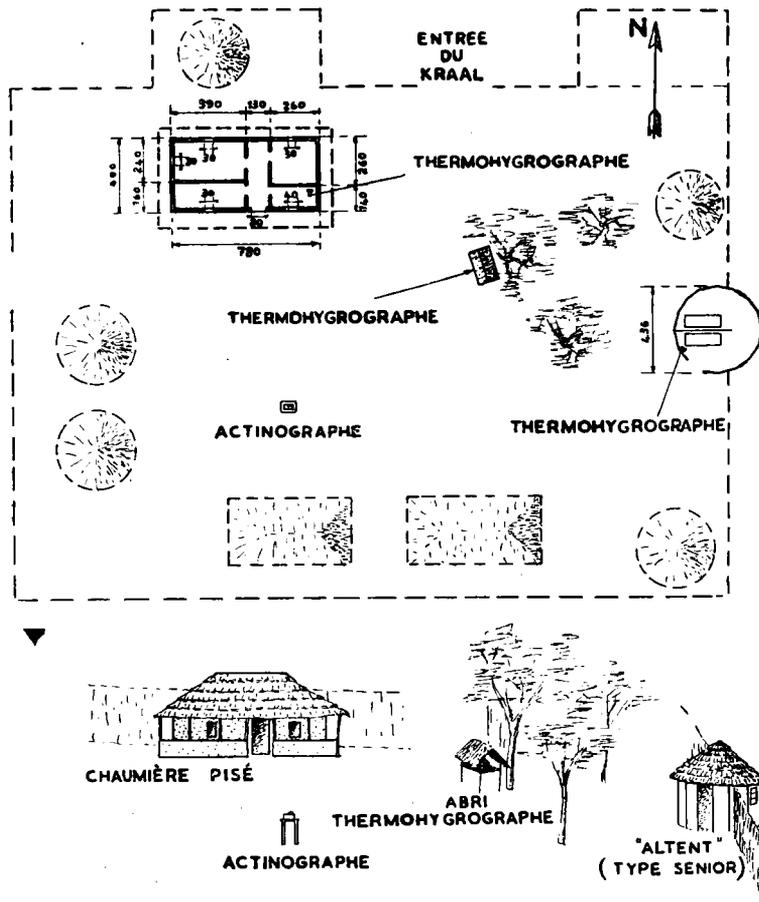


FIG. 15. — Schéma donnant la disposition des instruments enregistreurs et des deux habitations étudiées au camp de Kakole, au Mutara, Ruanda.

Les *fig. 17* contiennent les courbes de variation diurne moyenne pour les trois mois considérés, pour l'extérieur, l'habitation en aluminium et la chaumière en pisé.

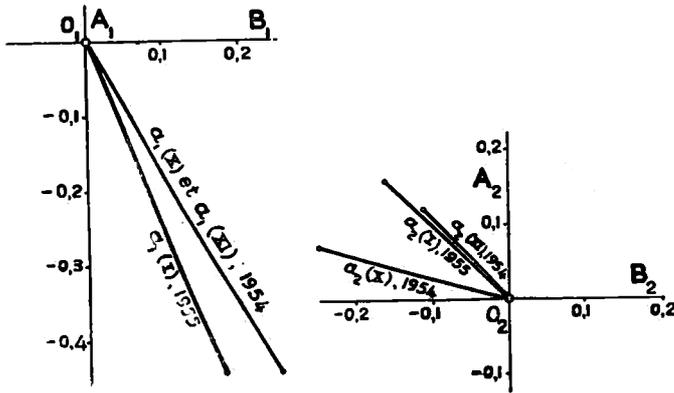


FIG. 16. — Vecteurs représentant les deux premières composantes harmoniques (indices 1 et 2) de la variation diurne du rayonnement global reçu par une surface horizontale, pour les mois d'octobre 1954, novembre 1954 et janvier 1955 (unité : cal/cm<sup>2</sup> min).

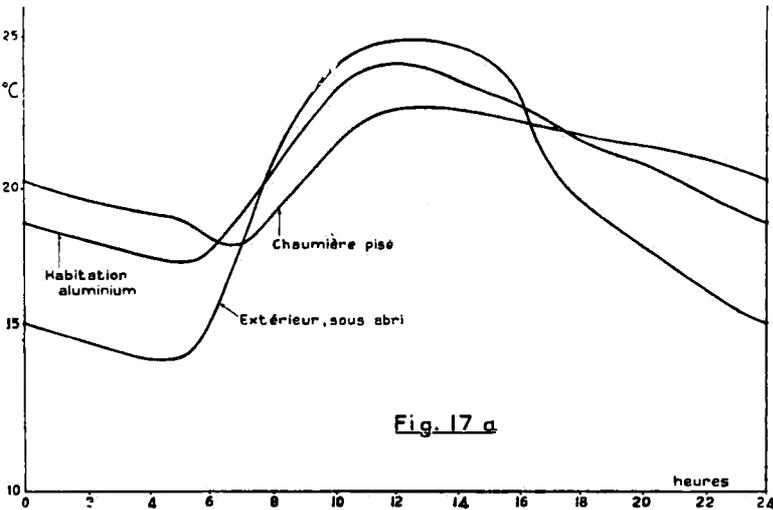


FIG. 17 a. — Mutara. Variation moyenne des températures pour la période du 4.10 au 31.10.1954.

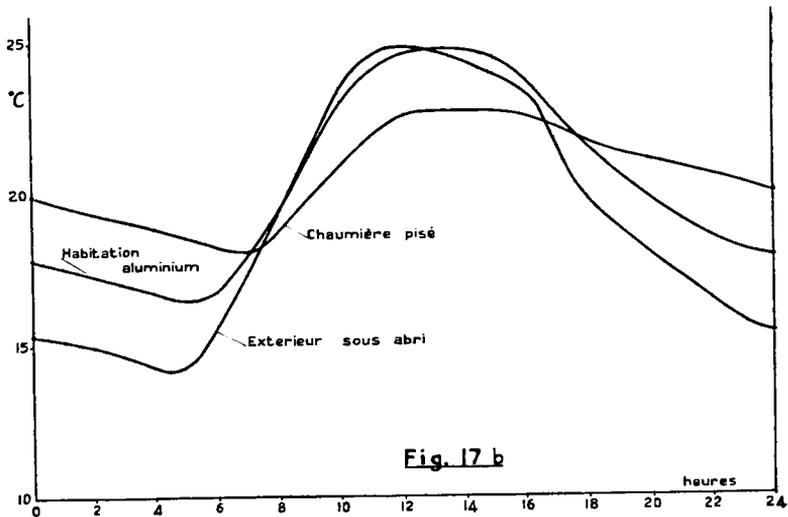


FIG. 17 b. — Mutara. Variation moyenne des températures pour la période du 1.11 au 28.11.1954.

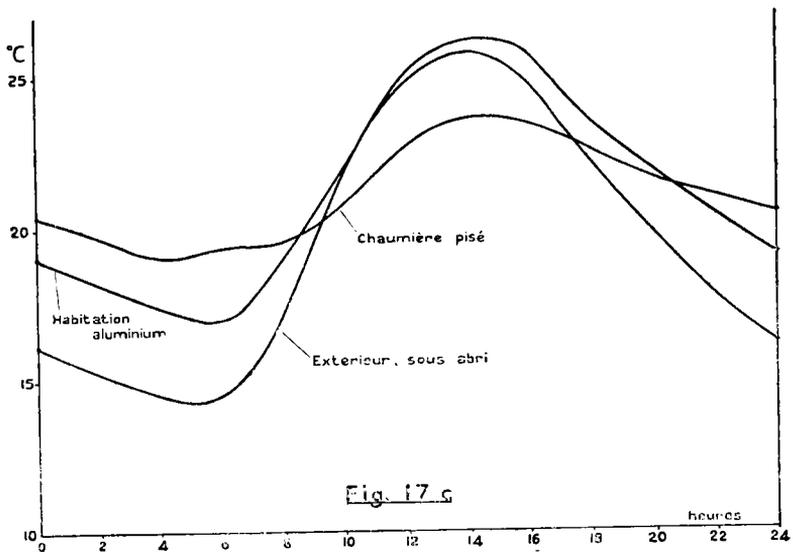


FIG. 17 c. — Mutara. Variation moyenne des températures pour la période du 3.1. au 30.1.1955.

Tableau XXVIa.

	du 4 au 31 octobre 1954	du 1 au 28 novembre 1954	du 3 au 30 janvier 1955
0 h	0,00	0,00	0,00
2 h	0,00	0,00	0,00
4 h	0,00	0,00	0,00
6 h	0,00	0,00	0,01
8 h	0,55	0,44	0,30
10 h	1,11	0,90	0,71
12 h	1,10	1,11	1,01
14 h	0,79	0,85	0,94
16 h	0,41	0,43	0,50
18 h	0,04	0,05	0,12
20 h	0,00	0,00	0,00
22 h	0,00	0,00	0,00

Tableau XXVIb.

