



HAL
open science

Pour une approche bioclimatique de l'architecture

Frédéric Nicolas, Marc Vaye

► **To cite this version:**

Frédéric Nicolas, Marc Vaye. Pour une approche bioclimatique de l'architecture. [Rapport de recherche] 0093/79, La Face cachée du Soleil; Comité de la recherche et du développement en architecture (CORDA). 1978. hal-03089184

HAL Id: hal-03089184

<https://hal.science/hal-03089184>

Submitted on 28 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
ET DU CADRE DE VIE

Direction de l'Architecture

Comité de la Recherche

et du Développement en Architecture

4358



3030012048115

ÉCOLE D'ARCHITECTURE DE
VERSAILLES

**POUR UNE APPROCHE
BIOCLIMATIQUE
DE L'ARCHITECTURE**



La Face cachée du Soleil

juin 1978

259

BATIR AVEC LE CLIMAT

"POUR UNE APPROCHE BIOCLIMATIQUE

METHODOLOGIE

DE L'ARCHITECTURE"

I - Méthodes préliminaires

II - Méthodes rétrospectives

(Rapport final)

CLIMATOLOGIE

I - Définition

II - Les échelles climatiques

EQUIPE: "LA FACE CACHEE DU SOLEIL"

CONFORT

F.NICOLAS - M.VAYE, architectes

I - Définition

en collaboration avec:

Thermodynamique

III - Les indices

La Division Climatologie du Service Météorologique Métropolitain

IV -

Mrs BEDEL et CERON

COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DES BATIMENTS

et

Introduction

I - Nature des échanges thermiques

Mr G.OLIVE, ingénieur ECP, thermicien.

II - Le bilan thermique des faces des parois

III - Les apports convectifs directs de l'air

IV - Le renouvellement

V - Principales caractéristiques thermiques

d'un bâtiment

VI - Principales sollicitations thermiques

d'un bâtiment

UNITÉ PÉDAGOGIQUE

D'ARCHITECTURE N° 3

BIBLIOTHÈQUE

DES BATIMENTS

2. av. de Paris, 78000 VERSAILLES

I - Quelques méthodes de calcul de la balance

dépense-chaudeur gratuite

II - Quelques éléments méthodologiques de

conception

"LA FACE CACHEE DU SOLEIL"

15 RUE MONTORGUEIL 75001 PARIS

4258

JUN 78

72.026

8

8

SOMMAIRE

	Page
GEOMETRIE DU RAYONNEMENT	83
I - Diagramme solaire	84
II - Etude des masques dus à l'environnement	84
BATIR AVEC LE CLIMAT	4
METHODOLOGIE	5
I - Méthodes pressenties	6
II - Méthodes retenues	20
CLIMATOLOGIE	22
I - Définition	23
II - Les échelles climatiques	23
CONFORT	31
I - Définition	32
II - Expression de l'équation du bilan thermodynamique	33
III - Les indices d'environnement possibles	42
IV - Les zones de confort	46
COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DES BATIMENTS	51
Introduction	52
I - Nature des échanges hygrothermiques	53
II - Le bilan thermique des faces des parois	57
III - Les apports convectifs directs à l'air	65
IV - Le renouvellement d'air	66
V - Principales caractéristiques thermiques d'un bâtiment	69
VI - Principales sollicitations thermiques d'un bâtiment	69
EBAUCHE D'UNE METHODOLOGIE DE CONCEPTION THERMIQUE DES BATIMENTS	70
I - Quelques méthodes de calcul de la balance déperditions-chaleurs gratuites	71
II - Quelques éléments méthodologiques de conception	77
III - Ebauche méthodologique de prise en compte des	

	Page
sollicitations auxquelles un bâtiment est soumis	78
GEOMETRIE DU RAYONNEMENT	83
I - Diagramme solaire	84
II - Etude des masques dus à l'environnement	84
III - Etude du bâtiment	88
PROBLEMES RELATIFS AUX DONNEES CLIMATIQUES	95
Introduction	96
I - Problème de l'échelle climatique	97
II - Problème du maillage	97
III - Division de la France en régions climatiques	98
IV - Les données climatiques et leur présentation	103
CLIMATOLOGIE DE LA REGION PARISIENNE	108
I - Présentation du climat	109
II - Présentation des données	113
III - Lecture des données	144
IV - Variations microclimatiques	148
INTERPRETATION	154
I - Interprétation générale	155
II - Le confort d'hiver	155
III - Le confort d'été	157
IV - Le confort de demi-saison	158
BIBLIOGRAPHIE	160

BATIR AVEC LE CLIMAT

Depuis que l'architecture vernaculaire a cessé d'être un processus vivant, seules les traces de ce processus - c'est-à-dire les objets construits - peuvent nous informer. La lecture de ces constructions montre des résultats, des formes, mais en aucun cas ne nous éclaire sur la démarche à suivre. Et, s'il est possible d'y lire la pertinence ou la limite des techniques et des savoirs faire mis en oeuvre, il est impossible d'y découvrir le processus entier de production du bâti et, en particulier, l'ensemble des choix préalables à l'acte de construire tels que le choix du site, l'orientation etc.. Plus exactement, si aujourd'hui nous sommes capables, par analyse, d'apprécier la pertinence d'une implantation dans un site, nous sommes incapables de reproduire ce choix car le mode de production actuel du cadre bâti nous a fait perdre la connaissance concrète des lieux.

Comment construire avec le climat, aujourd'hui ? Par quoi remplacer la connaissance concrète des sites, issue de la symbiose de l'habitant constructeur avec son milieu ?

Au cours du siècle dernier, alors que commençait à s'estomper le consensus social de production du bâti, naissait une nouvelle science fondée sur une approche théorique : la climatologie.

Connaissance concrète du milieu et climatologie. Celle-ci peut-elle remplacer celle-là. Comment et dans quelles limites ?

METHODOLOGIE

I METHODES PRESENTIELLES

1) Recherche de types de temps:

La première méthode pressentie était basée sur la recherche de types de temps, dont la combinaison aurait défini des "scénarios climatiques": chaque type de temps renverrait à un certain nombre de problèmes à résoudre. La connaissance de la nature et de l'importance relative de ces problèmes, liée aux connaissances du comportement thermique de l'enveloppe permettrait une optimisation de celle-ci et de sa dynamique.

Or nous nous sommes heurtés à un obstacle lié à la nature même du climat de la région parisienne: à toutes les échelles (zonale, régionale et locale), celui-ci se trouve au carrefour d'influences contradictoires dont l'alternance et l'interaction rendent les effets trop aléatoires.

a) Recherche à partir de la climatologie physique:

La climatologie physique définit les types de temps à partir de l'aérodynamique, c'est à dire l'étude des circulations atmosphériques:

- Les types cycloniques: fonction des trajectoires des courants de perturbations.
- Les types anticycloniques: fonction des structures des masses d'air non perturbées.

Une étude de P. PEDERSEN détermine sur ces critères pour le Bassin Parisien 14 types de temps (cf. p.7). L'analyse des fréquences, stabilités et combinaisons de ces types de temps pour l'année, puis mois par mois est très claire (cf. p.8 + 12). Mais si du point de vue de la climatologie physique, celle-ci est très satisfaisante, du point de vue concret qui nous intéresse, elle est inutilisable! En effet, contrairement au climat méditerranéen (cf. p.13), aucune corrélation ne peut être faite entre ces types de temps et le temps qu'il fait: un même type cyclonique peut être chaud ou froid, sec ou pluvieux, etc... Ainsi, de sous-types en sous-types, le nombre trop grand de cas obtenus rend la méthode caduque.

I METHODES PRESSENTIES

1) Recherche de types de temps:

La première méthode pressentie était basée sur la recherche de types de temps, dont la combinaison aurait défini des "scénarios climatiques": chaque type de temps renverrait à un certain nombre de problèmes à résoudre. La connaissance de la nature et de l'importance relative de ces problèmes, liée aux connaissances du comportement thermique de l'enveloppe permettrait une optimisation de celle-ci et de sa dynamique.

Or nous nous sommes heurtés à un obstacle lié à la nature même du climat de la région parisienne: à toutes les échelles (zonale, régionale et locale), celui-ci se trouve au carrefour d'influences contradictoires dont l'alternance et l'interaction rendent les effets trop aléatoires.

a) Recherche à partir de la climatologie physique:

La climatologie physique définit les types de temps à partir de l'aérologie, c'est à dire l'étude des circulations atmosphériques:

- Les types cycloniques: fonction des trajectoires des courants de perturbations,
- Les types anticycloniques: fonction des structures des masses d'air non perturbées.

Une étude de P. PEDELABORDE détermine sur ces critères pour le Bassin Parisien 14 types de temps (cf. p. 7). L'analyse des fréquences, stabilités et combinaisons de ces types de temps pour l'année, puis mois par mois est très claire (cf. p. 8 à 12). Mais si du point de vue de la climatologie physique, celle-ci est très satisfaisante, du point de vue concret qui nous intéresse, elle est inutilisable! En effet, contrairement au climat méditerranéen (cf. p. 13), aucune corrélation ne peut être faite entre ces types de temps et le temps qu'il fait: un même type cyclonique peut être chaud ou froid, sec ou pluvieux, etc... Ainsi, de sous-types en sous-types, le nombre trop grand de cas obtenus rend la méthode caduque.

1 FRÉQUENCES DES TYPES DE TEMPS DU BASSIN PARISIEN, EN POURCENTAGES, PENDANT LES 25 ANNÉES CIVILES 1926-1950

- Anticyclones continentaux	29	indigènes 21	clairs	14.3
			nébuleux	6.7
	8	allogènes 8	clairs	6
			nébuleux	2
- Anticyclones océaniques	13	13	clairs	5.9
			nébuleux	7.1
- Temps cycloniques	58	Secteur W 31	W ₁	2.7
			W ₂	12.3
			W ₄	16
	17.5	Sect. N	NW	13.3
			N	3.2
			NE	1
	9.5	Sect. S	SW	8.2
			SE	1.3
TOTAUX :	100	100	100	100

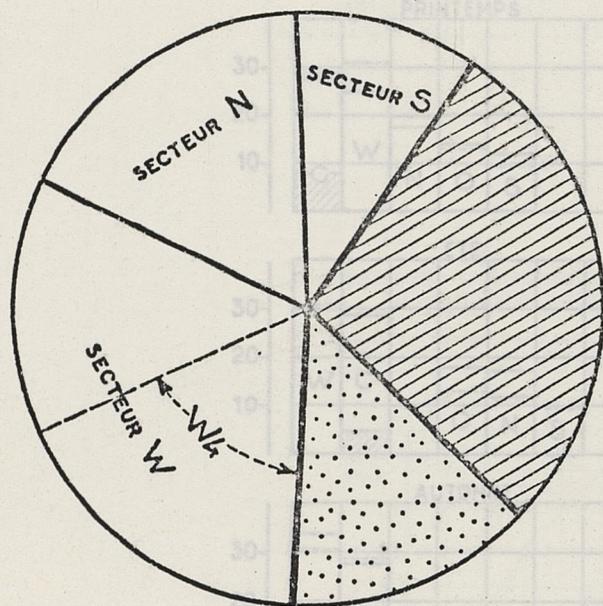
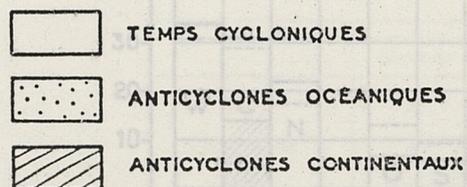
2 FRÉQUENCES DES TYPES DE TEMPS DU BASSIN PARISIEN, EN POURCENTAGES, PENDANT LES 5 ANNÉES CIVILES 1946-1950

- Anticyclones continentaux	31.5	indigènes 21.2	clairs	16.1
			nébuleux	5.1
	10.3	allogènes 10.3	clairs	6.5
			nébuleux	3.8
- Anticyclones océaniques	10	10	clairs	5.8
			nébuleux	4.2
- Temps cycloniques	58.5	Secteur W 36.5	W ₁	2
			W ₂	12.5
			W ₄	22
	15	Secteur N	NW	11.7
			N	1.8
			NE	1.6
	7	Secteur S	SW	5.3
			SE	1.6
TOTAUX :	100	100	100	100

(1)

— Les types de temps de l'année moyenne.
Fréquences et stabilité.

3 TYPES DE TEMPS DU BASSIN PARISIEN PENDANT LES 25 ANNÉES CIVILES 1926 - 1950



4 STABILITÉ DES TYPES DE TEMPS DU BASSIN PARISIEN PENDANT LES 25 ANNÉES CIVILES 1926-1950

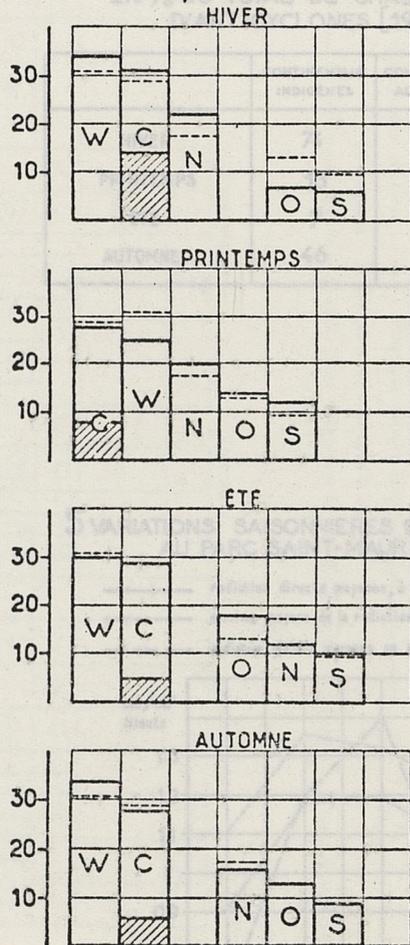
TYPES	NOMBRE DE JOURS TOTAL	NOMBRE DE PÉRIODES	DURÉE MOYENNE D'UNE PÉRIODE, EN JOURS
I. ENSEMBLE DES ANTICYCLONES CONTINENTAUX			
- Anticyclones indigènes	2 655	1 053	2.5
- Clairs	1 930	805	2.4
- Nébuleux	1 314	520	2.5
- Anticyclones allogènes	616	285	2.2
- Clairs	725	248	2.9
- Nébuleux	538	181	3
- Nébuleux	187	67	2.8
II. ANTICYCLONES Océaniques			
	1 197	636	1.9
III. ENSEMBLE DES TEMPS CYCLONIQUES			
- Secteur W	5 279	1 985	2.6
- W ₁	2 819	1 086	2.6
- W ₂	242	112	2.1
- W ₄	1 125	465	2.4
- W ₄	1 452	509	2.8
- Secteur N	1 593	575	2.7
- NW	1 217	442	2.7
- N	282	99	2.8
- NE	94	34	2.7
- Secteur S	867	324	2.6
- SW	748	284	2.6
- SE	119	40	3
- Total de la période 1926-1950	9 131	3 501	2.6
- Total de la période 1946-1950	1 826	708	2.6

— Les types de temps de l'année moyenne.
Fréquences et stabilité.