$A_0$	0,333	0,315	0,299
$A_1$	-0,44	-0,44	-0,44
$B_1$	+0,25	+0,25	+0,18
$A_2$	+0,07	+0,12	+0,16
$B_2$	-0,25	-0,11	-0,16
$A_3$	+0,06	+0,02	-0,02
$B_3$	+0,02	+0,02	+0,03
$A_4$	0,00	+0,01	+0,01
$B_4$	+0,05	+0,02	+0,01

Tableau XXVIc.

$a_1$	0,507	0,507	0,476
$\text{tg } \vartheta_1$	-1,760	-1,760	-2,444
$t_1$	4 h 01	4 h 01	4 h 30
$a_2$	0,260	0,163	0,226
$\text{tg } \vartheta_2$	-0,280	-1,091	-1,000
$t_2$	6 h 31	7 h 35	7 h 30
$a_3$	0,063	0,028	0,036
$a_4$	0,050	0,017	0,014
$a_2/a_1$	0,513	0,321	0,475
$a_3/a_1$	0,124	0,055	0,076
$a_4/a_1$	0,099	0,033	0,029

Variation diurne moyenne du rayonnement global reçu par une surface horizontale (unité : cal/cm<sup>2</sup> min.). a : Valeurs moyennes bihoraires ; b : coefficients de la série de FOURIER (1) et c : amplitudes  $a_q$  et déphasages  $\phi_q$  correspondants. Mutara (Ruanda), mois d'octobre et novembre 1954, et janvier 1955.

Tableau XXVII.

Dates	Heures	Extérieur	Habitation aluminium	Chaumière pisé
Du	0	15,53	18,86	20,26
	2	14,92	18,29	19,60
4	4	14,37	17,77	19,11
	6	15,56	17,91	18,34
au	8	20,89	20,62	19,14
	10	24,03	23,26	21,50
31	12	24,89	24,13	22,61
X	14	24,70	23,52	22,60
1954	16	23,02	22,77	22,19
	18	19,58	21,56	21,83
	20	18,05	20,85	21,39
	22	16,62	19,74	20,95
Du	0	15,31	17,84	19,98
	2	14,98	17,23	19,39
1	4	14,31	16,79	18,91
	6	15,41	16,72	18,30
au	8	19,21	19,39	18,76
	10	23,28	22,73	20,83
28	12	24,80	24,56	22,53
XI	14	24,26	24,64	22,69
1954	16	23,36	23,82	22,55
	18	19,77	21,47	21,63
	20	17,92	19,71	21,02
	22	16,50	18,60	20,59
Du	0	16,16	19,10	20,41
	2	15,24	18,19	19,72
3	4	14,52	17,50	19,05
	6	14,52	16,97	18,39
au	8	17,15	19,07	18,51
	10	21,84	22,78	20,80
30	12	24,82	25,14	22,69
1	14	25,78	26,18	23,68
1955	16	24,86	25,75	23,45
	18	22,15	23,43	22,53
	20	19,69	21,73	21,53
	22	17,77	20,37	21,04

Variation diurne moyenne de la température (°C), à l'extérieur à l'ombre, dans une habitation en aluminium et dans une chaumière en pisé. Mutara (Ruanda), mois d'octobre et novembre 1954, et janvier 1955.

Les tableaux XXVIIIa et XXVIIIb mentionnent les coefficients des séries de FOURIER correspondantes, respectivement sous les formes (1) et (5). Rappelons que les instants  $t_1$  et  $t_2$  indiquent les phases des sinusoides d'ordre 1 et 2, par l'heure de la journée (à la précision de la minute) où se situe le début de la courbe croissante.

Ces instants sont importants parce qu'ils donnent les déphasages entre les sinusoides à l'intérieur et à l'extérieur pour une harmonique donnée, c'est-à-dire l'argument des coefficients complexes  $R_q$ .

Ces déphasages  $\Delta t$  ont été reportés dans le tableau XXVIIIc en même temps que les quotients  $a_q \text{ int.} / a_q \text{ ext.}$  formés par les amplitudes des harmoniques de température à l'intérieur et à l'extérieur.

Tableau XXVIIIc.

Mois	Habitation aluminium				Chaumière pisé			
	$\frac{a_1 \text{ int.}}{a_1 \text{ ext.}}$	$\Delta t_1$	$\frac{a_2 \text{ int.}}{a_2 \text{ ext.}}$	$\Delta t_2;$	$\frac{a_1 \text{ int.}}{a_1 \text{ ext.}}$	$\Delta t_1$	$\frac{a_2 \text{ int.}}{a_2 \text{ ext.}}$	$\Delta t_2$
Octobre (4-31)1954	0,552	1 h 19	0,243	0 h 26	0,410	2 h 22	0,219	-0 h 32
Novembre (1-28)1954	0,768	0 h 35	0,762	-0 h 03	0,405	2 h 22	0,522	0 h 45
Janvier (3-30)1955	0,818	0 h 06	0,668	0 h 40	0,433	1 h 20	0,647	0 h 57

Les vecteurs  $(A_1, B_1)$  et  $(A_2, B_2)$  ont été tracés pour les trois variations de températures dans la figure 18a (voir la signification des symboles p. 134).

Ces vecteurs se présentent généralement dans l'ordre : extérieur, maisonnette aluminium, chaumière pisé, ainsi que l'on doit s'y attendre. Les fluctuations sont à attribuer, si l'on fait abstraction de toute perturbation des appareils enregistreurs, d'abord à l'effet de la ventilation, mais aussi à certaines modifications dans le phéno-

mène thermique, dont nous n'avons pas tenu compte : allumage de feux à l'intérieur, etc...

C'est ainsi qu'un des diagrammes de température (*Fig. 13*) révèle dans l'habitation en aluminium de fortes augmentations de températures qui apparaissent de 18 h à 20 h et au-delà, à partir du vendredi 25 février 1955 ; ce jour correspond à l'arrivée de l'Européen chargé du contrôle du camp, et l'on voit que l'allumage d'une lampe au pétrole provoque une augmentation de température de 4 à 5°C jusqu'au moment de l'extinction des lumières, à partir duquel le refroidissement se produit rapidement.

Parmi les valeurs des déphasages qui, dans l'ensemble, paraissent normales, on remarque deux discordances pour les déphasages des harmoniques d'ordre 2,  $\Delta t_2$  (novembre pour l'habitation en aluminium, et surtout octobre pour la chaumière en pisé).

La dernière anomalie relative peut s'expliquer par un examen attentif de la courbe de la température, pour la chaumière, en octobre (*fig. 17a*).

On y remarque une concavité prononcée de 6 à 8 heures du matin, que l'on peut mettre en relation avec le refroidissement que doit provoquer l'ouverture de la porte extérieure entre 5 et 6 heures. D'autre part, une légère convexité entre 18 et 22 heures trahit sans doute l'influence de la fermeture de la porte vers 18 heures et peut-être aussi de l'allumage de feux (lampes à pétrole, etc.) à partir de la même heure.

Il ne faut pas oublier en effet que, sous ces basses latitudes, l'obscurité se fait très vite à ce moment de la journée.

Même si l'on admet que ces habitudes correspondent à des heures fixes, on conçoit qu'ils peuvent présenter des déphasages variables d'un mois à l'autre, par rapport à une courbe de température extérieure équivalente, elle-même caractérisée par une évolution saisonnière.

Puisque nous devons nous limiter ici à l'analyse simplifiée qui ne met en jeu que les rapports complexes  $R_1$  et  $R_2$  des vecteurs  $(a_q, \phi_q)$  int. et  $(a_q, \phi_q)$  ext. pour  $q = 1$  et 2, en même temps que le rapport réel  $R_0$  des températures moyennes, nous avons tracé dans la *fig. 19* les vecteurs  $R_1$  et  $R_2$  à partir des données du tableau XXVIIIa ; on pourrait évidemment aussi les déduire des *figures 18*.

Tableau XXVIIIa.