(1)

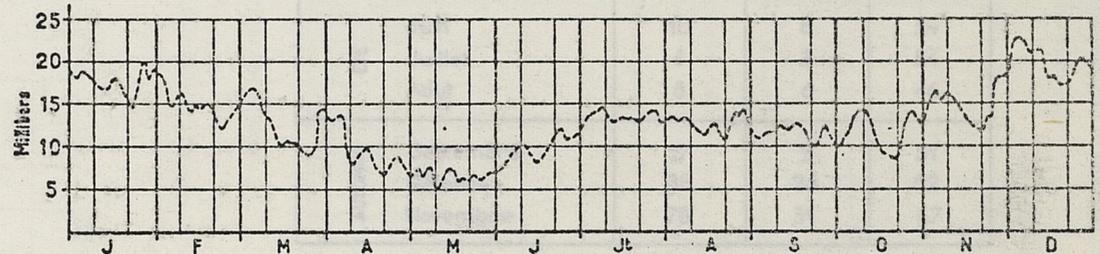
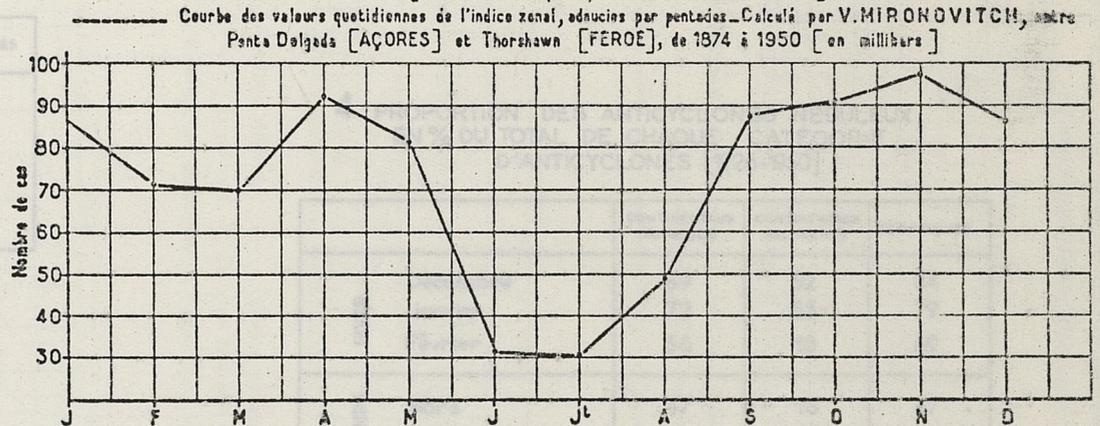
1 COMBINAISONS SAISONNIÈRES DES FRÉQUENCES DES TYPES DE TEMPS EN %
 -Le trait interrompu figure la moyenne annuelle de chaque type-

W-secteur W N-secteur N
 S-secteur S C-allogènes
 C-anticyclones continentaux



2 CIRCULATION ZONALE ET CIRCULATION MÉRIDIENNE

— Total des creusements d'une durée de 1 à 3 jours, aux AÇORES, de 1874 à 1950
 [courbe communiquée par V. MIRONOVITCH]



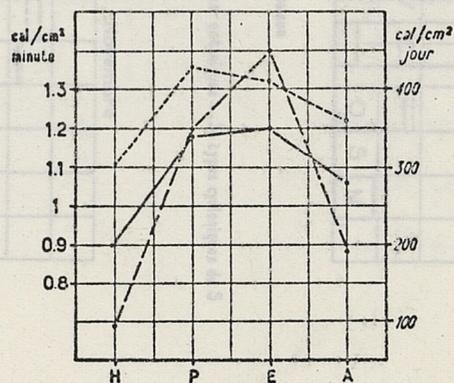
(1)

3 PROPORTION DES ANTICYCLONES NÉBULEUX,
EN % DU TOTAL DE CHAQUE CATÉGORIE
D'ANTICYCLONES [1926-1950]

	CONTINENTAUX INDIGÈNES	CONTINENTAUX ALLOGÈNES	Océaniques
HIVER	74	43	77
PRINTEMPS	13	13	53
ÉTÉ	7	6	51
AUTOMNE	46	18	57

5 VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA RADIATION
AU PARC SAINT-MAUR [1928-1953]

- radiation directe moyenne, à midi, en cal/cm²/min.
- maxime moyens de la radiation directe en cal/cm²/min.
- - - radiation globale moyenne en cal/cm²/jour



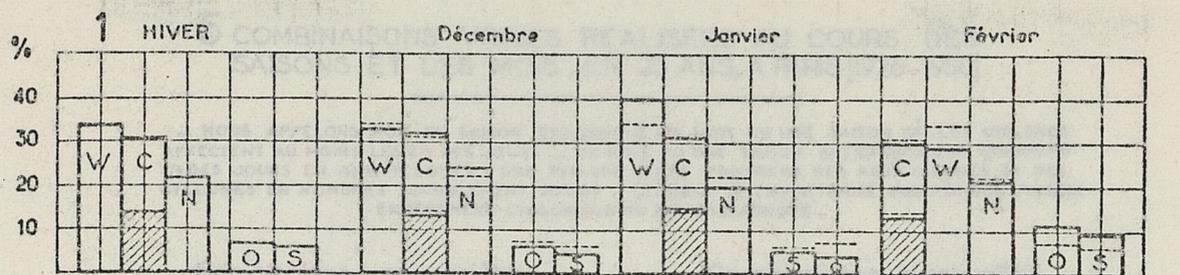
(1)

4 PROPORTION DES ANTICYCLONES NÉBULEUX,
EN % DU TOTAL DE CHAQUE CATÉGORIE
D'ANTICYCLONES [1926-1950]

		CONTINENTAUX INDIGÈNES	CONTINENTAUX ALLOGÈNES	Océaniques
HIVER	Décembre	89	52	34
	Janvier	72	55	79
	Février	56	18	69
PRINTEMPS	Mars	17	18	67
	Avril	7	17	46
	Mai	13	0	46
ÉTÉ	Juin	10	8	54
	Juillet	4	3	54
	Août	8	6	46
AUTOMNE	Septembre	17	2	51
	Octobre	33	26	52
	Novembre	78	31	67

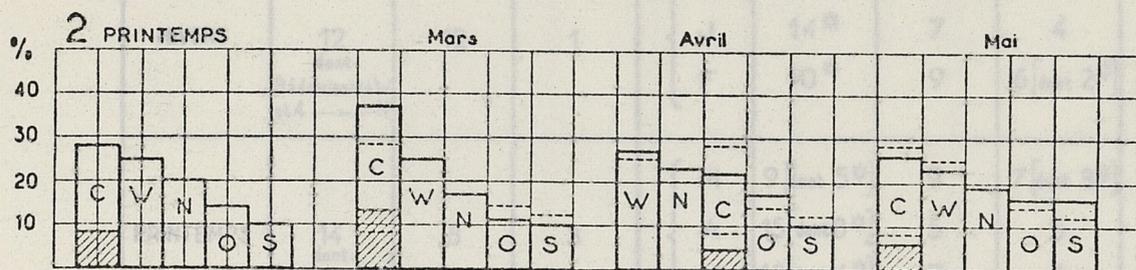
Planchie — Structures comparées des saisons et des mois. (1)

Fréquences mensuelles des types de temps.



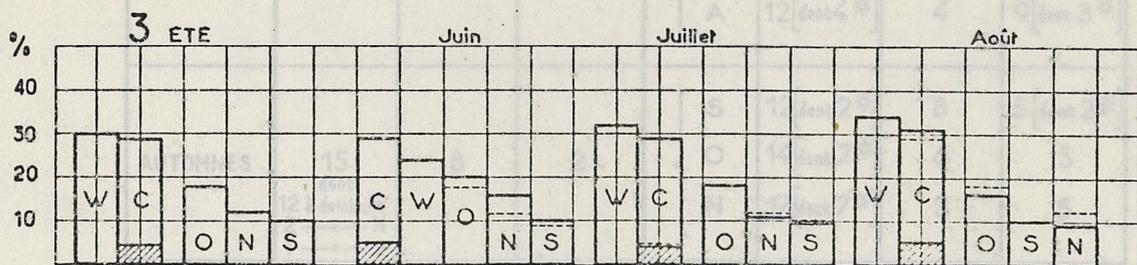
Anticyclones allogènes — Fréquence moyenne du type pendant toute la saison
En ordonnée % des jours du mois ou de la saison

W: types cycloniques d'W — C: anticyclones continentaux — N: types cycloniques de N — O: anticyclones océaniques — S: types cycloniques de S



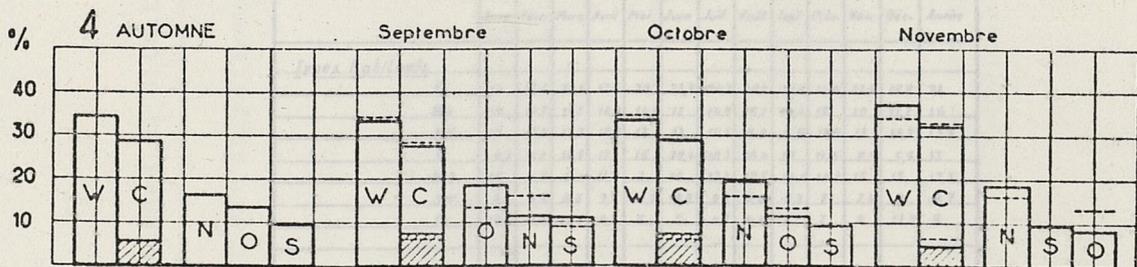
Anticyclones allogènes — Fréquence moyenne du type pendant toute la saison
En ordonnée % des jours du mois ou de la saison

W: types cycloniques d'W — C: anticyclones continentaux — N: types cycloniques de N — O: anticyclones océaniques — S: types cycloniques de S



Anticyclones allogènes — Fréquence moyenne du type pendant toute la saison
En ordonnée % des jours du mois ou de la saison

W: types cycloniques d'W — C: anticyclones continentaux — N: types cycloniques de N — O: anticyclones océaniques — S: types cycloniques de S



Anticyclones allogènes — Fréquence moyenne du type pendant toute la saison
En ordonnée % des jours du mois ou de la saison

W: types cycloniques d'W — C: anticyclones continentaux — N: types cycloniques de N — O: anticyclones océaniques — S: types cycloniques de S

Planche — Structures comparées des saisons et des mois. (1)
Fréquences mensuelles des types de temps.

5 COMBINAISONS VRAIES RÉALISÉES AU COURS DES SAISONS ET DES MOIS, EN 25 ANS, A PARIS [1926-1950]

— NOUS APPELONS MOIS OU SAISON CYCLONIQUE UN MOIS OU UNE SAISON OÙ LES CYCLONES AFFECTENT AU MOINS LES 2/3 DES JOURS — UN MOIS OU UNE SAISON ANTICYCLONIQUE COMPREND 2/3 DES JOURS EN ANTICYCLONES. UNE PÉRIODE MIXTE COMPREND DES ANTICYCLONES ET DES CYCLONES EN NOMBRES SENSIBLEMENT VOISINS. LE SIGNE * CARACTÉRISE UNE PÉRIODE PRESQUE ENTIÈREMENT CYCLONIQUE OU ANTICYCLONIQUE.

Combinaisons saisonnières

Combinaisons mensuelles

	CYCLONIQUES	MIXTES	ANTI-CYCLONIQUES		CYCLONIQUES	MIXTES	ANTI-CYCLONIQUES
HIVERS	12 dont: 8 à dominante W et 4 — N	12	1	{ D J F	13 14* 10*	10 7 9	2 4 6 [dont 2*]
PRINTEMPS	14 dont: 8 à dominante N 5 — W 1 — S	8	3	{ M A M	9 [dont 5*] 15 [dont 8*] 13 [dont 4*]	9 5 7	7 [dont 3*] 5 5
ÉTÉS	8	6	11	{ J J† A	7 [dont 3*] 11 [dont 4*] 12 [dont 4*]	12 5 4	6 [dont 2*] 9 [dont 2*] 9 [dont 3*]
AUTOMNES	15 dont: 12 à domin. W 2 — N 1 — S	8	2	{ S O N	12 [dont 2*] 14 [dont 7*] 17 [dont 7*]	8 6 3	5 [dont 2*] 5 5

6 Fréquences mensuelles des types de temps en % de 1926 à 1950. Les types sont désignés par les mêmes symboles que sur notre calendrier. (Pl. 67)

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Octo.	Nov.	Déc.	Année
<i>Types habituels</i>													
Di	16	16,6	24,1	17,6	20	23,6	24,7	26,2	20,8	21,4	23,3	18,8	21
W4	19	17,7	15,7	14,4	14,6	13	14,8	18,3	15,4	15	19	17,2	16
NW	16	17,2	12,3	18,8	13	13	10,5	8,9	9,6	12,5	13	18,3	13,3
O	6,2	11,2	10,5	17	16	20,4	18,3	16,4	18	11,6	8,5	5,5	13
W2	16	11,5	6	11,8	7	10	17,3	12,5	14,4	14,3	15	13	12,3
SW	4,5	8,4	8,6	9,5	12,5	9,8	9,5	8,8	8,3	7	7,4	4	8,2
Ca	14,6	12,4	12,5	4,7	6	5	4,3	4,5	6,7	7	4	13,3	8
<i>Types rares</i>													
N	3	6	4	2,7	4	1,8	0,1		1,4	5	4,5	4	3,2
W1	5	3,6	2,7	0,8	1,4	1,4	0,1	2,9	3,2	3,3	3	3,1	2,7
SE	0,1	0,8	1,6	1	3,5	1		1,5	2,2	1,7	1,8	0,6	1,3
NE	1,5	1,4	1	1,7	2	1	0,4			0,2	0,5	2,2	1

Tableau des caractéristiques du climat méditerranéen (2)

Le climat méditerranéen est caractérisé par trois types de temps :

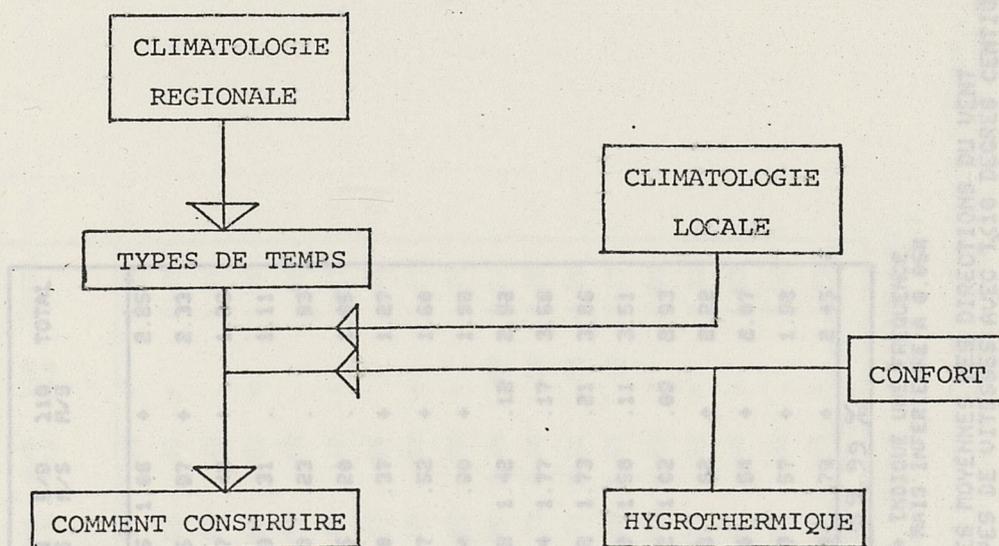
TYPE DE TEMPS	HUMIDITE	TEMPERATURE	ENSOLEILLEMENT	VENT	AMPLITUDE TEMPERATURES
Vent Sud-Est	forte (précipitations)	douce (10 à 15°)	faible à nul	fort	faible
Mistral	très faible	fraîche basse	fort	fort	faible
Anticyclonique	variable (nuit/jour)	élevée le jour basse la nuit	fort	faible (brises marines)	forte

Ce tableau laisse apparaître que les périodes de froid correspondent à un ensoleillement maximum, et que les périodes non ensoleillées correspondent à des températures douces.

b) Recherche à partir de corrélations:

Nous avons, avec la Météorologie Nationale, travaillé à partir des données climatologiques (celles de la station de Trappes pour laquelle il existe les données les plus nombreuses et précises, en particulier en ce qui concerne le rayonnement). Notre préoccupation centrale a alors concerné les corrélations entre les quatre paramètres climatiques dominants: par exemple, pour un jour de ciel clair, c'est-à-dire à ensoleillement théorique maximum, quelle est la situation des trois autres paramètres (vents, température, humidité)? Si les corrélations apparaissent significatives, il sera possible, par saison (définies à partir de la climatologie générale), de définir un certain nombre de cas types. Mais là encore, l'aléatoire du climat de la région parisienne est apparu, et malgré le choix des corrélations à effectuer, après plusieurs essais, aucun résultat significatif n'est apparu.

(cf. en particulier les corrélations vents / températures pour l'année, effectuées également par saison - pages suivantes - et en annexe le cahier des charges météo avec les corrélations correspondantes)

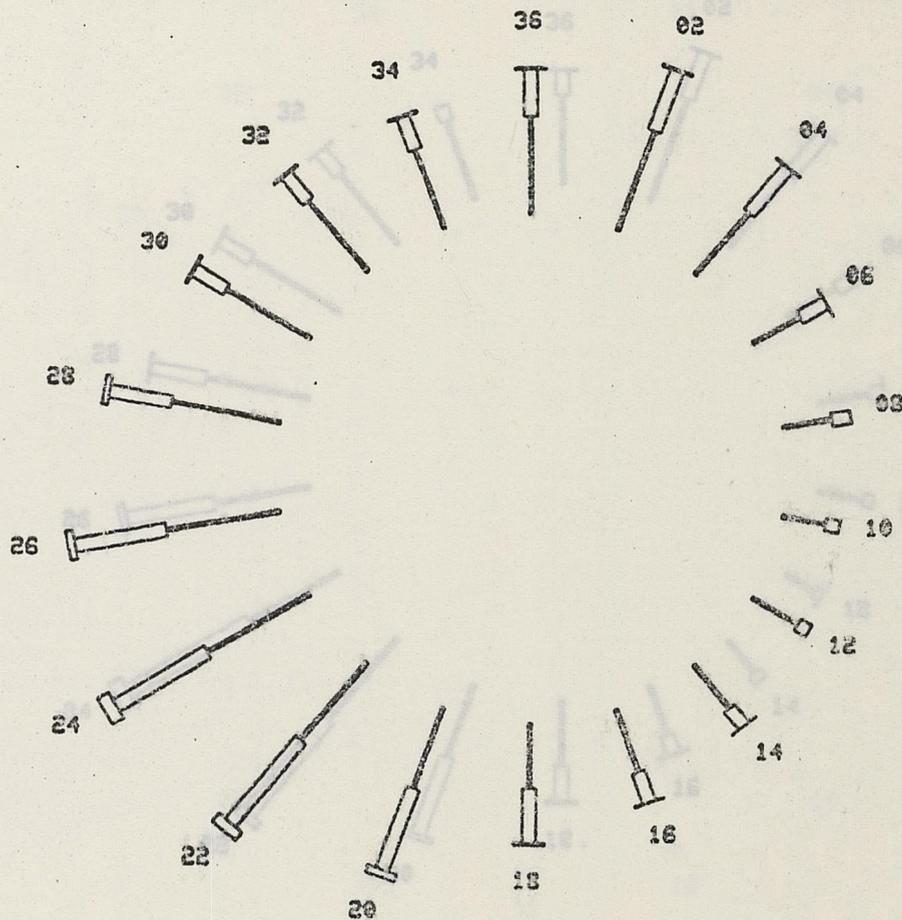


ORGANIGRAMME DE LA METHODE PRESSENTIE

LONG. : 2.61
LAT. : 48.46

U D	2/4 M/S	5/9 M/S	10 M/S	TOTAL
02	1.75	1.06	+	2.85
04	1.35	.97	+	2.33
06	.87	.42	+	1.38
08	.80	.31	.	1.11
10	.70	.23	.	.93
12	.55	.20	.	1.05
14	.90	.37	+	1.27
16	1.07	.52	+	1.60
18	1.04	.90	+	1.92
20	1.38	1.42	.12	2.92
22	1.64	1.77	.17	3.52
24	1.92	1.73	.21	3.86
26	1.90	1.50	.11	3.51
28	1.22	1.02	.09	2.93
30	1.53	.62	+	2.22
32	1.50	.54	+	2.07
34	1.30	.57	+	1.92
36	1.63	.79	+	2.45

U < 2M/S 59,99%



LE SIGNE + INDIQUE UNE FREQUENCE
NON NULLE MAIS INFÉRIEURE A 0.05%

FREQUENCES MOYENNES DES DIRECTIONS DU VENT
PAR GROUPES DE VITESSES AVEC T<10 DEGRES CENTIGRADES.

PERIODE : 1965-1975

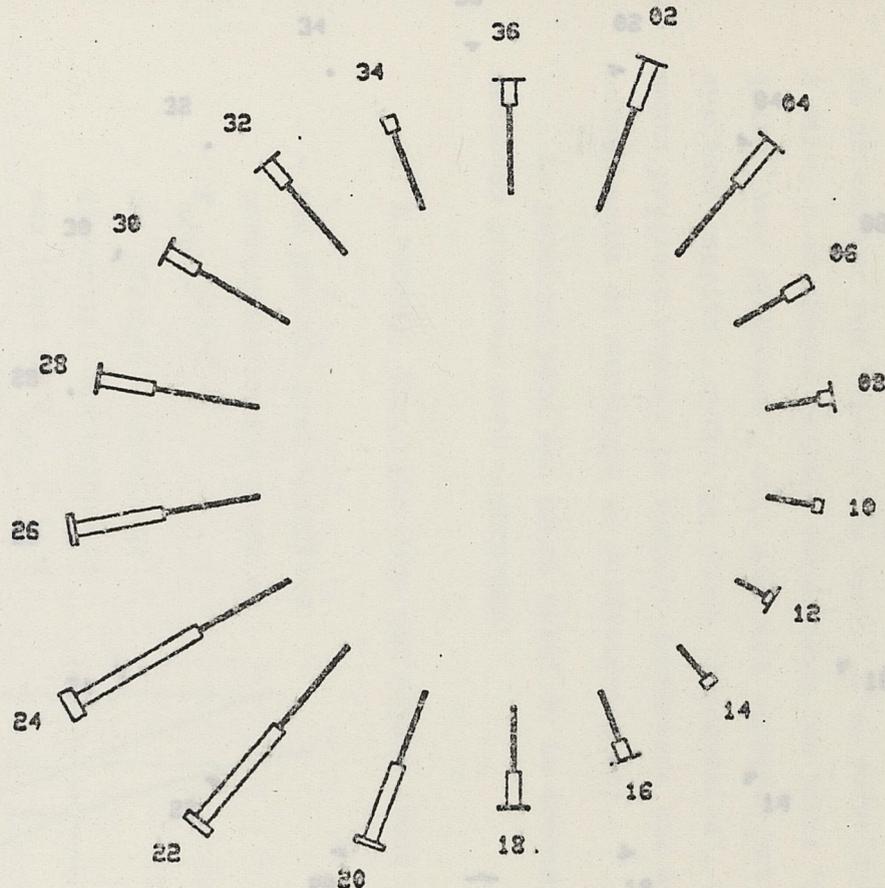
— DE 2 A 4 M/S
□ DE 5 A 9 M/S
□ 10 M/S ET PLUS

0 5.00

LONG. 2.01
 LAT. 48.46

U	2/4 M/S	5/9 M/S	10 M/S	TOTAL M/S
02	1.77	.83	+	2.62
04	1.51	.89	+	2.42
06	.93	.48	.	1.41
08	.88	.83	+	1.99
10	.77	.15	.	.92
12	.64	.12	+	.67
14	.67	.16	.	.83
16	.87	.32	+	1.19
18	1.03	.58	+	1.70
20	1.26	1.34	.09	2.71
22	1.73	2.00	.15	3.89
24	1.71	2.31	.23	4.25
26	1.66	1.47	.10	3.17
28	1.74	.92	+	2.69
30	1.70	.60	+	2.31
32	1.47	.48	+	1.95
34	1.35	.28	.	1.60
36	1.47	.42	+	1.99

U < 2M/S = 63.69 %



LE SIGNE + INDIQUE UNE FREQUENCE
 NON NULLE MAIS INFERIEURE A 0.05%

FREQUENCES MOYENNES DES DIRECTIONS DU VENT
 PAR GROUPES DE VITESSES AVEC 10/25 DEGRES CENTIGRADES.

PERIODE : 1965-1975

— DE 2 A 4 M/S
 □ DE 5 A 9 M/S
 □ 10 M/S ET PLUS

0 5.00

LONG. . . 2.01
 LAT. . . 48.46

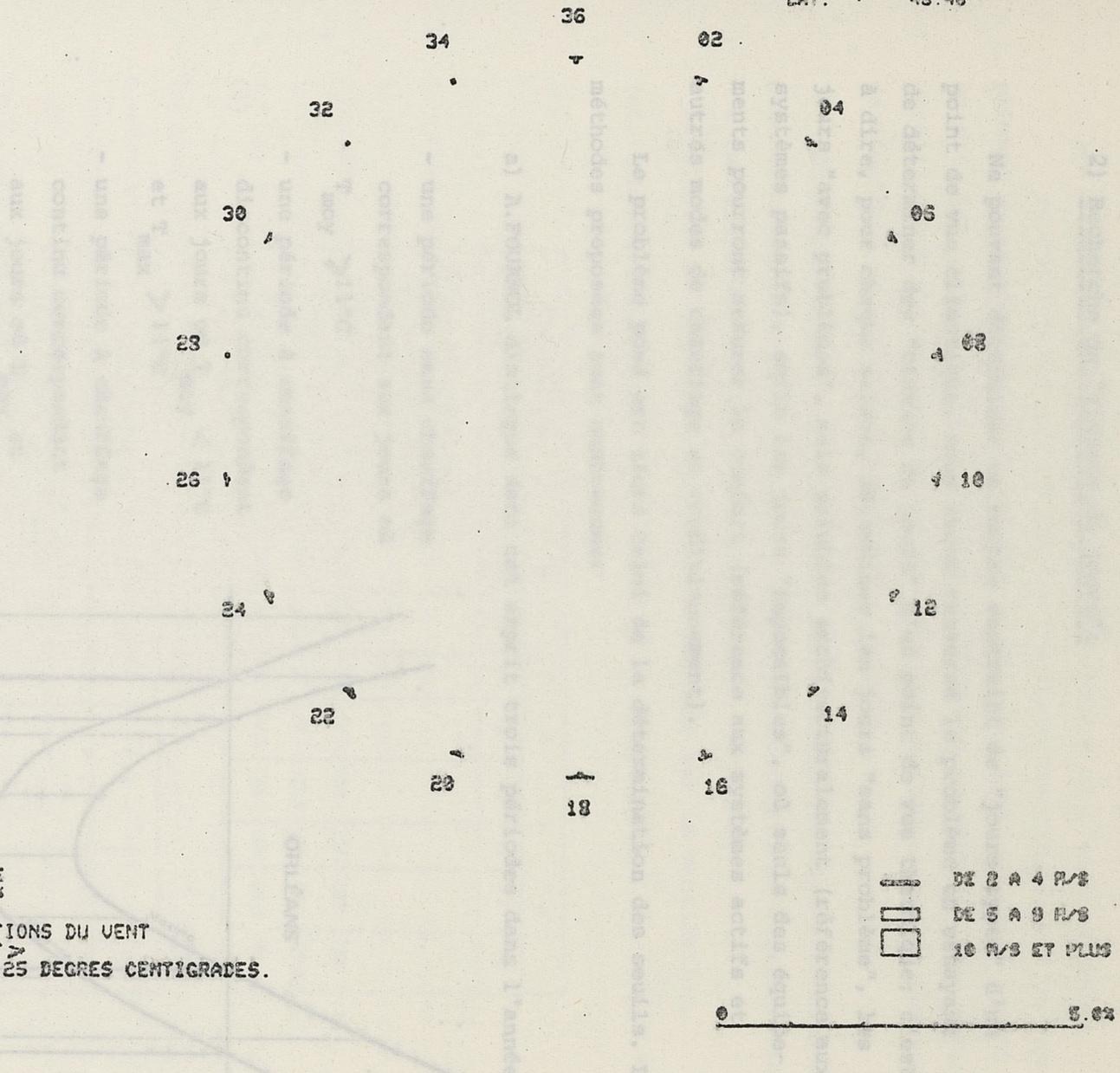
U \ D	2/4 M/S	5/9 M/S	10 M/S	TOTAL
02	.06	+		.08
04	+	+		.07
06	.05	+		.06
08	.09	+		.11
10	.05	+		.07
12	+	+		.06
14	+	+		.06
16	.07	+		.10
18	+	+	+	.06
20	+	+		+
22	+	+		.08
24	+	+		.07
26	+	+		+
28	+			+
30	+	+		+
32	+			+
34	+			+
35	.07	+		.07

U < 20 M/S . 99.89 %

LE SIGNE + INDIQUE UNE FREQUENCE
 NON NULLE MAIS INFÉRIEURE A 0.05%

FREQUENCES MOYENNES DES DIRECTIONS DU VENT
 PAR GROUPES DE VITESSES AVEC T₂₅
 25 DEGRES CENTIGRADES.