		Extérieur	Habitation aluminium	Chaumière pisé
Du 4 au 31-X-1954	A <sub>0</sub>	19,35	20,77	20,79
	A <sub>1</sub>	- 5,13	- 2,54	- 1,05
	B <sub>1</sub>	- 0,89	- 1,43	- 1,87
	A <sub>2</sub>	+ 1,29	+ 0,76	+ 0,68
	B <sub>2</sub>	- 0,37	- 0,30	+ 0,08
	A <sub>3</sub>	+ 0,35	- 0,08	- 0,25
	B <sub>3</sub>	+ 0,27	+ 0,32	+ 0,19
	A <sub>4</sub>	- 0,38	+ 0,06	+ 0,31
	B <sub>4</sub>	+ 0,08	- 0,03	- 0,15
Du 1 au 28-XI-1954	A <sub>0</sub>	19,09	20,60	20,29
	A <sub>1</sub>	- 4,76	- 3,36	- 1,06
	B <sub>1</sub>	- 2,16	- 2,20	- 1,86
	A <sub>2</sub>	+ 0,99	+ 0,99	+ 0,62
	B <sub>2</sub>	+ 0,31	+ 0,30	+ 0,34
	A <sub>3</sub>	+ 0,14	0,00	- 0,19
	B <sub>3</sub>	+ 0,14	+ 0,24	+ 0,05
	A <sub>4</sub>	- 0,27	- 0,14	+ 0,01
	B <sub>4</sub>	- 0,15	- 0,14	- 0,14
Du 3 au 30-I-1955	A <sub>0</sub>	19,54	21,35	20,98
	A <sub>1</sub>	- 4,20	- 3,36	- 1,16
	B <sub>1</sub>	- 3,67	- 3,11	- 2,13
	A <sub>2</sub>	+ 1,09	+ 0,67	+ 0,58
	B <sub>2</sub>	+ 0,57	+ 0,52	+ 0,57
	A <sub>3</sub>	- 0,14	- 0,07	- 0,15
	B <sub>3</sub>	+ 0,19	+ 0,15	0,00
	A <sub>4</sub>	- 0,13	- 0,12	+ 0,29
	B <sub>4</sub>	- 0,16	+ 0,19	- 0,14

Coefficients de la série de FOURIER (1) pour les différentes variations diurnes moyennes de température données par le tableau XXVII et les *fig. 17 a, b et c*. (unité : degré centigrade).

Tableau XXVIIIb.

		Abri Extérieur	Habitation aluminium	Chaumière pisé
Du 1 au 31-X-1954	$A_0$	19,35	20,77	20,79
	$a_1$	5,210	2,876	2,140
	tg $\sigma_1$	5,764	1,776	0,561
	$t_1$	6 h 39	7 h 58	10 h 01
	$a_2$	3,350	0,816	0,735
	tg $\sigma_2$	3,486	2,532	8,000
	$t_2$	7 h 01	7 h 27	6 h 29
	$a_3$	0,442	0,330	0,314
	$a_4$	0,388	0,067	0,345
	$a_2/a_1$	0,643	0,250	0,342
	$a_3/a_1$	0,088	0,114	0,146
	$a_4/a_1$	0,074	0,023	0,161
Du 1 au 28-XI-1954	$A_0$	19,092	20,597	20,292
	$a_1$	5,230	4,020	2,122
	tg $\sigma_1$	2,203	1,527	0,569
	$t_1$	7 h 38	8 h 13	10 h 00
	$a_2$	1,354	1,033	0,707
	tg $\sigma_2$	3,193	3,300	1,823
	$t_2$	7 h 09	7 h 06	7 h 54
	$a_3$	0,199	0,240	0,197
	$a_4$	0,309	0,196	0,141
	$a_2/a_1$	0,225	0,256	0,333
	$a_3/a_1$	0,038	0,059	0,092
	$a_4/a_1$	0,059	0,048	0,066
Du 3 au 31-I-1955	$A_0$	19,54	21,35	20,98
	$a_1$	5,580	4,570	2,421
	tg $\sigma_1$	1,144	1,080	0,544
	$t_1$	8 h 44	8 h 50	10 h 04
	$a_2$	1,259	0,842	0,815
	tg $\sigma_2$	1,912	1,288	1,017
	$t_2$	7 h 50	8 h 31	8 h 47
	$a_3$	0,237	0,166	0,150
	$a_4$	0,206	0,233	0,322
	$a_2/a_1$	0,225	0,184	0,336
	$a_3/a_1$	0,042	0,036	0,061
	$a_4/a_1$	0,036	0,050	0,133

Valeurs moyennes ( $A_0$ ), amplitudes et déphasages des premières composantes harmoniques relatives aux variations diurnes de température données par le tableau XXVII et les fig. 17 a, b et c. (unité : degré centigrade).

Reprenons l'expression (24) de  $R_0$  et explicitons-la en tenant compte de la relation  $\rho_0 = \left(T'_{a0} + \frac{\alpha I_0}{h'}\right) / T''_0$ ; nous admettons comme précédemment que  $T'_a = T''$  et on a donc  $\rho_0 = 1 + \frac{\alpha I_0}{h' T''_0}$ . Il en résulte, d'après (24) :

$$R_0 = \frac{T''_{a0}}{T''_0} = 1 + \frac{\kappa'' \alpha I_0}{h' T''_0 [\beta(\delta + \kappa' + \kappa'') + \kappa'']} \quad (75)$$

d'où

$$T''_{a0} - T''_0 = \frac{\kappa'' \alpha I_0}{h' [\beta(\delta + \kappa' + \kappa'') + \kappa'']} \quad (76)$$

Cette expression peut encore se mettre sous la forme :

$$T''_{a0} - T''_0 = \frac{\alpha I_0}{h' [1 + W(dk^{-1} + h'^{-1} + h''^{-1})]} \quad (77)$$

ce qui constitue une importante relation entre les caractéristiques  $W$ ,  $h'$ ,  $h''$  et  $d$  de l'habitation. Cette différence des températures moyennes est donnée par ( $A_0$  int. —  $A_0$  ext.).

Avant de passer à l'examen des quantités complexes  $R_1$  et  $R_2$ , cherchons à préciser l'ordre de grandeur de certains de nos paramètres à l'aide de la « méthode impulsionnelle » décrite au chapitre 3.35*b*. Considérons à cet effet la *fig. 13* qui reproduit les enregistrements de la semaine du 21 au 27 février 1955. On y a déjà remarqué une crête de  $0.48 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$  dans la courbe du rayonnement global du 22 février, impulsion dont la forme est plus au moins triangulaire, et dont le maximum se produit vers 15 h 10.

L'évaluation de la surface correspondant à cette « impulsion » radiothermique donne environ  $8,7 \text{ cal/cm}^2$ ; si l'on admet une amplitude de  $2/3 \times 0,48 = 0,32 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ , la « largeur » du rectangle équivalent est  $t_0 = 8,7/0,32 = 27,2 \text{ min}$ .

Les maxima de température de l'air  $T_a''$  à l'intérieur des habitations se produisent respectivement à 16 h 10 (maisonnette en aluminium) et à 16 h 25 (chaumière en pisé). Les temps  $t$  définis par (61) sont dans ce cas respectivement  $60 + 13,6 = 73,6$  min et  $75 + 13,6 = 88,6$  min. On ne peut dire que  $t_0 = 27,2$  min soit fort petit devant ces durées, mais nous pourrions toutefois utiliser en première approximation les formules (61) et (66).

Remarquons que dans cette dernière formule le rapport  $T_{\max.}/T_0$  représente pour nous le quotient entre l'amplitude de la crête  $T_a''$  de la température de l'air à l'intérieur des habitations et l'amplitude de la température équivalente extérieure (modifiée par la substitution de  $h''$  à  $h'$ ) :

$$\Delta \left( T_a' + \frac{\alpha I}{h''} \right).$$

Les amplitudes  $T_a$  mesurées sur les thermogrammes de la fig. 13 sont respectivement 2°C (habitation aluminium) et 0,8°C (chaumière pisé). On a ainsi, si l'on néglige  $T_a'$  :

$$\frac{h'' \Delta T_a''}{\alpha \Delta I} = 0,1543 \frac{t_1}{t}$$

ce qui, pour l'habitation en aluminium, donne :

$$\frac{h''}{\alpha} \cong 0,1543 \times \frac{27,2}{73,6} \times \frac{0,32}{2,0} \cong 0,00913 \text{ cal/cm}^2 \text{ min } ^\circ\text{C}$$

et pour la chaumière en pisé :

$$\frac{h''}{\alpha} \cong 0,1543 \times \frac{27,2}{88,6} \times \frac{0,32}{0,8} \cong 0,0189 \text{ cal/cm}^2 \text{ min } ^\circ\text{C}.$$

On peut admettre un coefficient d'absorption de l'ordre de 0,7 dans les deux cas, le toit de la chaumière étant constitué d'un matelas de papyrus, tandis que celui de l'habitation en aluminium avait été également recouvert d'une couche du même végétal. Les parois

verticales polygonales de cette dernière maisonnette, constituées de tôle d'aluminium nu, devaient présenter une faible absorption de rayonnement, mais en revanche les murs en pisé de la chaumière étaient protégés de l'insolation directe par un fort débordant du toit, formant barza sur trois côtés. On aurait dans ces conditions, pour l'habitation en aluminium :

$$h'' \cong 0,7 \times 0,00913 \cong 0,00639 \text{ cal/cm}^2 \text{ min } ^\circ\text{C}.$$

et pour la chaumière en pisé :

$$h'' \cong 0,7 \times 0,0189 \cong 0,0132 \text{ cal/cm}^2 \text{ min } ^\circ\text{C}.$$

L'ordre de grandeur de ces chiffres paraît normal si on les compare à ceux du tableau XXIII, surtout en ce qui concerne la chaumière en pisé, pour laquelle l'approximation  $t_1 \ll t$  est mieux réalisée.