PERIODE . 1955-1975



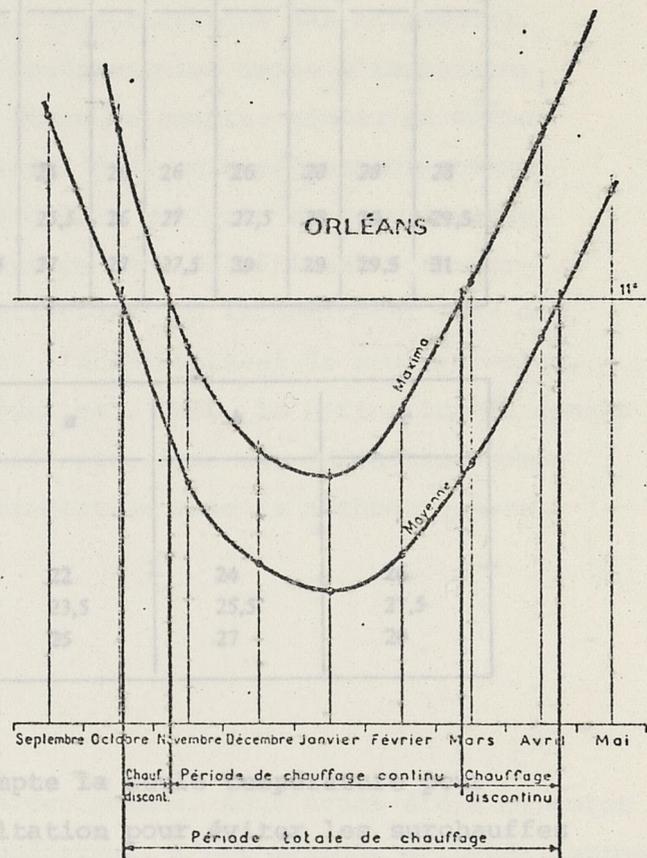
2) Recherche de "classes de jours":

Ne pouvant déterminer un nombre restreint de "jours types" d'un point de vue climatique, nous avons renversé le problème en essayant de déterminer des "classes de jours" d'un point de vue thermique; c'est à dire, pour chaque saison, déterminer les jours "sans problème", les jours "avec problèmes", mais solubles architecturalement (référence aux systèmes passifs), enfin les jours "impossibles", où seuls des équipements pourront assurer le confort (référence aux systèmes actifs et autres modes de chauffage et conditionnement).

Le problème posé est alors celui de la détermination des seuils. Les méthodes proposées sont nombreuses:

a) A.FOURNOL distingue dans cet esprit trois périodes dans l'année:

- une période sans chauffage correspondant aux jours où $T_{\text{moy}} \geq 11^{\circ}\text{C}$
- une période à chauffage discontinu correspondant aux jours où $T_{\text{moy}} < 11^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{max}} > 11^{\circ}\text{C}$
- une période à chauffage continu correspondant aux jours où T_{moy} et $T_{\text{max}} < 11^{\circ}\text{C}$.



(cf. figure ci-contre)

b) M.CROISET prend en compte la température et l'ensoleillement en considérant que les apports solaires correspondent à un supplément de température allant de 0°C en décembre à 6°C en avril et 8°C en été. Sur la base d'une température intérieure de 20°C, et d'un apport gratuit des habitants de 2 à 3°C, il considère également que la limite de chauffage se situe autour d'une $T_{\text{moy}} = 11^\circ\text{C}$.

En ce qui concerne le confort d'été, le seuil est fixé à 28°C. Deux paramètres supplémentaires, liés au bâtiment, sont pris en considération:

- l'inertie, influant sur l'amortissement,
- la simple et la double exposition*, influant sur la ventilation.

(cf. tableaux ci-dessous)

Zone climatique	a			b			c		
	E	S	O	E	S	O	E	S	O
Exposition									
Température atteinte en l'absence d'apports solaires dans les logements à simple exposition.....									
Construction d'inertie moyenne	24	24	24	26	26	26	28	28	28
Construction d'inertie faible	24	25	25,5	26	27	27,5	28	29	29,5
Construction d'inertie très faible.....	25	25,5	27	27	27,5	29	29	29,5	31

(4)

Zone climatique	a	b	c
Température atteinte en l'absence d'apports solaires dans les logements à double exposition :			
Construction d'inertie moyenne	22	24	26
Construction d'inertie faible...	23,5	25,5	27,5
Construction d'inertie très faible	25	27	29

II METHODE SUITE

- V.OLGYAY prend d'abord en compte la seule température pour déterminer: la limite d'occultation pour éviter les surchauffes (seuil fixé à 21°C)

.les valeurs de rayonnement minimum nécessaire (cas des faibles températures)

.les valeurs de vitesse du vent minimum nécessaire (cas des fortes températures)

et ceci en fonction de l'humidité relative correspondante (cf. p48)

- B. GIVONI établit un diagramme bioclimatique du bâtiment qui permet d'étendre la zone de confort (déterminée en fonction de la température sèche et de la pression de vapeur d'eau) en tenant compte de l'inertie, de la ventilation et de l'évaporation (cf. p43)

- Le groupe ABC a repris cette méthode à partir du polygone de confort défini par Vogt et Miller-Chagas, déterminant ainsi les "limites d'influence des facteurs architecturaux et des dispositifs d'appoint (cf. p50).

D'autres méthodes existent encore, mais toutes font une relative impasse en ce qui concerne la complexité des échanges thermiques, et en particulier l'interaction des phénomènes qui rend difficile leur prise en compte séparée (cf. chapitre Hygrothermique des bâtiments). De plus, plusieurs caractéristiques fondamentales comme l'isolation, la forme, etc... ne rentrent pas en ligne de compte: ainsi, la variation d'un paramètre qui déplace un seuil dans un sens peut-elle être contrecarrée par celle d'un autre paramètre qui agit en sens inverse sur ce seuil. Enfin, la nature et l'usage même du bâtiment - en particulier, usage continu (cas des habitations) ou intermittent (cas des bureaux, écoles, ...) - ne permet pas l'établissement de seuils absolus, et encore moins de solutions "universelles". Bref, la définition de seuils réellement opérationnels nous a semblé nécessiter une définition complète du bâtiment, ce qui est en contradiction avec la méthode qui se veut générale.

II METHODE RETENUE

Ces deux tentatives s'étant avérées vaines, nous avons été, à ce point de la recherche, orphelins d'un fil conducteur, d'une méthode d'investigation fructueuse. L'établissement d'une typologie d'éléments architecturaux, c'est-à-dire d'une formulation graphique issue d'une analyse bioclimatique et thermique nous est apparue impossible au regard des deux pro-

blèmes rencontrés et précités:

- le caractère aléatoire du climat parisien qui rend impossible la définition d'un nombre limité de types de temps,
- la complexité d'un bilan hygrothermique qui demande une connaissance et donc une définition précise de l'objet étudié, empêchant la définition de "seuils" qui permettrait la définition de classes de jours.

Ainsi, la nouvelle question posée est-elle devenue: Est-il pertinent de formuler des réponses typologiques, tout en sachant qu'elles ne garderont qu'une valeur très limitée, car sujettes à de trop nombreuses variations, ou bien est-il pertinent d'évoquer des principes de conception, et en particulier une hiérarchisation des moments clefs de la conception par rapport à la bioclimatique?

Pour ne pas nous engager sur un terrain dangereux, au risque d'entraîner des erreurs d'interprétation, nous nous limiterons au deuxième point.

Ainsi, la recherche présentée comporte une importante première partie qui tente, en faisant le point sur chacun des domaines concernés - climatologie, confort et hygrothermique des bâtiments, de cerner les problèmes relatifs à la conception bioclimatique du bâtiment, et de les hiérarchiser.

Une deuxième partie, opérationnelle pour la région parisienne, déterminera, à partir des données climatiques correspondantes, des principes de conception et des bases sommaires de calcul.

I DEFINITION

CLIMATOLOGIE

La climatologie est définie comme la science qui étudie les différents états de l'atmosphère. En 1902, Max Born définit le climat comme "l'ambiance atmosphérique constituée par la série des états de l'atmosphère au-dessus d'un lieu dans leur succession habituelle".

A l'échelle planétaire, c'est le mouvement des masses d'air qui induit les différents climats. Il existe quatre types de masses d'air: tropical, polaire, équatorial et arctique, et deux grands flux: entre les tropiques, les alizés (circulation est-ouest), et entre les latitudes 30 et 60°, les westerlies (circulation ouest-est), auxquels s'ajoute une circulation méridienne.

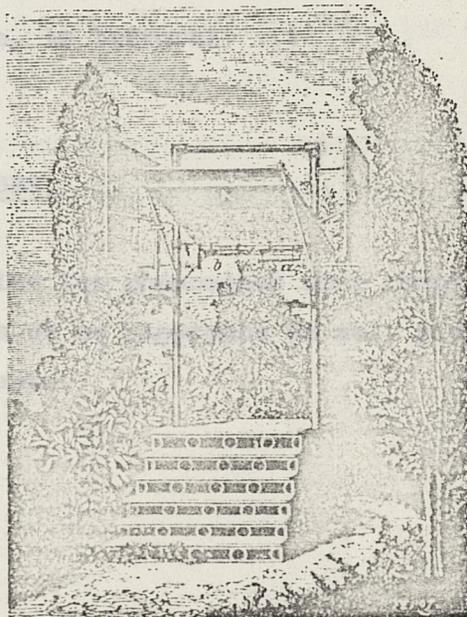
A une échelle plus restreinte, la matérialisation de ces mouvements de masses d'air, les vents et leurs corollaires, par les nombreux phénomènes qui rentrent alors en ligne de compte, sont loin d'être l'image fidèle des mouvements définis à l'échelle planétaire.

Ainsi, le changement d'échelle nécessite la prise en compte de phénomènes qui modifient les conclusions des observations faites à une échelle plus large. Les climatologues ont traduit par différents schémas climatiques les différents niveaux de phénomènes:

- 1) CLIMAT MONDIAL: division planétaire en "domaines climatiques".
- 2) CLIMAT REGIONAL: division d'un pays en "régions climatiques".
- 3) CLIMAT LOCAL: la vallée, la plaine.

II LES DIFFERENTES ECHELLES CLIMATIQUES

Plus l'échelle climatique diminue, plus l'influence des paramètres climatiques, plus l'influence de celui-ci devient prépondérante.



I DEFINITION

La climatologie est définie comme la science qui étudie les différents états de l'atmosphère. En 1943, Max Sorre définit le climat comme "L'ambiance atmosphérique constituée par la série des états de l'atmosphère au-dessus d'un lieu dans leur succession habituelle".

A l'échelle planétaire, c'est le mouvement des masses d'air qui induit les différents climats. Il existe quatre types de masses d'air: tropical, polaire, équatorial et artique, et deux grands flux: entre les tropiques, les alizés (circulation est-ouest), et entre les latitudes 30 et 60°, les westerlies (circulation ouest-est), auxquels s'ajoute une circulation méridienne.

A une échelle plus restreinte, la matérialisation de ces mouvements de masses d'air, les vents et leurs corollaires, par les nombreux phénomènes qui rentrent alors en ligne de compte, sont loin d'être l'image fidèle des mouvements définis à l'échelle planétaire.

Ainsi, le changement d'échelle nécessite la prise en compte de phénomènes qui modifient les conclusions des observations faites à une échelle plus large. Les climatologues ont traduit par différentes échelles climatiques les différents niveaux de phénomènes:

- 1) CLIMAT ZONAL: division planétaire en "domaines climatiques",
- 2) CLIMAT REGIONAL: division d'un pays en "régions climatiques"
- 3) CLIMAT LOCAL: la vallée, la plaine, le littoral, ...

II LES DIFFERENTES ECHELLES CLIMATIQUES

Plus l'échelle climatique diminue, plus les phénomènes sont complexes au regard des paramètres climatiques: plus on se rapproche du sol, plus l'influence de celui-ci devient prépondérante.

CLASSIFICATION des CLIMATS d'après Köppen, de Martonne, etc.

Portugais	Cfa	1 mois > 10°	été très chaud : a
Hellène	Csa	1 mois > 10°	été très chaud : a
Canonnais	Cfa	1 mois > 10°	été très chaud : a
Danubien	Dfa	1 mois < 10°	tempéré
Misourien	Dwa	12 mois > 10°	tempéré
Indien	Dwa	12 mois > 10°	tempéré
Californien*	Csa	1 mois > 10°	été très chaud : a
Breton	Cfb	12 mois > 10°	tempéré
Lotharingien	Cfb	12 mois > 10°	tempéré
Russo-	Dfb	12 mois > 10°	tempéré
Polonais	Dfb	12 mois > 10°	tempéré
Acadien*	Dfb	12 mois > 10°	tempéré
Nord-américain*	Dfb	12 mois > 10°	tempéré
Norvégien	Dfb	12 mois > 10°	tempéré
Sibérien	Dfb	12 mois > 10°	tempéré

1) Le climat zonal:

Au niveau de la planète, parmi la douzaine de facteurs climatiques, seules la température et les précipitations sont utilisées pour la qualification des climats. Le climatologue Köppen divise ainsi la planète en cinq climats types, eux-mêmes divisés en sous-climats:

- 1) chaud
- 2) aride
- 3) tempéré
- 4) tempéré à hiver froid
- 5) froid.

L'école française avec De Martonne affine cette classification en y ajoutant d'autres éléments naturels du paysage: végétation, sols, modelés, ... On obtient ainsi des domaines climatiques, correspondant à des types de climats. Chaque zone comprend donc plusieurs domaines dispersés sur la planète (cf. classification et planisphère pages suivantes).

2) Le climat régional:

La définition des climats régionaux affine la classification zonale par la prise en compte d'influences sensibles seulement à cette échelle. Les limites géographiques des régions climatiques sont généralement déterminées par le relief. Les ordres de grandeurs des valeurs des principaux paramètres climatiques (températures, ensoleillement, humidité, vents et précipitations) commencent à être significatifs et à caractériser concrètement - si ce n'est quantitativement - un climat: importance relative des différents paramètres, durées comparatives des saisons, rigueurs, ...