La formule (61) doit nous permettre d'évaluer le produit  $xa = da$ , de l'épaisseur de la paroi par la racine carrée de l'inverse de la diffusivité  $a^{-2}$ . Nous en tirerons un ordre de grandeur pour le paramètre  $\delta = da\sqrt{\omega/2}$  qui entre dans l'argument des fonctions hyperboliques de la formule (19).

Nous obtenons à partir de (61) :

$$ad = \left[ 3 \left( t - \frac{t_1}{2} \right) + \sqrt{9 \left( t - \frac{t_1}{2} \right)^2 - 2t_1^2} \right]^{1/2} \cong \sqrt{6 \left( t - \frac{t_1}{2} \right)}$$

ce qui pour l'habitation d'aluminium donne :

$$ad = 18,88 \text{ min }^{1/2}.$$

et pour la chaumière :

$$ad = 21,12 \text{ min }^{1/2}.$$

Si l'on admet une épaisseur moyenne équivalente de  $d = 10$  cm, on obtient pour la chaumière une diffusivité globale de  $a^{-2} = 0,224 \text{ cm}^2/\text{min}$ , chiffre que l'on peut comparer avec ceux du tableau XXIV. Pour la maison-

nette en aluminium, l'interprétation est plus difficile, à cause des caractéristiques thermiques très différentes des parois latérales et du toit. Il semblerait que cette dernière partie de la construction l'emporte et des chiffres comparables à ceux trouvés pour la chaumière paraissent alors assez vraisemblables, à cause du revêtement de papyrus dont le toit d'aluminium était recouvert.

Si l'on admet les valeurs trouvées ci-dessus pour  $ad$ , nous pouvons calculer  $\delta = ad\sqrt{\omega}/2$  pour la fréquence diurne :

$$\delta \cong 0,0467 ad$$

D'où pour l'habitation en aluminium :

$$\delta \cong 0,881$$

et pour la chaumière en pisé :

$$\delta \cong 0,987.$$

Nous pouvons maintenant revenir à la détermination des rapports complexes  $R_1$  et  $R_2$  ; elle se fait sans difficulté, soit graphiquement sur la *fig. 18*, soit numériquement à partir du tableau XXVIII*b*. Ce tableau donne en effet les modules ( $a_q$  int./ $a_q$  ext.) et les arguments  $\phi = -\Delta t_q$  (en heures). La conversion des heures en degré permet de calculer :

$$R_q = (a_q \text{ int.}/a_q \text{ ext.})(\cos \phi + j \sin \phi)$$

ce qui donne le tableau suivant :

Tableau XXIX.

Mois	Habitation aluminium		Chaumière pisé	
	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_2$
Octobre (4-31)1954	0,520-j 0,187	0,237-j 0,055	0,334-j 0,238	0,210+j 0,060
Novembre (1-28)1954	0,760-j 0,094	0,762+j 0,019	0,330-j 0,235	0,440-j 0,200
Janvier (3-30)1955	0,818-j 0,010	0,628-j 0,228	0,407-j 0,148	0,568-j 0,309

Une détermination plus poussée des paramètres équivalents des habitations peut être tentée à l'aide de ces valeurs, en utilisant l'expression (19), où, pour simplifier, on aura posé  $\gamma = 0$ .

Contentons-nous ici d'évaluer les paramètres  $\beta$  ou  $W$  qui caractérisent le degré de ventilation, à l'aide de (77). On en tire :

$$W = \frac{[\alpha I_0 / h' (T''_{a0} - T''_0)] - 1}{d/k + 1/h' + 1/h''}$$

Sous cette forme apparaît au dénominateur ce que l'on peut appeler la résistance thermique de la coque.

Soit alors pour la chaumière en pisé :  $h' = 2h'' = 2 \times 0,0132 = 0,0264$  d'après les valeurs trouvées précédemment, et soit  $d = 10$  cm. Pour  $k$  nous prendrons une valeur intermédiaire entre celles de la terre et du chaume, mais plus proche de cette dernière. Soit  $k = 0,03$ . On a pour  $I_0$ , d'après les valeurs  $A_0$  du tableau XXVI b :

en octobre	1954 : $I_0 = 0,333$
en novembre	1954 : $I_0 = 0,315$
en janvier	1955 : $I_0 = 0,299$

et pour  $(T''_{a0} - T''_0)$  d'après les différences ( $A_0$  int. —  $A_0$  ext.) du tableau XXVIII a :

en octobre	1954 : $T''_{a0} - T''_0 = 1^{\circ}44$
en novembre	1954 : $T''_{a0} - T''_0 = 1^{\circ}20$
en janvier	1955 : $T''_{a0} - T''_0 = 1^{\circ}44$

En adoptant la valeur  $\alpha = 0,7$  pour les coefficients moyens d'absorption nous obtenons par substitution des valeurs précédentes :

$$\begin{aligned} W &= 0,0115 \text{ en octobre } 1954 \\ &0,0133 \text{ en novembre } 1954 \\ &0,0101 \text{ en janvier } 1955 \end{aligned}$$

Les paramètres  $\beta$  correspondants valent :

en octobre	1954	$\beta = 0,871$
en novembre	»	$\beta = 1,01$
en janvier	1955	$\beta = 0,765$

Ces valeurs montrent que l'effet de la ventilation moyenne a été comparable pour les trois mois envisagés. Elles justifient également la valeur  $\beta = 1$  choisie dans l'exemple théorique du chapitre 3.33 dans l'hypothèse d'une ventilation raisonnable. Il est dommage que nous n'ayons pu disposer d'un anémographe durant ces mêmes mois, ce qui nous aurait permis d'établir une corrélation entre l'intensité moyenne du vent et la ventilation.

Nous ne chercherons pas à déterminer le paramètre  $\beta$  pour l'habitation en aluminium, l'évaluation du quotient  $d/k$  moyen présentant trop d'incertitudes.

Nous n'entrerons pas dans plus de détail ici, pour ne pas nous écarter de notre objectif principal, celui d'obtenir une caractérisation du comportement thermique de l'habitation qui soit suffisamment simple tout en tenant compte de différents facteurs importants.

Cette caractérisation est donnée en première approximation, si l'on ne fait pas intervenir l'effet des fluctuations de ventilation, par la quantité réelle  $R_0$  et les quantités complexes  $R_1$  et  $R_2$ . Ces dernières seront généralement représentées par des vecteurs.

Nous parlerons maintenant des autres expériences et en donnerons brièvement les résultats qui permettent de faire, à l'aide de ces vecteurs, une comparaison du comportement d'une habitation de même type (chaumière en pisé) sous différents climats.

3.52 *Expériences effectuées à Irangi (Kivu, climat de forêt, dense, chaud et humide, altitude: 850 m).*

Les premières mesures climatologiques à Irangi furent exécutées en vue d'étudier la corrélation des variations de températures et d'humidité à l'extérieur, sous un

Tableau XXXa.

IRANGI (Châlet) 8 et 9.XI.1954.

Heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Extérieur	17,8	17,75	17,55	17,20	16,95	16,75	16,60	17,00	18,00	20,35	22,50	23,60
Intérieur	20,15	19,95	19,80	19,65	19,35	19,10	19,00	19,10	19,85	21,85	23,85	25,00

Heures	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Extérieur	25,05	27,35	28,90	24,20	22,15	18,20	17,95	17,85	17,80	17,70	17,70	17,65
Intérieur	25,35	25,55	25,70	25,65	24,65	22,80	22,15	21,45	21,05	20,75	20,50	20,30

Tableau XXXb.

	Extérieur	Intérieur
A <sub>0</sub>	19,73	21,77
A <sub>1</sub>	- 2,76	- 2,55
B <sub>1</sub>	- 1,21	- 1,63
A <sub>2</sub>	+ 2,33	+ 1,53
B <sub>2</sub>	+ 1,06	+ 0,60
A <sub>3</sub>	- 0,38	- 0,20
B <sub>3</sub>	- 0,69	+ 0,01
A <sub>4</sub>	- 0,36	- 0,09
B <sub>4</sub>	+ 0,72	- 0,22

Tableau XXXc.

	Extérieur	Intérieur
a <sub>1</sub>	3,009	3,100
tg α <sub>1</sub>	2,280	1,564
l <sub>1</sub>	7 h 35	8 h 10
a <sub>2</sub>	2,500	1,670
tg α <sub>2</sub>	2,198	2,250
l <sub>2</sub>	7 h 38	7 h 36
a <sub>3</sub>	0,782	0,202
a <sub>4</sub>	0,790	0,238
a <sub>2</sub> /a <sub>1</sub>	0,830	0,540
a <sub>3</sub> /a <sub>1</sub>	0,259	0,065
a <sub>4</sub> /a <sub>1</sub>	0,262	0,076

Variations diurnes de la température à l'extérieur et dans une habitation en bois, à toit de tôle, à Irangi (forêt humide, Kivu) ; a : valeurs horaires moyennes du 8 et 9 novembre 1954 (°C) ; b : coefficients de la série de FOURIER (1) ; c : amplitudes et déphasages des premières composantes harmoniques.

abri de fortune, et à l'intérieur d'un petit châlet, dont les murs étaient constitués de planches brunies à l'huile de vidange, et le toit de tôle de fer. Peu d'enregistrements purent être retenus de ces premiers essais, par suite du manque de personnel qualifié résidant sur les lieux.