Pour la France, d'un point de vue climatologique pur, quatre influences (océanique, continentale, montagnarde et méditerranéenne) divisent le pays en quatre régions (cf. carte p.27)

Domaines	Limites	Saison sèche	Divisions climatiques	TYPES
A	12 mois > 10°	f: mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
B	10-12 mois > 10°	f: 10-12 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
C	9-10 mois > 10°	f: 9-10 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
D	8-9 mois > 10°	f: 8-9 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
E	7-8 mois > 10°	f: 7-8 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
F	6-7 mois > 10°	f: 6-7 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
G	5-6 mois > 10°	f: 5-6 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
H	4-5 mois > 10°	f: 4-5 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
I	3-4 mois > 10°	f: 3-4 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
J	2-3 mois > 10°	f: 2-3 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
K	1-2 mois > 10°	f: 1-2 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen
L	0-1 mois > 10°	f: 0-1 mois > 10° w: hiver	Köppen de Martonne	Af, Guinéen

Domaines	Limites	Saison sèche	Divisions thermiques	TYPES	
				Köppen	de Martonne
A chaud	12 mois > 18°	f : manque w : hiver ¹ m : mousson ²	i : isothermal ⁴	A f	Guinéen
				A f i	Océanien
				A w	Soudanien
				A w i	Hawaïen
				A m	Bengalien
				Am-Cwa	Annamien ³
			(climats d'altitude des régions chaudes)	C f i	Colombien
				C w	Mexicain
				B w	Bolivien
B aride ⁵	BS = P < 2t + 28	hiver : w	T° ann. > 18° = h	BS w h	Sénégalien
	BW = P < t + 14			BW w h	Saharien
				Bs s h	Syrien
			T° annuelle < 18°	BW s k	Turkmène
			et 1 mois > 18° = k		
				BW w k	Aralien
	BS = P < 2t	été = s			
	BW = P < t				
			12 mois < 18° = k'	BS s k'	Thibétain
	BS = P < 2t + 14	manque : f		BS f k'	Patagonien
	BW = P < t + 7				
			air humide n et : n'	BW n-n'	Péruvien

1. w = winter = hiver ; s = summer = été ; f = felt = manque.

Aw = 1 mois au moins avec P inférieures à 60 mm.

2. m = mousson : quand le mois le plus sec reçoit plus de : $10 \text{ cm} - \frac{P \text{ cm/an}}{25}$; sinon : Aw.

3. Maximum de pluies en automne et non en été.

4. Amplitude annuelle inférieure à 5°.

5. Climats B : formules avec P en cm, t en degrés centigrades.

S = steppe ; W = Wust = désert ; h = heiss = très chaud ; k = kalt = froid ; n = nebel = brouillard.

C tempéré	1 mois < 18° 12 mois > -3°	s et w ¹³	1 mois > 22° été très chaud : a	C s a C s a C f-w a C f a D f a D w a-b	Portugais ⁶ Hellène ⁷ Cantonnais Danubien Missourien Mandchourien	
			12 mois < 22° 5 à 12 mois > 10° été chaud : b	C s b n C f b C f b D f b D f b D s b	Californien ⁸ Breton Lorrain Russo-Polonais Acadien ⁹ Nevadien ¹⁰	
D tempéré à hiver froid	1 mois < -3° 1 mois > 10°		12 mois > -38° 1 à 4 mois > 10° été court et frais : c	D-C f c D f w c	Norvégien ¹¹ Sibérien	
			1 mois < -38° hiver très froid : d	D w d	Yakoute	
E froid			amplitude < 10°	ET f i	Islandien ¹²	
			ET 12 mois < 10° été > 0°	hiver froid et humide	ET f	Spitzbergien
				hiver très froid et sec	ET w	Angarien
				cl. de la banquise : (-35° -0°)	E F	Arctique
			cl. des inlandsis : (-70° -20°)	E F	Antarctique ou Inlandsisien	

6. Maximums de pluies au printemps et en automne ; sécheresse courte.

7. Maximum de pluies en hiver ; sécheresse longue.

8. Été frais et nébuleux (côtes à courants froids).

9. Hiver perturbé et très neigeux.

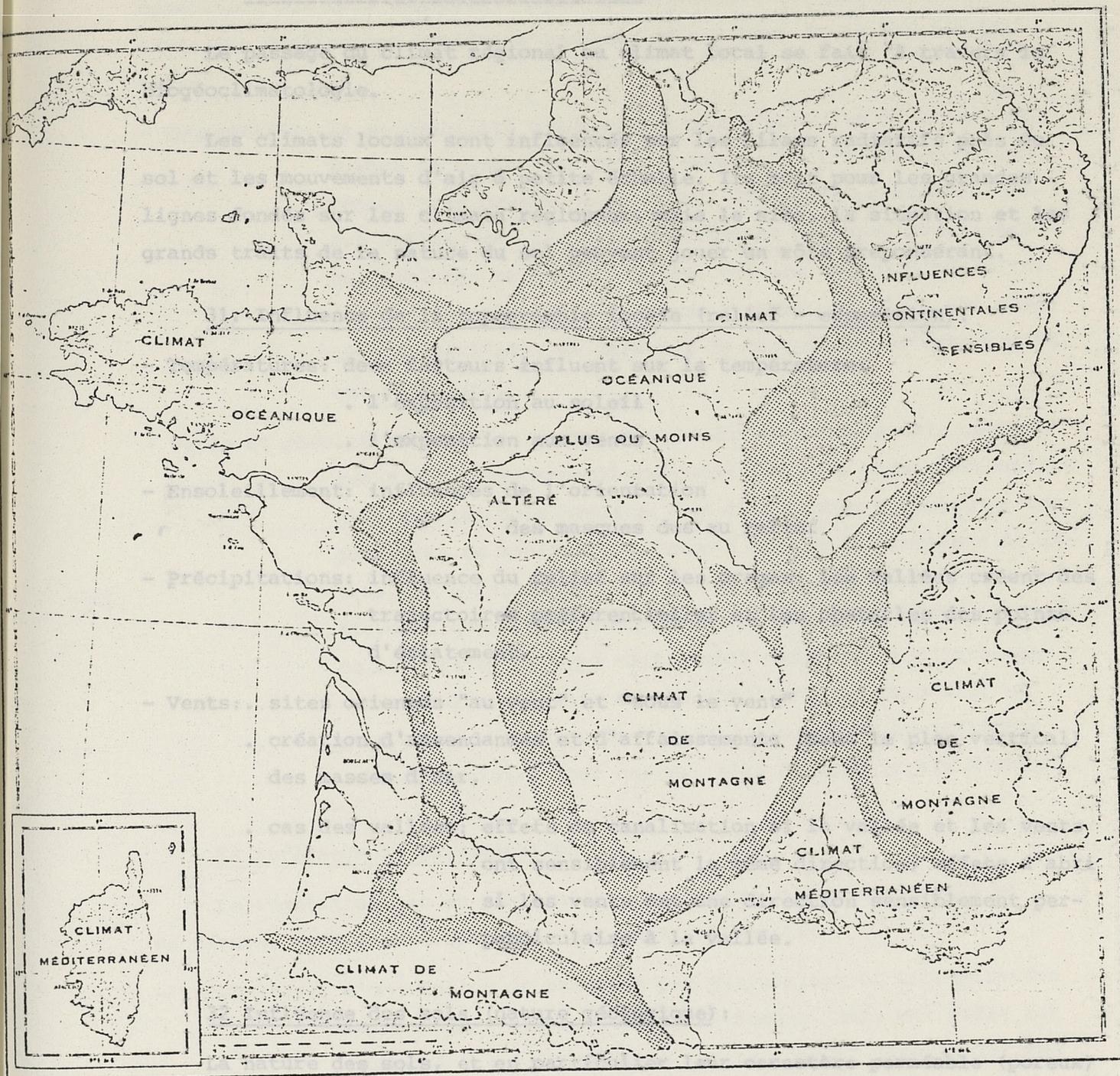
10. Très rare : continental à été sec l Nevada, U.S.A.

11. Précipitations orographiques abondantes, hiver doux.

12. Hyperocéanique froid.

13. C et D : hiver sec = w : le mois le plus sec d'hiver reçoit moins de 1/10 de précipitations du mois le plus arrosé de l'été ; ex. Jv 8 mm et Jt 105 mm ; été sec = s : le mois le plus sec d'été reçoit moins de 1/3 des précipitations du mois le plus arrosé d'hiver : ex. Jt 15 mm, Dc 60 mm.

3) Le climat local et le topoclimat:



Les parties grisées correspondent, soit à des transitions imprécises entre régions de climats voisins, soit à des zones très particulières (environs de Paris, Lyon, etc...; ensembles complexes à relief varié ou à nuances trop nombreuses; abords de massifs montagneux).

Chaleur spécifique et une plus faible conductivité; ils s'échauffent et se refroidissent plus. Par exemple, les sables des alluvions anciennes, par

3) Le climat local et le topoclimat:

Le passage du climat régional au climat local se fait à travers la biogéoclimatologie.

Les climats locaux sont influencés par les bilans radiatifs près du sol et les mouvements d'air à petite échelle. Ils sont pour les grandes lignes fondés sur les climats régionaux, mais le site, la situation et les grands traits de la nature du sol peuvent jouer un rôle prépondérant.

31. Influence de la topographie locale (relief - exposition):

- Températures: deux facteurs influent sur la température:
 - . l'exposition au soleil
 - . l'exposition aux vents
- Ensoleillement: influences de l'orientation
des masques dus au relief
- Précipitations: influence du relief sur les orages: les vallées créent des trajectoires préférentielles et les obstacles des points d'éclatement,
- Vents: sites orientés "au vent" et "sous le vent"
 - . création d'ascendances et d'affaissements (dans le plan vertical) des masses d'air,
 - . cas des vallées: effets de canalisation si la vallée et les vents ont sensiblement la même direction; effets d'abri si les vents ont une direction sensiblement perpendiculaire à la vallée.

32 Influence des sols (nature géologique):

La nature des sols, et en particulier leur caractère perméable (poreux) et donc sec en surface, ou imperméable, c'est à dire humide en surface, influe également sur les différents paramètres:

- Températures: les sols "secs" ont un plus fort albédo, une plus faible chaleur spécifique et une plus faible conductivité; ils s'échauffent et se refroidissent plus. Par exemple, les sables des alluvions anciennes, par

opposition aux sols argileux d'alluvions modernes. Le fond des vallées tapissées d'alluvions humides a toujours un sol plus froid que les plateaux.

- Hygrométrie: La perméabilité d'un sol diminue l'humidité de l'air. Une nuance de sécheresse peut s'exprimer à l'intérieur d'une région très humide, à la faveur d'un îlot perméable. Chaque vallée, par le ruban d'alluvions modernes argileuses qui prolonge sa masse liquide, est une source d'humidité. Dans ce cas là, en hiver ou en automne, où l'eau est plus chaude que l'air, la présence de brouillards d'évaporation est fréquente.
- Vents et précipitations: Les contrastes locaux entre deux sols provoquent des ascendances thermiques: les sols secs s'échauffant plus que les sols humides, des différences notables de températures se manifestent jusqu'à plusieurs centaines de mètres, en particulier dans le cas de masses d'air calme anticycloniques. La thermoconvection due à cet effet renforce les orages de type continental chaud: elle ajoute son effet aux mouvements ascendants d'origine frontale, et peut ainsi augmenter la violence des orages ou infléchir leur trajectoire (par contre, elle ne crée jamais d'orage).

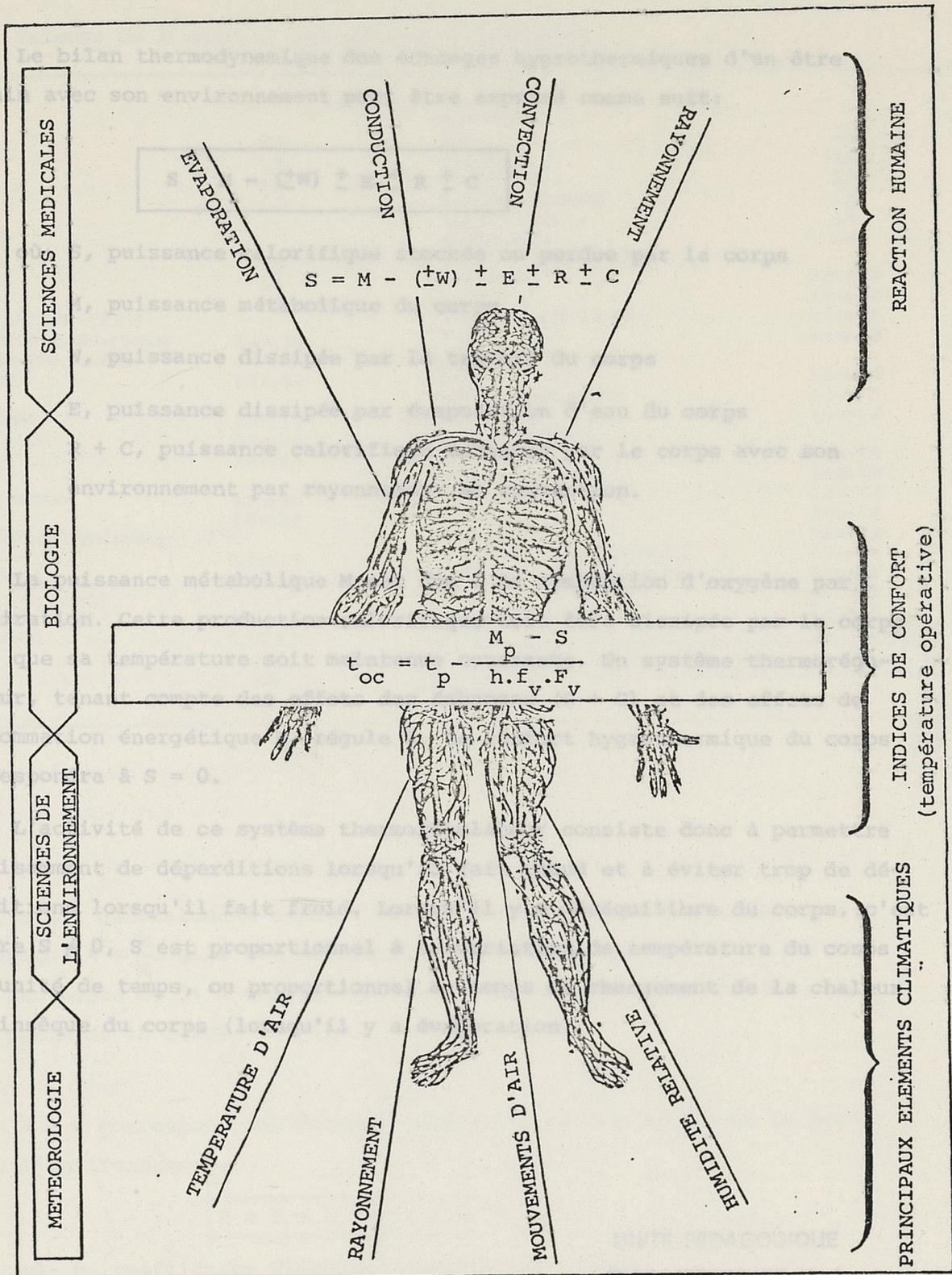
33 Influence de la végétation:

La végétation, et en particulier les forêts, selon sa densité et sa nature, influe principalement sur deux paramètres:

- Température: L'absorption de calories par évaporation et transpiration rafraichit l'air au dessus des forêts. Mais cet effet est compensé les nuits d'hiver par le couvert végétal qui réduit le rayonnement nocturne. Ainsi, les forêts ont tendance à tempérer le climat; mais leurs bordures sont toujours plus fraîches, et subissent en hiver un nombre plus important de jours avec gelées.
- Hygrométrie: Le dégagement de vapeur d'eau augmente l'humidité (de 4 à 6% selon la nature des arbres - maximum pour les conifères, minimum pour les feuillus) et créent des brouillards et des brumes, d'autant plus denses que l'air est calme.

CONFORT

I DEFINITION



RELATIONS ENTRE LE CORPS HUMAIN ET LES ELEMENTS CLIMATIQUES (8)

II EXPRESSION DE L'ÉQUATION DE BILAN THERMODYNAMIQUE

I DEFINITION

Le bilan thermodynamique des échanges hygrothermiques d'un être humain avec son environnement peut être exprimé comme suit:

$$S = M - (\dot{W}) \pm E \pm R \pm C$$

où: S, puissance calorifique stockée ou perdue par le corps

M, puissance métabolique du corps

W, puissance dissipée par le travail du corps

E, puissance dissipée par évaporation d'eau du corps

R + C, puissance calorifique échangée par le corps avec son environnement par rayonnement et convection.

La puissance métabolique M est due à la combustion d'oxygène par respiration. Cette production calorifique doit être dissipée par le corps pour que sa température soit maintenue constante. Un système thermorégulateur, tenant compte des effets des échanges (R + C) et des effets de consommation énergétique W, régule E. Le confort hygrothermique du corps correspondra à S = 0.

L'activité de ce système thermorégulateur consiste donc à permettre suffisamment de déperditions lorsqu'il fait chaud et à éviter trop de déperditions lorsqu'il fait froid. Lorsqu'il y a déséquilibre du corps, c'est à dire S ≠ 0, S est proportionnel à la variation de température du corps par unité de temps, ou proportionnel au temps de changement de la chaleur intrinsèque du corps (lorsqu'il y a évaporation).

- R + C correspond aux échanges radiatifs et convectifs de la peau avec l'environnement.

$$R + C = h_s (T_c - T_a)$$

où: h, coefficient d'échange surfacique

h = h_r + h_c avec h_r coefficient d'échange

UNITÉ PÉDAGOGIQUE

D'ARCHITECTURE N° 3

BIBLIOTHÈQUE

2, av. de Paris, 78000 VERSAILLES

II EXPRESSION DE L'EQUATION DU BILAN THERMODYNAMIQUE

- M est généralement exprimé en Met; 1 Met vaut 58,2 W/m².

Valeurs de M suivant les niveaux d'activité:

RESTING			Vehicle driving	
Sleeping	0.7		Car	1.5
Reclining	0.8		Motorcycle	2.0
Seated, quiet	1.0		Heavy vehicle	3.2
Standing, relaxed	1.2		Aircraft flying routine	1.4
WALKING			Instrument landing	1.8
On the level	mph		Combat flying	2.4
	2	2.0	DOMESTIC WORK, WOMEN	
	3	2.6	House cleaning	2.0 to 3.4
	4	3.8	Cooking	1.6 to 2.0
MISCELLANEOUS OCCUPATIONS			Washing by hand and ironing	2.0 to 3.6
Bakery (e.g., cleaning tins, packing boxes)	1.4 to 2.0		Shopping	1.4 to 1.8
Brewery (e.g., filling bottles, loading beer boxes onto belt)	1.2 to 2.4		OFFICE WORK	
Carpentry			Typing	1.2 to 1.4
Machine sawing, table	1.8 to 2.2		Miscellaneous office work	1.1 to 1.3
Sawing by hand	4.0 to 4.8		Drafting	1.1 to 1.3
Planning by hand	5.6 to 6.4		LEISURE ACTIVITIES	
Foundry Work			Stream fishing	1.2 to 2.0
Using a pneumatic hammer	3.0 to 3.4		Calisthenics exercise	3.0 to 4.0
Tending furnaces	5.0 to 7.0		Dancing, social	2.4 to 4.4
Garage Work (e.g., replacing tires, raising cars by jack)	2.2 to 3.0		Tennis, singles	3.6 to 4.6
General Laboratory Work	1.4 to 1.8		Squash, singles	5.0 to 7.2
Machine Work			Basketball, half court, intramural	5.0 to 7.6
Light (e.g., electrical industry)	2.0 to 2.4		Wrestling-competitive or intensive	7.0 to 8.7
Heavy (e.g., steel work)	3.5 to 4.5		Golf, swinging and walking	1.4 to 2.6
Shop Assistant	2.0		Golf, swinging and golf cart	1.4 to 1.8
Teacher	1.6			
Watch repairer, seated	1.1			

*Ranges are for activities which may vary considerably from one place of work or leisure to another or when performed by different people. 1 met = 58.2 W/m²; 50 kcal/hr · m²; 13.4 Btu/h · ft². Some activities are difficult to evaluate because of differences in exercise intensity and body position.

(9)

- W est généralement exprimé par l'intermédiaire d'une efficacité mécanique $\xi = \frac{W}{M}$. Elle est habituellement estimée égale à 0. La marche sur une pente de 5% à une vitesse de 3 à 6 km/h entraîne $\xi = 0,1$; sur une pente de 15 à 25%, $\xi = 0,2$.

- R + C correspond aux échanges radiatifs et convectifs de la peau avec l'environnement.

$$R + C = h \cdot (t_v - t_o)$$

où: h, coefficient d'échange superficiel global,

$h = h_r + h_c$ avec h_r coefficient d'échange superficiel par rayon-

La résistance effective globale de l'habillement a alors pour valeur:

nement à grandes longueurs d'onde et h_c coefficient d'échange superficiel par convection,

t_v , température moyenne des vêtements,

$$t_o, \text{ température opérative, } t_o = \frac{h_r t_r + h_c t_a}{h_r + h_c}$$

avec t_r température radiante moyenne de l'environnement (valeur barycentrique des températures de surface

de l'environnement), et t_a température de l'air.

De la même manière, en tenant compte de la capacité thermique intrinsèque de l'habillement V_v et l'efficacité thermique

que En se référant à la température de la peau t_p , on a:

$$R + C = h (t_p - t_o) F_{ve}$$

où: F_{ve} efficacité thermique effective des vêtements a pour valeur:

$$F_{ve} = \frac{h_{ve}}{h + h_{ve}}, \text{ } h_{ve} \text{ étant la conductance effective des vêtements.}$$

Le calcul de $R + C$ n'est donc pas compliqué, mais fait appel à toute une suite de relations donnant les différents coefficients intervenant. On exprime souvent les caractéristiques thermiques des vêtements sous la forme de résistance effective: $I_{ve} = \frac{1}{h_{ve}}$ (effective, c'est à dire sur le corps), ou de résistance intrinsèque: I_v ; l'unité utilisée est le "clo":
 $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{°K/W}$

Pour les différentes parties de l'habillement, on a pu déterminer des résistances intrinsèques:

Individual Insulation Values of Men's and Women's Garments			
MEN		WOMEN	
Garment	I_{ch} clo	Garment	I_{ch} clo
Cool socks	0.03	Bras and panties	0.05
Warm socks	0.04	Pantihose	0.01
Briefs	0.05	Girdle	0.04
T-shirt	0.09	Half slip	0.13
Undershirt	0.06	Full slip	0.19
Woven s.s. shirt	0.19	Cool dress	0.17
Woven l.s. shirt	0.29	Warm dress	0.63
Cool s.s. knit shirt	0.22	Warm l.s. blouse	0.29
Warm s.s. knit shirt	0.25	Warm skirt	0.22
Cool l.s. knit shirt	0.14	Cool l.s. blouse	0.20
Warm l.s. sweater	0.37	Cool slacks	0.26
Warm jacket	0.49	Warm slacks	0.44
Cool trousers	0.26	Cool sleeveless sweater	0.17
Warm trousers	0.32	Warm l.s. sweater	0.37
Shoes	0.04	Cool s.s. sweater	0.17

(9)

La résistance effective globale de l'habillement a alors pour valeur:

$$I_{ve} = 0,494 \sum_i I_{vi} + 0,077 \text{ (hommes)}$$

et

$$I_{ve} = 0,524 \sum_i I_{vi} = 0,034 \text{ (femmes)}$$

$$\text{et } I_v = 1,16 I_{ve}$$

De la même manière qu'on distingue I_{ve} et I_v , on distingue l'efficacité thermique intrinsèque de l'habillement F_v et l'efficacité thermique effective F_{ve} : $F_{ve} = f_v \cdot F_v$ avec $f_v = 1 + 0,2 I_v$.

En prenant pour valeurs de h ou $1/h = I_a$, la plus faible valeur donnée par les deux tableaux suivants, on peut calculer F_{ve} et F_v :

$$F_{ve} = \frac{1}{1 + 0,155 \frac{I_{ve}}{I_a}}$$

et

$$F_v = \frac{1}{1 + 0,155 f_v \frac{I_v}{I_a}}$$

ACTIVITE (en Met)	h_c (en W / m ² .°K)	I_a (en clo)
0,85	3,1	0,83
1,1	3,3	0,80
2,0	6,0	0,60
3,0	7,7	0,52

A (R + C), il faut ajouter un autre échange convectif dû à la respiration, et qui a pour valeur:

$$C_{res} = 0,0014 M (34 - t_a) \text{ en W / m}^2$$

(R + C + C_{res}) correspond à des échanges "secs". Les chaleurs concernées sont appelées "sensibles" par opposition aux chaleurs "latentes" correspondant aux transferts d'humidité entre le corps et l'environnement.

Les déperditions par évaporation E sont le fait de la respiration E_{res} et de la perspiration (par la peau) E_p .

$$E_{res} = 0,0023 M (44 - \varphi P_{vs}) \quad \text{en W / m}^2$$

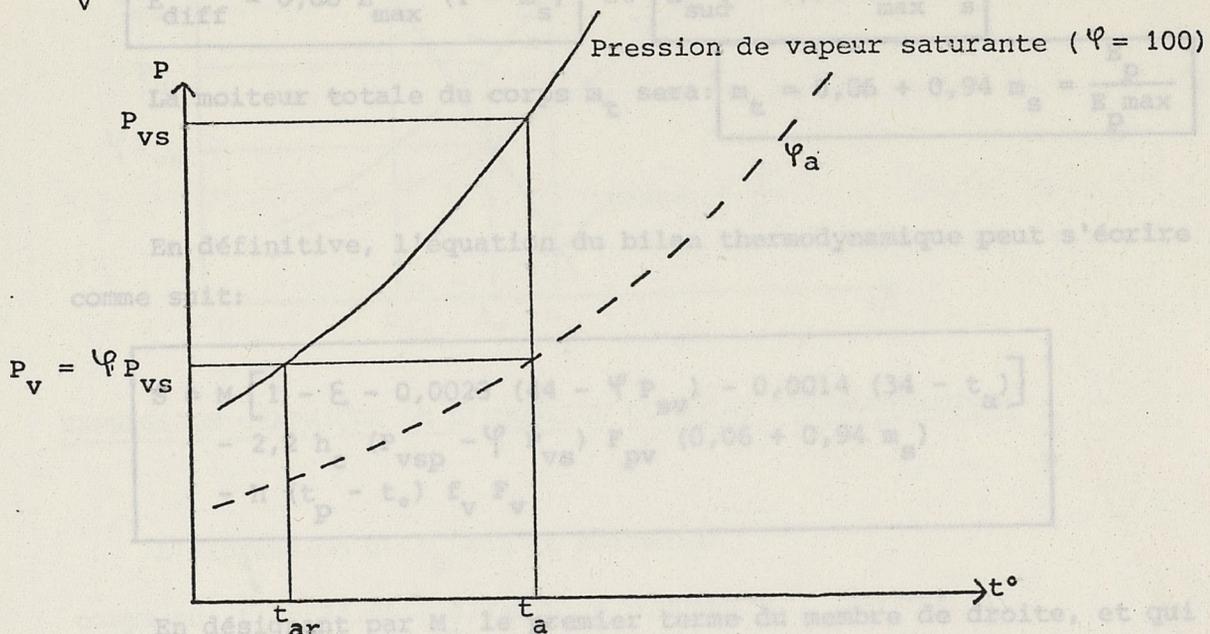
avec φ humidité relative de l'air (en %)

P_{vs} pression de vapeur saturante à la température de l'air (t_a), exprimée en mm de mercure (mm Hg).

$\varphi = \frac{P_v}{P_{sv}}$ avec P_v pression partielle de vapeur d'eau à t_a , c'est à dire:

$$\varphi P_{sv} = P_v$$

Si m_s est la moiteur de la peau due à la sudation (rapport de la surf. La température de rosée t_{ar} est la température qui, pour un même P_v a un φ de 100% (cf le diagramme ci-dessous)



Lorsque la peau est complètement humide, on a une valeur maximale

de E_p :

$$E_p \max = 2,2 h_c (P_{vsp} - \varphi P_{vs}) F_{pv}$$

où: 2,2 °C / mm Hg correspond à la relation de Lewis traduisant au niveau de la mer le rapport h_e / h_c ,

P_{vsp} : pression de vapeur saturante à la température de la peau (t_p),

F_{pv} : efficacité de perméabilité des vêtements

$$F_{pv} = \frac{1}{1 + 0,143 h_c I_{ve}}$$

(lorsque les vêtements sont complètement imperméables, $F_{pv} = 0$)

Lorsque la peau n'est pas complètement humide, $E_p = E_{diff} + E_{sud}$
 avec: E_{diff} évaporation par diffusion sans aucune sudation,
 E_{sud} évaporation par sudation régulée.