Le tableau XXXa donne les moyennes horaires de température pour les seules journées du 8 et du 9 novembre 1954, dont les variations climatiques montraient une remarquable similitude.

Dans le tableau XXXb, nous donnons les coefficients de la série de FOURIER du type (1), calculée à partir de ces chiffres, et dans le tableau XXXc les amplitudes et déphasages relatifs à la forme (5) de la même série.

Nous reprenons ci-dessous les rapports ( $a_q$  int. /  $a_q$  ext.) ainsi que les décalages horaires entre les harmoniques correspondant aux variations extérieures et intérieures.

$a_1$ int. / $a_1$ ext.	$\Delta t_1$	$a_2$ int. / $a_2$ ext.	$\Delta t_2$
1.030	0 h 35'	0.668	- 0 h 02'

Les vecteurs  $R_1$  et  $R_2$  définis par ces chiffres, ont pour expression :

$$\begin{aligned} R_1 &= 1,017 - j 0,157 \\ R_2 &= 0,668 + j 0,011 \end{aligned}$$

Une seconde série de mesures fut entreprise au même endroit, le thermohygraphe intérieur étant cette fois placé dans une petite chaumière à murs de pisé, l'habitation du *zamu* (gardien) du poste avancé de l'I.R.S.A.C.

De ces enregistrements, nous avons extrait ceux de la quinzaine débutant le 14 mars et se terminant le 27 mars 1955.

Les valeurs moyennes bi-horaires des températures sont données dans le tableau XXXIa. La détermination des vecteurs relatifs aux quatre premières harmoniques,

s'est faite par les projections ( $A_q, B_q$ ) (Tableau XXXIb), et l'on en a déduit les modules et phases ( $a_q, \phi_q$ ) (Tableau XXXIc).

Voici les valeurs des modules ( $a_q$  int./ $a_q$  ext.) et des déphasages de  $R_q$ , pour  $q = 1$  et  $2$  :

$a_1$ int./ $a_1$ ext.	$\Delta t_1$	$a_2$ int./ $a_2$ ext.	$\Delta t_2$
0,338	2 h 36	0,394	1 h 41

Comme précédemment, nous en déduisons l'expression des complexes  $R_1$  et  $R_2$  :

$$R_1 = 0,262 - j 0,213$$

$$R_2 = 0,250 - j 0,304$$

3.53 *Expériences effectuées à Uvira (climat chaud, au voisinage d'un lac, altitude : 790 m).*

A partir de janvier 1955, deux thermohygrographes et un actinographe furent placés près d'une chaumière en pisé située dans une bananeraie, au voisinage du Centre d'Hydrobiologie de l'I. R. S. A. C. On trouvera ci-dessous l'analyse harmonique des moyennes bi-horaires des températures, calculées pour la période du 3 au 30 janvier 1955 (à l'exception de la journée du 24 janvier, pour laquelle l'enregistrement n'a pas été effectué).

Le tableau XXXIIa mentionne ces moyennes bi-horaires tandis que les tableaux XXXIIb et XXXIIc donnent respectivement les coefficients de la série de FOURIER (1) et les amplitudes et angles des harmoniques de la série (5).

Voici les rapports ( $a_q$  int./ $a_q$  ext.) et les déphasages  $\Delta t_q$  déduits de ces tableaux pour les deux premières harmoniques :

$a_1$ int./ $a_1$ ext.	$\Delta t_1$	$a_2$ int./ $a_2$ ext.	$\Delta t_2$
0,496	2 h 38	0,146	0 h 50

Tableau XXXIa.  
IRANGL. — Chaumière en pisé, du 14 au 27.II.1955

Heures	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Extérieur	19,36	19,22	18,97	18,84	20,19	23,54	26,01	26,61	24,09	21,43	20,32	19,71
Intérieur	21,96	21,68	21,41	20,70	20,85	21,67	22,89	23,66	23,81	22,60	22,56	22,34

Tableau XXXIb

	Extérieur	Intérieur
$A_0$	21,524	22,177
$A_1$	-3,14	-0,40
$B_1$	-1,65	-1,13
$A_2$	+1,31	+0,32
$B_2$	+0,73	+0,45
$A_3$	-0,28	-0,04
$B_3$	+0,16	-0,12
$A_4$	+0,11	-0,14
$B_4$	-0,01	-0,07

Tableau XXXIc.

	Extérieur	Intérieur
$a_1$	3,540	1,196
$tg \varphi_1$	1,903	0,353
$t_1$	7 h 46	10 h 22
$a_2$	1,499	0,591
$tg \varphi_2$	1,795	0,711
$t_2$	7 h 57	9 h 38
$a_3$	0,322	0,024
$a_4$	0,011	0,157
$a_2/a_1$	0,423	0,494
$a_3/a_1$	0,090	0,020
$a_4/a_1$	0,003	0,131

Variations diurnes de la température à l'extérieur et dans une chaumière en pisé, à Irangi (forêt humide, Kivu) ; a : valeurs bihoraires (moyenne du 14 au 27 mars 1955) ; b : coefficients de la série de FOURIER (1) ; c : amplitudes et déphasages des premières composantes harmoniques.

Tableau XXXIIa.

Heures	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Extérieur	21,06	20,32	19,79	19,93	23,51	26,28	27,93	28,33	26,49	23,79	22,48	21,97
Intérieur	23,64	22,14	22,24	21,80	22,43	23,71	24,95	25,70	25,94	25,47	24,76	24,19

Tableau XXXIIb.

	Extérieur	Intérieur
A <sub>0</sub>	23,50	23,92
A <sub>1</sub>	- 3,56	- 0,77
B <sub>1</sub>	- 1,81	- 1,82
A <sub>2</sub>	+ 1,10	+ 0,25
B <sub>2</sub>	+ 0,09	+ 0,14
A <sub>3</sub>	+ 0,14	+ 0,01
B <sub>3</sub>	+ 0,03	- 0,06
A <sub>4</sub>	- 0,47	+ 0,05
B <sub>4</sub>	+ 0,01	- 0,15

Tableau XXXIIc.

	Extérieur	Intérieur
a <sub>1</sub>	3,99	1,48
tg $\theta_1$	1,967	0,423
t <sub>1</sub>	7 h 48	10 h 26
a <sub>2</sub>	1,10	0,29
tg $\theta_2$	12,22	1,786
t <sub>2</sub>	9 h 09	9 h 59
a <sub>3</sub>	0,14	0,02
a <sub>4</sub>	0,47	0,16
a <sub>2</sub> /a <sub>1</sub>	0,276	0,146
a <sub>3</sub> /a <sub>1</sub>	0,035	0,010
a <sub>4</sub> /a <sub>1</sub>	0,118	0,081

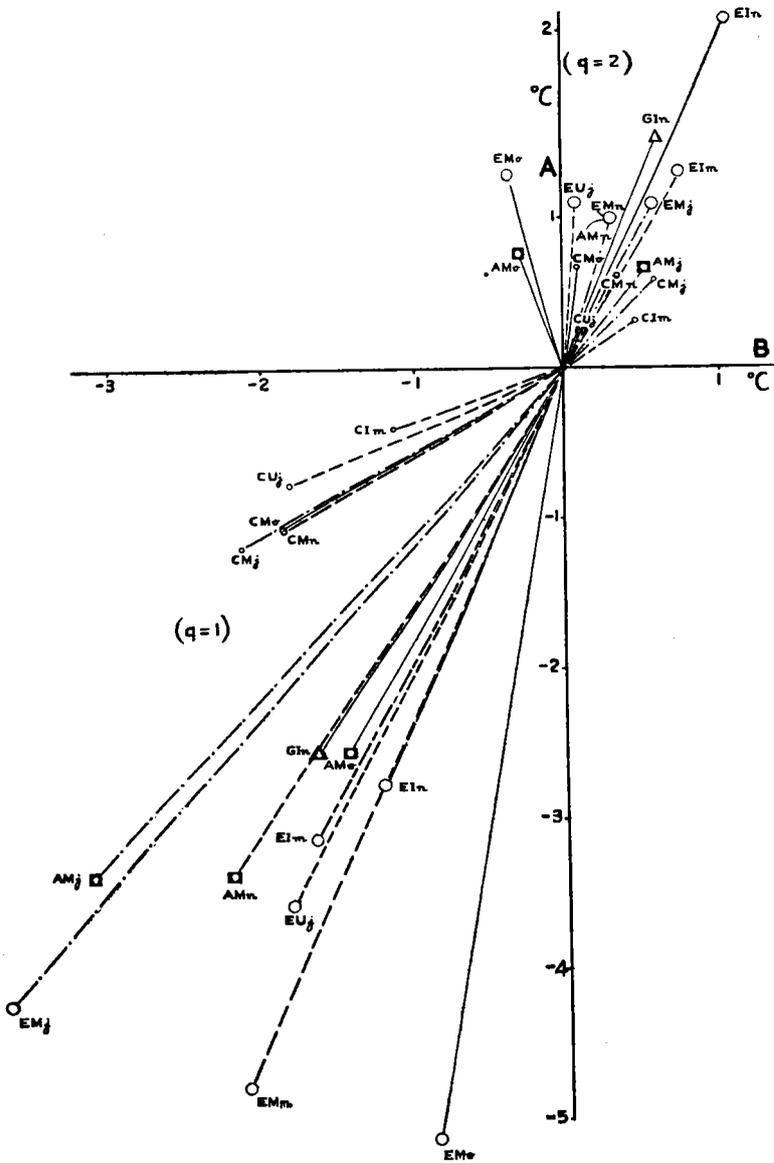


FIG. 18a. — Vecteurs représentant les deux premières harmoniques ( $q = 1$  et  $2$ ) des variations diurnes de températures, simultanément à l'extérieur (E) et dans les habitations (A : aluminium ; C : chaumières en pisé ; G : en bois), en différents endroits (M : Mutara ; U : Uvira ; I : Irangi), pendant différents mois (j : janvier 1955 ; m : mars 1955 ; o : octobre 1954, et n : novembre 1954).

Les rapports complexes  $R_q$  sont alors :

$$R_1 = 0,383 - j 0,316$$

$$R_2 = 0,132 - j 0,062$$

3.54 *Comparaison des premiers résultats.*

Nous avons porté les vecteurs ( $A_q, B_q$ ) des deux premières harmoniques de température, pour les différentes mesures décrites ci-dessus, dans la *fig. 18a*.

Il est intéressant de comparer ce que nous pourrions appeler les « coefficients de transfert »  $R_q$  des deux premières harmoniques de températures pour les différentes habitations et divers climats envisagés.

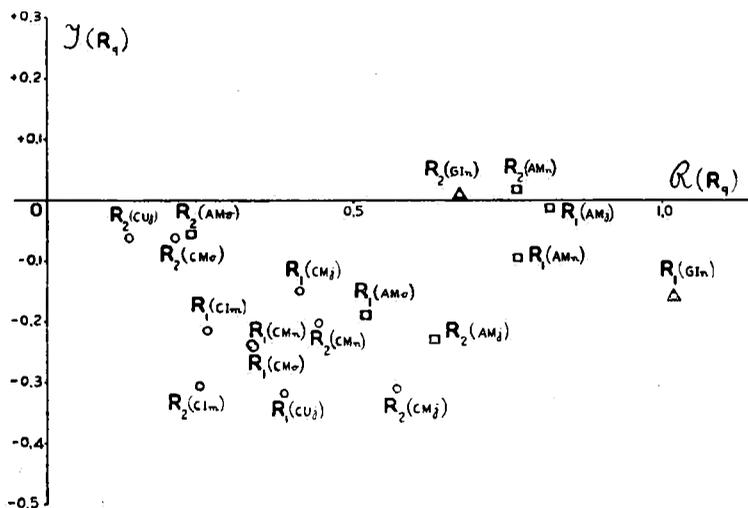


FIG. 18b. — Représentation des coefficients complexes de transfert  $R_1$  et  $R_2$  par leurs affixes, pour les différents cas envisagés à la *fig. 18a*.

La *fig. 18b* donne les affixes des quantités complexes  $R_1$  et  $R_2$  pour les différents cas. Ce sont les extrémités des vecteurs, issus de l'origine, représentatifs de  $R_1$  et  $R_2$ , et donnés par leurs modules et leurs angles de phase.

Ces affixes ont été marqués par les symboles suivants :

- A. habitation en aluminium (ALTENT) ;
- G. gîte en bois (8 et 9 novembre 1954) ;
- C. chaumière en pisé ;
- M. Mutara (o : octobre 1954 ; n : novembre 1954 ;  
j : janvier 1955) ;
- I. Irangi (m : mars 1955 ; n : novembre 1954) ;
- U. Uvira.

Les vecteurs  $R_1$  sont les plus importants ; on remarquera le groupement remarquable de leurs affixes pour les chaumières en pisé (C), ainsi que les singularités que présente le gîte en bois ; ce dernier était recouvert, ne l'oublions, pas d'un toit en tôle nue, sans interposition de plafond, ce qui entraîne une action intense et rapide du rayonnement solaire incident.

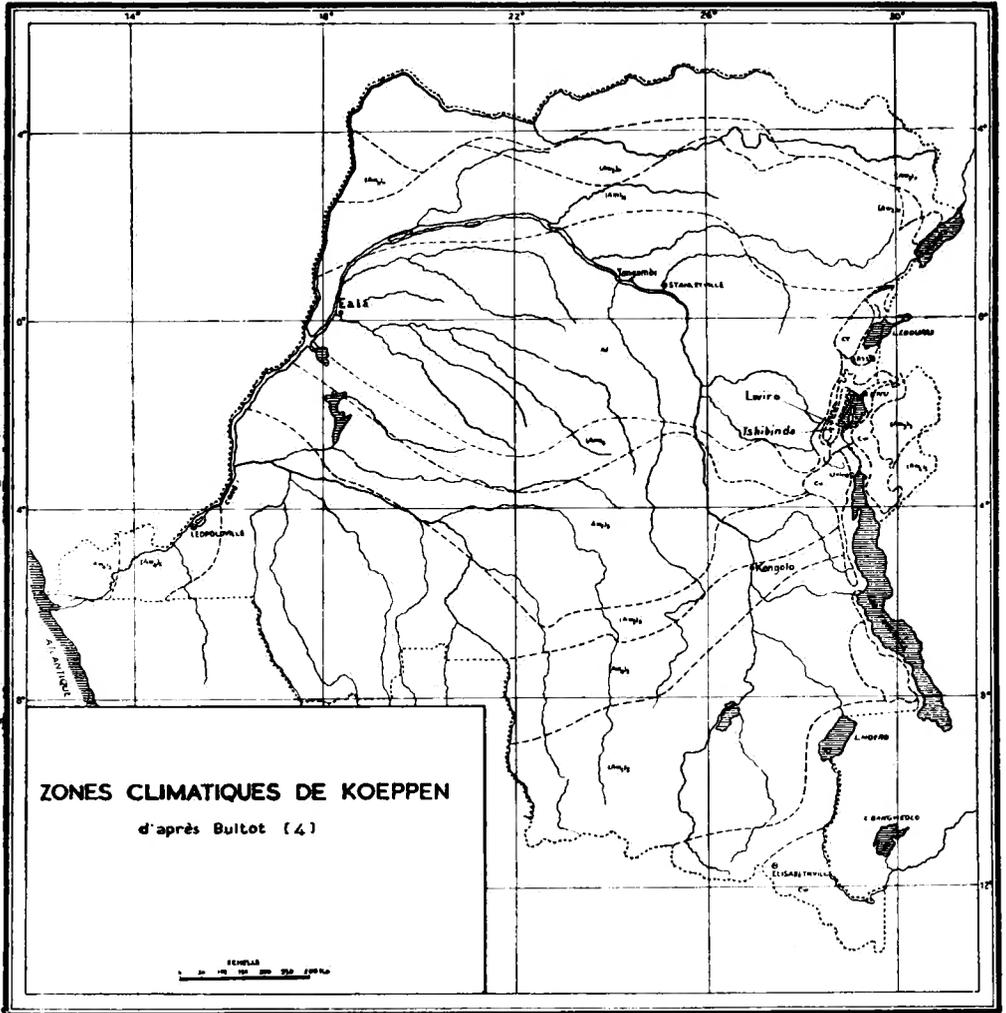


FIG. 19. — Zones climatiques de KOEPPEN, d'après BULTOT [4].

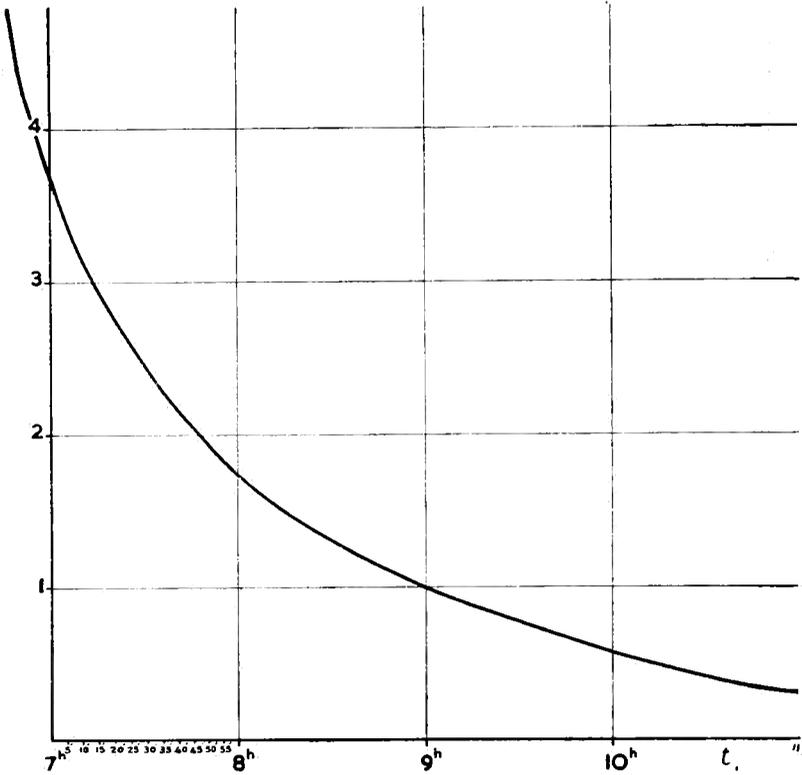


FIG. 20a. — Moment du début de la sinusoïde fondamentale pour  $A_1 < 0$  et  $B_1 < 0$ , en abscisse ; en ordonnée :  $\text{tg } \phi_1 = A_1/B_1$ .