Si m_s est la moiteur de la peau due à la sudation (rapport de la surface de peau siège de la sudation par la surface du corps), on a:

$$E_{diff} = 0,06 E_{max} (1 - m_s) \quad \text{et} \quad E_{sud} = 0,94 E_{max} m_s$$

La moiteur totale du corps m_t sera: $m_t = 0,06 + 0,94 m_s = \frac{E_p}{E_{max}}$

En définitive, l'équation du bilan thermodynamique peut s'écrire comme suit:

$$S = M \left[1 - \varepsilon - 0,0023 (44 - \varphi P_{sv}) - 0,0014 (34 - t_a) \right] - 2,2 h_c (P_{vsp} - \varphi P_{vs}) F_{pv} (0,06 + 0,94 m_s) - h (t_p - t_o) f_v F_v$$

En désignant par M_p le premier terme du membre de droite, et qui correspond à la puissance métabolique parvenant à la peau, on obtient:

$$S = M_p - 2,2 m_t h_c (P_{vsp} - \varphi P_{vs}) F_{pv} - h (t_p - t_o) f_v F_v$$

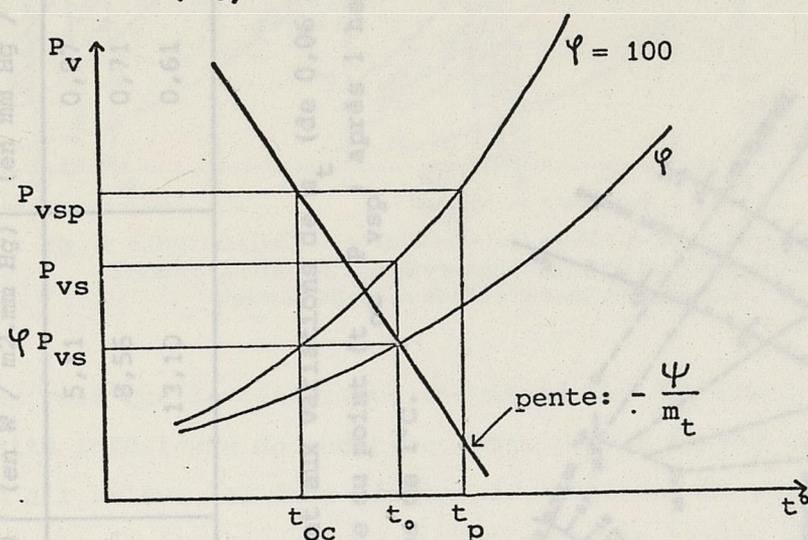
On peut exprimer différemment cette équation: en désignant par Ψ le rapport $\frac{h f_v F_v}{2,2 h_c F_{pv}}$, et par t_{oc} la température opérative de l'environnement dans lequel toutes les déperditions du corps sont réalisées par (R + C), c'est à dire:

$$t_{oc} = t_p - \frac{M_p - S}{h f_v F_v}$$

On peut alors écrire:

$$P_{vs} - P_{vsp} = - \frac{\Psi}{m_t} (t_o - t_{oc})$$

En prenant un repère (t, P_v) , le bilan thermodynamique des échanges est donc représenté par un ensemble de droites de pente $-\Psi/m_t$, passant par le point (t_{oc}, P_{vsp}) . Le point $(t_o, \Psi P_{vs})$ caractérise l'environnement. Ψ caractérise l'effet combiné des vêtements, du mouvement de l'air et de la pression totale P_t (lorsqu'on n'est pas au niveau de la mer, il faut multiplier la relation de Lewis par $(\frac{760}{P_t})^{0,45}$) (cf. le diagramme ci-dessous).



EXPRESSION GRAPHIQUE DE L'EQUATION DU BILAN THERMODYNAMIQUE

L'expression de t_p est la suivante:

corps nu: $t_p = 24,85 + 0,332 t_o - 0,00165 t_o^2$ (en °C)

corps habillé: $t_p = 25,8 + 0,267 t_o$ (en °C)

Selon FANGER P.O.:

$$t_p = 35,7 - 0,0372 M \quad (\text{en } ^\circ\text{C si } M \text{ en } W / m^2)$$

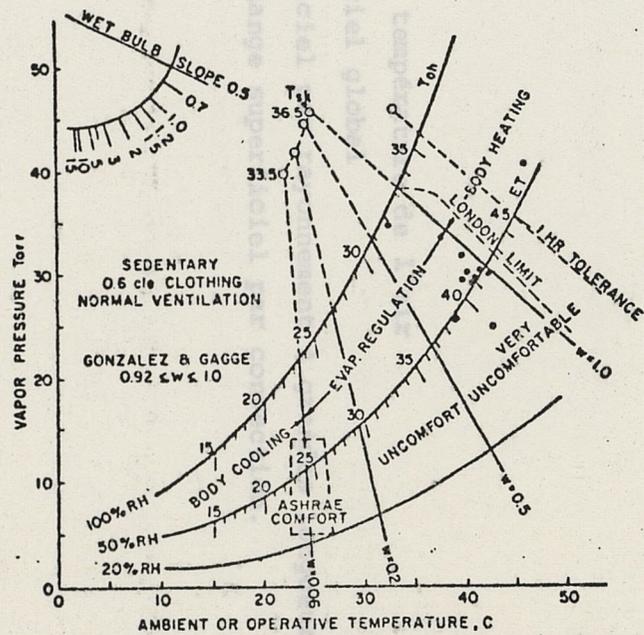
Ainsi, il est possible de définir des ambiances créant des confort relatifs équivalents pour un type d'activité et d'habillemnt donné.

Les figures suivantes correspondent aux caractéristiques moyennes suivantes:

M (Met)	t_p (en °C)	I_v (en clo)	h_c	$h F_v$	$h_e F_{pv}$ (en W / m ² .mm Hg)	Ψ (en mm Hg / °K)	t_{oc} (en °C)	t_s (en °C)
			(en W / m ² .°K)					
1	34,0 à 36,5	0,6	2,9	4,45	5,11	0,87	22,2 à 24,7	8,3
2	33,5 à 36,8	0,4	5,0	6,05	8,56	0,71	16,2 à 19,5	6,1
3	33,0 à 37,0	0,3	8,0	7,98	13,10	0,61	13,2 à 17,2	4,6

Les plages de températures correspondent aux variations de m_t (de 0,06 à 1).

t_s correspond aux variations d'abscisse du point (t_{oc}, P_{vsp}) après 1 heure d'exposition pour une augmentation de la température du corps de 1°C.



*The predicted upper limit of evaporative regulation is compared with MacPherson's London Limit and experimental data observed in Ref 15.

(9) Fig. a Comfort and Heat Tolerance of a Sedentary Subject*

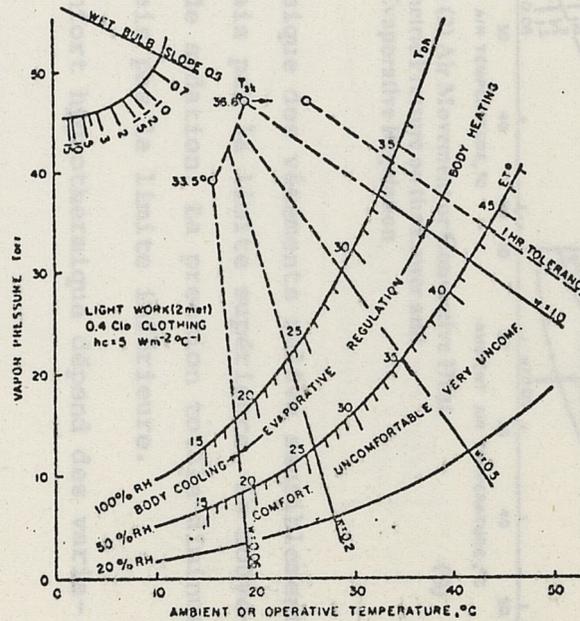


Fig. b Comfort and Heat Tolerance during Light Work (2 met)¹⁵

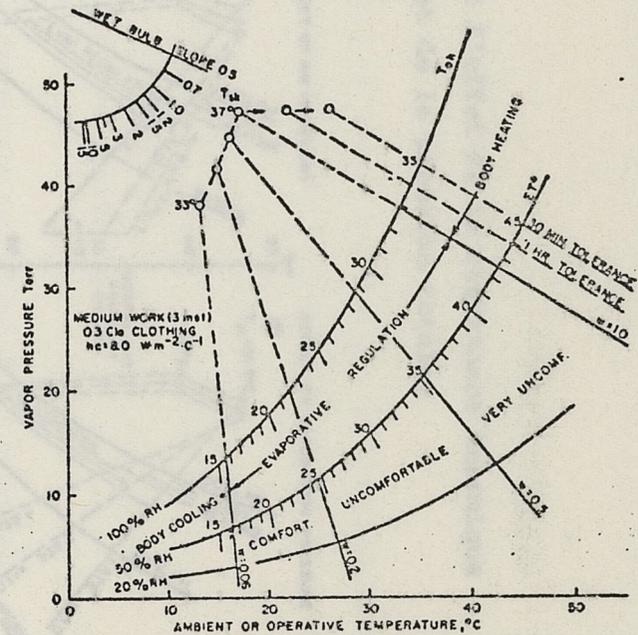


Fig. c Comfort and Heat Tolerance during Medium Activity (3 met)¹⁵

Les figures suivantes montrent l'effet de la résistance thermique des vêtements, du mouvement d'air et de la pression totale:

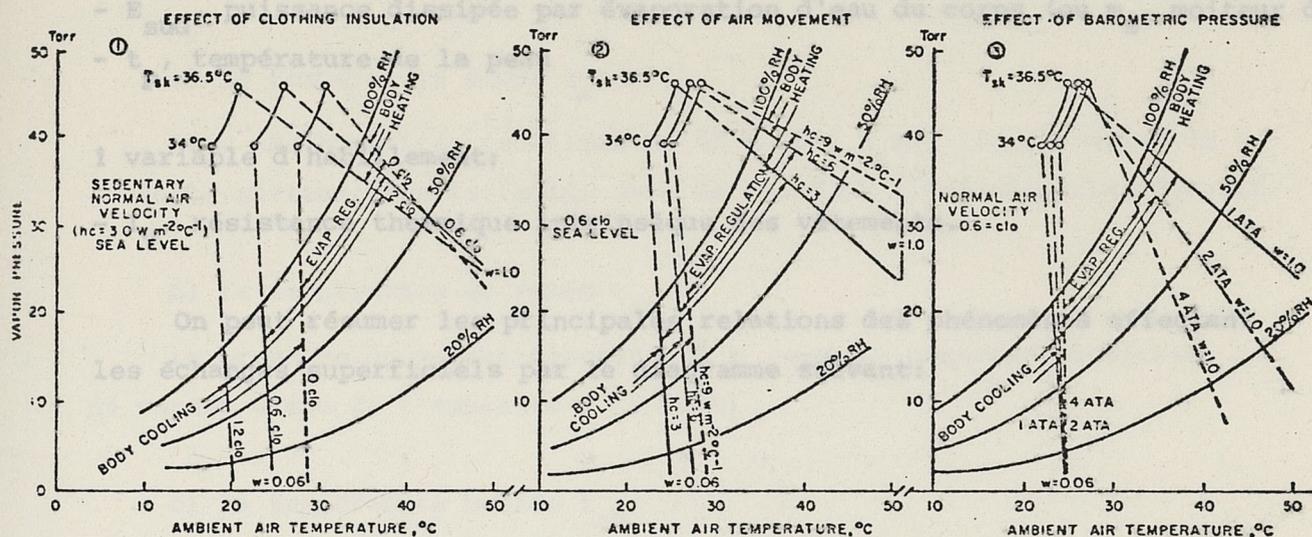


Fig. d. Effect of: (1) Clothing Insulation; (2) Air Movement or Convective Heat Transfer Coefficient; and (3) Barometric Pressure on the Lower and Upper Limits of Zone of Evaporative Regulation. (9)

On voit que la résistance thermique des vêtements relève sensiblement la limite inférieure de sudation, mais pas la limite supérieure. Le mouvement d'air relève les deux limites de sudation. La pression totale diminue notablement la limite supérieure, mais pas la limite inférieure.

En définitive, la notion de confort hygrothermique dépend des variables suivantes:

4 variables d'environnement:

- t_a , température de l'air
- t_{ar} , température de rosée
- ou, humidité relative
- t_o , température opérative
- ou t_r , température radiante, et t_a , température de l'air
- h , coefficient d'échange superficiel global
- ou h_r , coefficient d'échange superficiel par rayonnement à grandes longueurs d'ondes, et h_c , coefficient d'échange superficiel par convection.

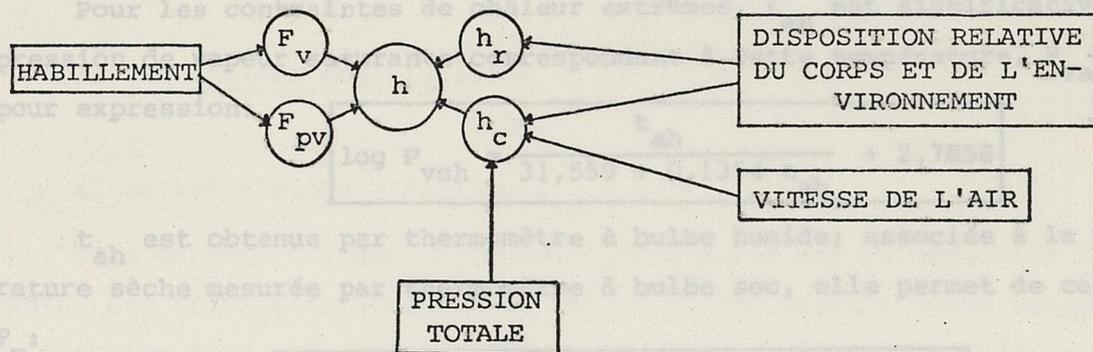
4 variables physiologiques:

- M , puissance métabolique
- W , puissance dissipée par le travail du corps (ou $\epsilon = \frac{W}{M}$, efficacité mécanique)
- E_{sud} , puissance dissipée par évaporation d'eau du corps (ou m_s , moiteur de la peau)
- t_p , température de la peau

1 variable d'habillement:

- I_v , résistance thermique intrinsèque des vêtements.

On peut résumer les principales relations des phénomènes affectant les échanges superficiels par le diagramme suivant:



On déduit facilement de ces deux relations

d) l'humidité relative

Il est nécessaire de l'associer à t_a .

2) Les indices dérivés:

a) la température radiante moyenne t_r

Elle correspond à la température d'une ambiance qui échange avec le corps la puissance R par rayonnement.