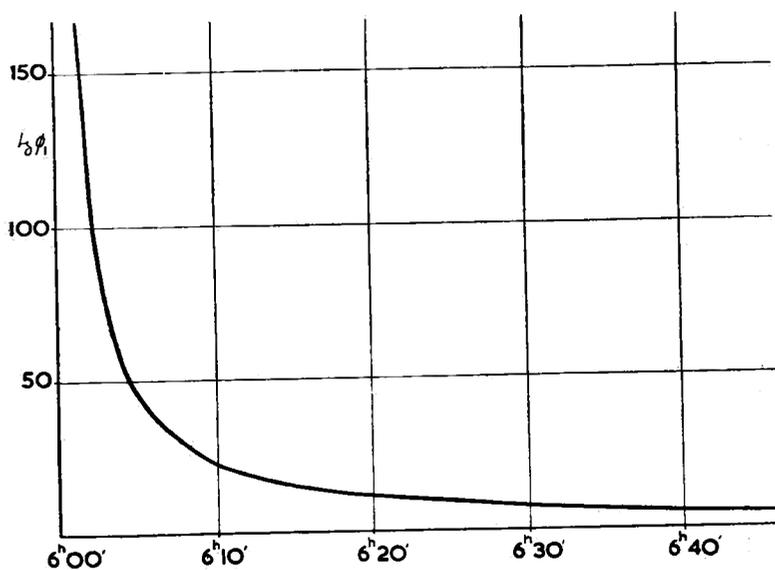


FIG. 20b. — Relation entre l'instant du début de la composante harmonique fondamentale et l'angle de déphasage  $\phi_1 = \text{arc tg } (A_1/B_1)$ , pour  $A_1$  et  $B_1$  tous deux négatifs.

## RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

1) Nous nous sommes attaché dans ce premier travail à jeter les bases d'une étude rationnelle de la climatologie de l'habitation tropicale.

Cette étude a tenu compte des résultats expérimentaux obtenus dans des habitations africaines et, de fait, en a souvent été inspiré dans les détails ;

2) L'habitation se comporte à certains égards comme un circuit électrique passe-bas, et présente sous l'action d'une sollicitation thermique sinusoïdale un décrétement et un déphasage, fonctions tous deux de la fréquence. Il est important de définir les composantes périodiques des variations, aussi bien annuelles que diurnes, des facteurs climatiques par des séries de FOURIER. La représentation vectorielle des différentes harmoniques est commode, en ce qu'elle met en évidence les amplitudes et les angles de phase, et permet la composition éventuelle de vecteurs. Il faut aussi noter que les conditions limites à l'intérieur et à l'extérieur sont également périodiques en moyenne et qu'elles sont différentes pour les diverses harmoniques ;

3) L'analyse du comportement sous l'hypothèse d'une sollicitation thermique à variation sinusoïdale dans le temps méritait d'être reprise, mais sans la limiter à des conditions simplifiées qui l'éloignent fort des contingences telles qu'elles se présentent sous les tropiques. C'est notamment par l'intervention de la ventilation qu'apparaissent des divergences sensibles dans le rôle des différents termes de la série de FOURIER chargée de représenter la composante périodique de la température ;

4) Notre étude met en jeu aussi bien la température de l'air ambiant, que celle des parois intérieures

qui intervient dans les échanges de rayonnement. Avec la ventilation, ces grandeurs influent fortement sur la sensation du confort ; seule l'humidité, sous la forme de tension de vapeur, n'a pas encore été considérée. Elle n'intervient, en effet, que de façon généralement secondaire dans l'analyse thermique sous des conditions normales, par la modification des coefficients des échanges calorifiques, etc... Ce facteur fera l'objet d'une étude ultérieure, mais d'ores et déjà, on peut prévoir que dans une habitation tropicale normale, exempte de défauts majeurs (parois poreuses dans un climat humide, etc...) le mode de construction ne peut influencer que de façon minime l'humidité naturelle de l'air, exprimée sous la forme de tension de vapeur. Ceci exclut évidemment toute hypothèse d'un conditionnement d'air ;

5) Le travail expérimental préliminaire a montré le rôle important que peuvent jouer certaines habitudes des occupants de l'habitation : ouverture et fermeture des portes et orifices extérieurs, allumage de feux à l'intérieur, à certains moments de la journée, etc. Nous pensons que s'il convient de tenir compte du premier facteur, important du point de vue ventilation, il est préférable dans une analyse préliminaire de ne pas s'embarrasser du second, somme toute contrôlable ;

6) Les coefficients complexes  $R_a$ , d'ailleurs représentables par des vecteurs, caractérisent le comportement thermique d'une habitation soumise à un climat donné, périodiquement variable. Il est trop tôt pour faire une analyse des variations possibles et optimales de ces coefficients ; seule une étude expérimentale détaillée, à l'aide d'un ensemble instrumental complet, sur de nombreux types d'habitations, peut donner des renseignements définitifs à ce sujet ;

7) L'étude physico-physiologique du confort pourra être entreprise sur les mêmes bases, en faisant ressortir le caractère périodique des facteurs climatiques. On sait

combien la notion du rythme est importante en physiologie. En fait, l'objectif ultime devrait être de chercher à réaliser les meilleures conditions d'hygiène ; celles-ci ne coïncident pas toujours avec celles du confort.

De toute façon, ce premier travail devra faciliter l'étude du confort physiologique sous les tropiques, en particulier dans l'habitation, en fonction des variations périodiques plus ou moins lentes des facteurs thermiques de température et de rayonnement, du facteur humidité sous la forme de tension de vapeur, et du facteur certainement très important de la ventilation, en particulier sous la forme du renouvellement de l'air. L'effet de fluctuations plus rapides et apériodiques, qui se superposent à des oscillations plus lentes et plus régulières, devra être aussi considéré, et pourra bénéficier de l'analyse statistique telle qu'elle est appliquée dans l'étude de la turbulence.

8) Pour terminer, qu'il nous soit permis de dégager la principale contribution de ce mémoire, dans le cadre des travaux antérieurs. D'intéressantes études sur le flux thermique à travers une paroi, soumise à des variations périodiques du climat extérieur, ont été publiées ces dernières années, sous l'hypothèse d'une température constante de l'air à l'intérieur ([20] à [27]). Nous nous sommes efforcé de tenir compte des variations de température de l'air ambiant, spécialement sous l'influence de la ventilation. L'importance de ces variations a été mise en relief. Nous avons vu en particulier que le passage du coefficient de ventilation  $\beta$ , défini p. 76 et p. 77, de la valeur 0 à la valeur 1, modifie profondément les conditions de transfert thermique (*fig. 11* et *fig. 12*).

D'autres points soulevés dans ce mémoire, tels l'effet d'une corrélation entre les fluctuations apériodiques de la ventilation et de la température extérieure, ainsi que l'étude du comportement d'une habitation sous une sollicitation thermique de nature impulsionnelle, méritent d'être développés ultérieurement.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] DEVROEY, E., Habitations coloniales et conditionnement d'air sous les tropiques (Inst. Royal Col. Belge, Sect. Sc. Techn., *Mém. in-8°*, Tome II, fasc. 2, 1940).
- [2] KÖPPEN, W., GEIGER, R., Handbuch der Klimatologie, B. I., Teil C. (Berlin, 1935).
- [3] BERNARD, E., Le climat écologique de la Cuvette centrale congolaise (*Publ. de l'I. N. É. A. C.*, Bruxelles, 1945).
- [4] BULTOT, F., Carte des régions climatiques du Congo belge, établie d'après les critères de Köppen (*Publ. de l'I. N. É. A. C.*, Bruxelles, 1950).
- [5] THORNTHWAITTE, C. W., The Climate of North America according to a New Classification (*Geogr. Rev.*, 21, 631-655, 1931).
- [6] SCAËTTA, H., Le climat écologique de la dorsale Congo-Nil (Afrique Centrale Équatoriale), (*Mém. in-4° de l'Institut Royal Colon. Belge*, S. Sc. Nat. et Méd., III, Bruxelles, 1934).
- [7] VANDENPLAS, A., La température au Congo belge (*Mém. Institut Royal Météor. de Belgique*, vol. XXIII, 1947).
- [8] VANDENPLAS, A., Données complémentaires sur le climat du Congo belge (*Mém. Institut Royal Météor. de Belgique*, vol. XXXIII, 1949).
- [9] BILLINGTON, N. S., Thermal Properties of Buildings (London, Cleaver, Hume Press Ltd, 1952).
- [10] PEEL, C., Thermal conditions in African Dwellings in Sierra Leone (*J. of the Inst. of Heating and Ventil. Engrs*, Vol. 22, n° 227, July 1954).
- [11] BECKETT, H. E., The Exclusion of Solar Heat (*Inst. Heat. Vent. Eng. Journal*, 1934, 2, 22 ; *ibid.*, 1935, 3, 26).
- [12] GRIFFITHS, E. et DAVIS, A. M., Transmission of Heat by Radiation and Convection (*Food Investigation Board, Special Report*, 9, 1922).
- [13] *Smithsonian Meteorological Tables* (prepared by J. LIST), (Smithsonian Institution, Washington D.C., 1951).
- [14] DUPONT, G., et SCHUEPP, W., Le rayonnement solaire à Léopoldville (Service Météorologique du Congo belge, Publ. n° 3, 1954).
- [15] VINACCIA, G., Calcolatore Solare per Architettura (*Ingegnere*, N. 11, 15 nov. 1940, XIX).

- [15a] VINACCIA, G., Una Analisi sistematica dell' Insolazione in Architettura (*Giornale del Genio Civile*, 1951).
- [16] NICOLET, M., BOSSY, L., DOGNIAUX, R., Ensoleillement et orientation en Belgique (Inst. Roy. Météor. de Belg., *Mém.*, Vol. XXXII, 1949 ; XXXVI, 1950 ; XV, 1950 et XLIX, 1951).
- [17] DENAEYER, M. E., Mission géologique de l'Office des Cités Africaines (Inst. Roy. Col. Belge, Sect. Sc. Techn., *Mém. in-8°*, T. X, fasc. 4, 1954).
- [18] POLLAK, L. W., Rechentafeln zur harmonischen Analyse (Leipzig, 1926).
- [19] CARSLAW, H. S., Mathematical Theory of Conduction of Heat in Solids (Dover Publ., New-York, 1945).
- [20] ALFORD, J. S., RYAN, J. E., URBAN, F. O., Effect of Heat Storage and Variation in Outdoor Temperature and Solar Radiation on Heat Transfer through Walls (*A. S. H. V. E. Transactions*, Vol. 45, 1939).
- [21] MACKEY, C. O., WRIGHT, L. T., Summer Comfort Factors as Influenced by the Thermal Properties of Building Materials (*A. S. H. V. E. Transactions*, Vol. 49, 1943).
- [22] MACKEY, C. O., WRIGHT, L. T., Periodic Heat Flow-Homogeneous Walls or Roofs (*A. S. H. V. E. Transactions*, Vol. 50, 1944).
- [23] ROUX, A. J. A., Periodic Heat Flow through Building Components ; Heat Exchange at the Inside Surface of a Wall Panel (Council for Scientific and Industrial Research, Series DR-4, June, 1950).
- [24] ROUX, A. J. A., Periodic Heat Flow through Building Components ; Heat Transfer from the Outside Surface of Homogeneous Wall Panels to the Inside Air (C. S. I. R., Series DR-5, June, 1950).
- [25] ROUX, A. J. A., JOUBERT, S. J. P., Periodic Heat Flow through Building Components ; Heat Transfer from the Outside Surface of Homogeneous Wall Panels to the Inside Air under Winter Conditions (C. S. I. R., Series DR-7, November 1950).
- [26] ROUX, A. J. A., Periodic Heat Flow through Building Components Heat Exchange at the Outside Surfaces, with special Reference to the Application of Soil-Air Temperature (C. S. I. R., Series DR-8, November 1950).
- [27] ROUX, A. J. A., VISSER, J., MINNAAR, P. C., Periodic Heat Flow through Building Components ; Heat Transfer through Homogeneous Wall Panels from the Outdoor Climatic Environment to the Indoor Air (C. S. I. R., Series DR-9, September 1951).

La bibliographie ci-dessus n'a qu'une valeur indicative ; on trouvera de nombreuses références dans une bibliographie éditée depuis 1952 par l'Université de Texas, Austin, sous le titre « Tropical Housing in Hot-Humid and Hot-Dry Climates ».

## TABLE DES FIGURES

1. Représentation de la fonction sinusoïdale $X_q(t)$ par la projection d'un vecteur tournant .....	14
2. Extrémités des deux premiers vecteurs tournants déduits de la périodicité diurne moyenne du rayonnement global à Léopoldville pour les différents mois (de I à XII) de l'année 1952 .....	19
3. Variations diurnes du rayonnement global, enregistrées à la Station I. R. S. A. C. de Lwiro (prov. du Kivu), durant douze journées sereines de l'année 1953, choisies parmi les douze mois .....	20
4. Extrémités des deux premiers vecteurs relatifs à la variation diurne du rayonnement global à Lwiro (Kivu), durant des journées sereines choisies dans les douze mois (de I à XII) .....	25
5. Affixes des vecteurs représentant les deux premières sinusoïdes ( $q = 1$ et $2$ ) des variations diurnes moyennes de la température à l'ombre pour les 12 mois de l'année (de I à XII), en différents points du Congo belge .....	29-30
6. Deux premières composantes harmoniques du vent à Lwiro, mois de février et de mars 1954 .....	44
7. Deux premières composantes harmoniques des variations annuelles de la tension de vapeur en quatre points du Congo belge .....	49
8. Deux premières composantes harmoniques de la variation diurne de la tension de vapeur à Eala (Moyennes annuelles) .....	50
9. Courbes du coefficient d'absorption $\alpha$ en fonction de la longueur d'onde d'un rayonnement monochromatique incident, pour différentes surfaces (d'après les données renseignées par [9]) .....	70
10. Courbes du coefficient de conductance superficielle $h$ en fonction de la vitesse de ventilation, pour différentes surfaces (d'après des données mentionnées par [9]) .....	74
11. Affixes du coefficient de transfert fondamental $R_1$ pour $\beta = 0$ (ventilation nulle, points à gauche), et pour $\beta = 1$ (points à droite), pour différentes valeurs des paramètres $\rho_1$ et $\gamma$ , dans l'hypothèse $\sigma_1 = 0$ .....	85

144      CONSIDÉRATIONS SUR L'ÉTUDE CLIMATOLOGIQUE

12. Affixes du coefficient de transfert fondamental $R_1$ pour $\beta = 0$ (ventilation nulle, grand quadrillage) et pour $\beta = 1$ (petit quadrillage) pour différentes valeurs des paramètres $\rho_1$ et $\sigma_1$ , avec l'approximation $\gamma = 0$ .....	86
13. Les diagrammes hebdomadaires relevés du 21 au 28 février 1955 dans le kraal du Mutara (Ruanda) se composent d'un actinogramme et de trois thermohygrogrammes (extérieur, habitation aluminium, chaumière pisé) .....	95
14. Formes théoriques d'une variation brusque de la « température d'insolation » .....	96
15. Schéma donnant la disposition des instruments enregistreurs et des deux habitations étudiées au camp de Kakole, au Mutara, Ruanda .....	112
16. Vecteurs représentant les deux premières composantes harmoniques (indices 1 et 2) de la variation diurne du rayonnement global reçu par une surface horizontale, pour les mois d'octobre 1954, novembre 1954 et janvier 1955 (unité : cal/cm <sup>2</sup> min) .....	113
17. Mutara. Variation moyenne des températures .....	113-114
18a. Vecteurs représentant les deux premières harmoniques ( $q = 1$ et $2$ ) des variations diurnes de températures, simultanément à l'extérieur et dans les habitations .....	132
18b. Représentation des coefficients complexes de transfert $R_1$ et $R_2$ par leurs affixes, pour les différents cas envisagés à la fig. 18a .....	133
19. Zones climatiques de KOEPPEN, d'après BULTOT .....	135
20a. Moment du début de la sinusoïde fondamentale pour $A_1 < 0$ et $B_1 < 0$ , en abscisse; en ordonnée $\text{tg } \phi_1 = A_1/B_1$ .....	136
20b. Relation entre l'instant du début de la composante harmonique fondamentale et l'angle de déphasage $\phi_1 = \text{arc tg } (A_1/B_1)$ , pour $A_1$ et $B_1$ tous deux négatifs .....	137

## TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction .....	3
2. Considérations sur les climats de l'Afrique centrale .....	10
3. Étude thermique de l'habitation .....	52
Résumé et conclusions .....	138
Bibliographie .....	141
Table des figures .....	143