III LES INDICES D'ENVIRONNEMENT POSSIBLES

b) la température opérative t_o :

1) les indices directs:

a) la température sèche t_a :

Pour des humidités relatives de 40 à 60%, t_a est significative du confort, surtout vers le froid; vers le chaud, t_a n'est plus significatif.

b) la température de rosée t_{ar} :

La pression de vapeur saturante à t_{ar} est la pression partielle de vapeur d'eau de l'ambiance ($\Psi = 100\%$)

c) la température humide t_{ah} :

Pour les contraintes de chaleur extrêmes, t_{ah} est significative; la pression de vapeur saturante correspondant à cette température, P_{vsh} , a pour expression:

$$\log P_{vsh} = \frac{t_{ah}}{31,559 + 0,1354 t_{ah}} + 2,7858$$

t_{ah} est obtenue par thermomètre à bulbe humide; associée à la température sèche mesurée par thermomètre à bulbe sec, elle permet de calculer

P_v :

$$P_v = P_{vsh} - 6,491 (t_a - t_{ah}) (P_t - P_{vsh})$$

On déduit facilement de ces deux relations $= \frac{P_v}{P_{vs}}$

d) l'humidité relative :

Il est nécessaire de l'associer à t_a .

2) Les indices dérivés:

a) la température radiante moyenne t_r :

Elle correspond à la température d'une ambiance qui échange avec le corps la puissance R par rayonnement.

b) la température opérative t_o :

Elle correspond à la température d'une ambiance qui échange avec le corps la puissance $(R + C)$.

c) la température opérative humide t_{oh} :

Elle correspond à la température d'une ambiance à humidité relative $\varphi = 100\%$ qui échange avec le corps la puissance $(R + C + E_p)$

$$t_{oh} = \frac{A \cdot t_r + B \cdot t_a + C \cdot t_{ar}}{A + B + C}$$

avec: $A = h_r \cdot F_v$

$B = h_c \cdot F_v$

$C = 3,08 m_t \cdot h_c \cdot F_{pv}$

3) les indices empiriques:

a) la température effective t_{eff} :

Elle caractérise des ambiances équivalentes par la sensation résultante. Les travaux de Houghton et Yaglou (1923) donnent cette température en fonction de t_a , t_{ah} et v (vitesse de l'air) (cf. fig. page 44). Elle surestime l'effet de l'humidité et ne tient pas pleinement compte de la vitesse de l'air dans les conditions chaudes et humides.

b) la température résultante de séjour ou de passage:

Elle caractérise des ambiances équivalentes par la sensation résultante, comme la t_{eff} ; mais elle est fonction de t_{rs} , t_a et v . (cf. fig. page 45)

c) la température résultante de pied t_{pr} :

$$t_{pr} = 0,62 t_{rs} + 0,22 t_{ms} + 0,016 t_{ss}$$

avec: t_{ms} température moyenne du sol

t_{ss} température superficielle du sol sous le pied.

Elle montre le faible rôle des échanges du corps avec l'environnement par conduction. On doit avoir $t_{pr} < 21,2^\circ\text{C}$.

TEMPERATURE EFFECTIVE

(d'après MISSENERD)

TEMPERATURE EFFECTIVE

Température résultante
lorsque les parois sont à la même température que l'air

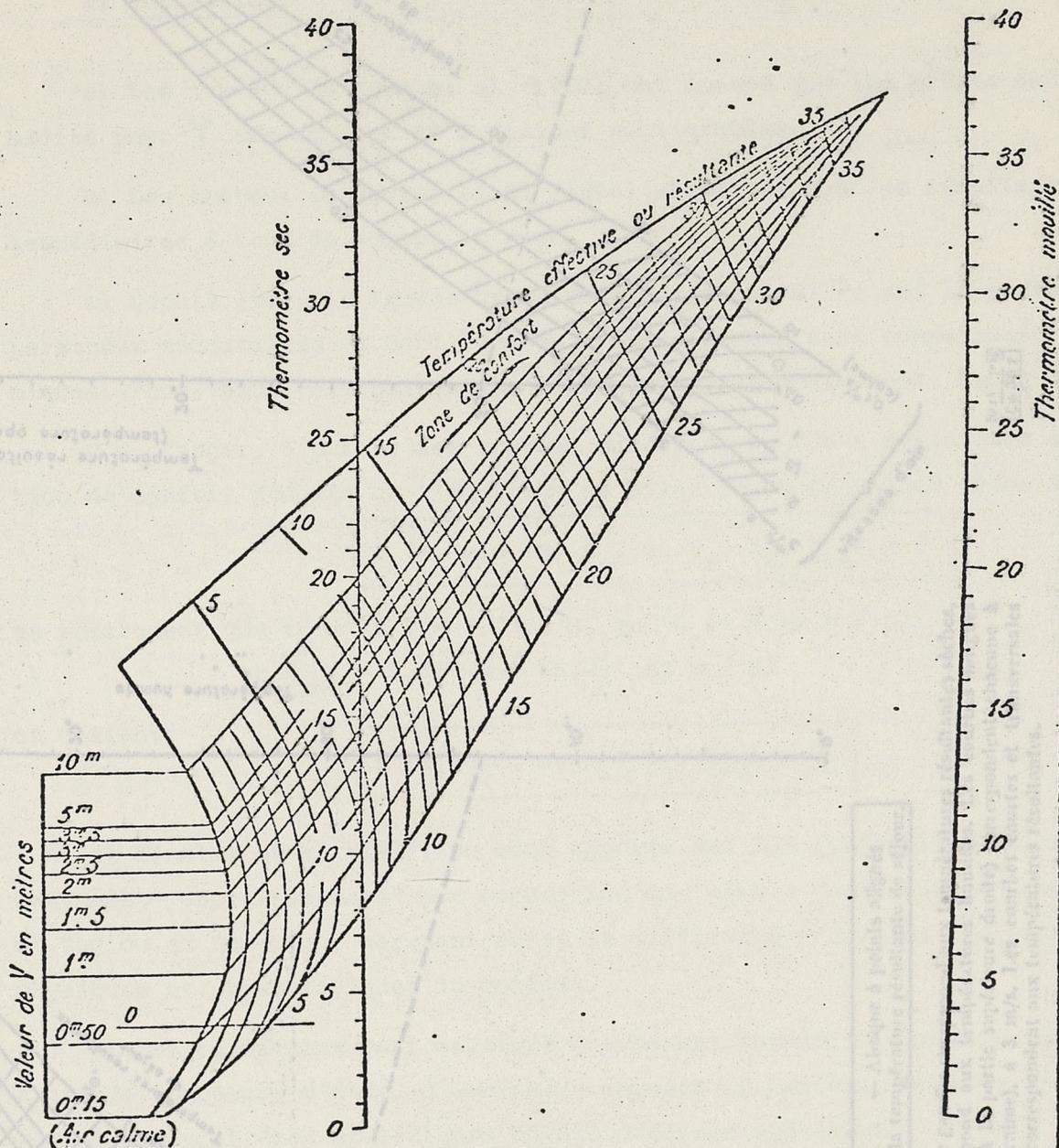


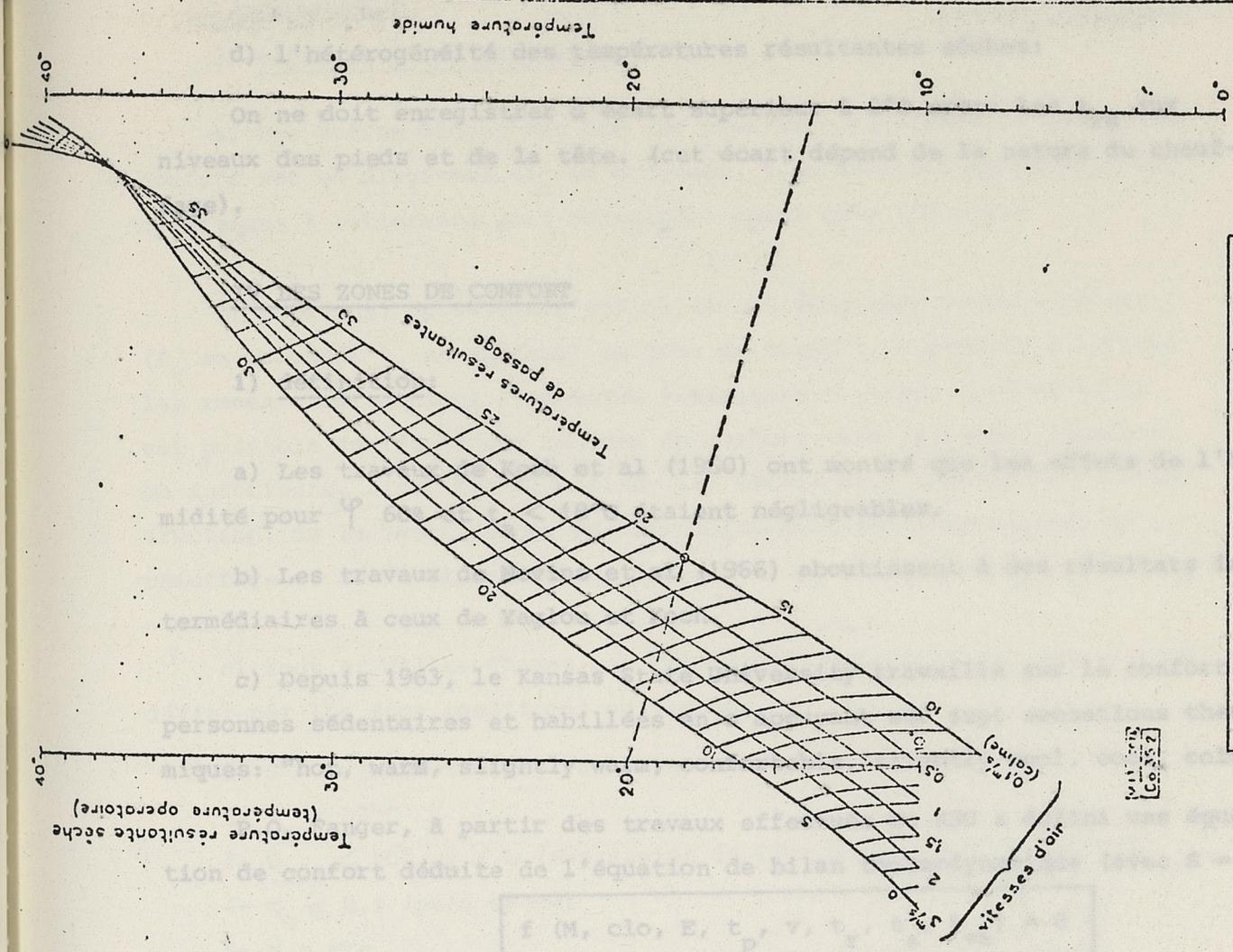
FIG. 1. — Abaque pour le calcul de la température effective d'une atmosphère et de la température résultante d'un milieu.

Usage de l'abaque. La droite joignant les points représentatifs de la température sèche (T_s) et de la température mouillée (T_m) rencontre la courbe de vitesse V , au point représentatif de la température effective (T_e) ou résultante (T_r).
Si les parois sont à la même température que l'air la température résultante T_r est égale à la température effective T_e .

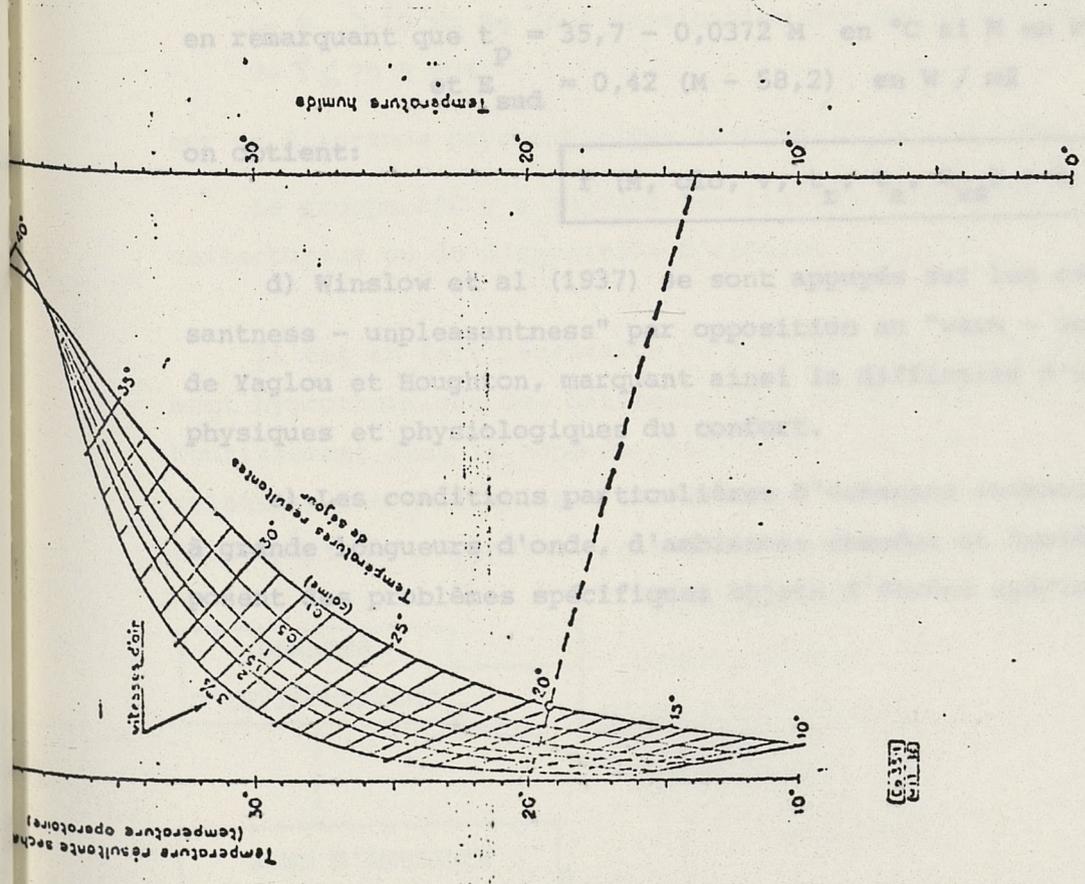
Exemple : $R = T_s = 18^\circ$, $T_m = 15^\circ$, $V = 1$ m, $T_r = T_e = 14^\circ,5$.

Expression approchée de T_m en fonction de T_s et du degré hygrométrique :

$$T_m = T_s - (1 - e) (1,5 + 0,35 T_s)$$



Abaque à points alignés pour le calcul de la température résultante de passage



Abaque à points alignés pour le calcul de la température résultante de séjour

Mode d'emploi : L'échelle rectiligne gauche correspond aux températures résultantes sèches, l'échelle rectiligne droite correspond aux températures humides. Les courbes longues (de la partie inférieure gauche à la partie supérieure droite) correspondent chacune à une vitesse d'air : de 0,1 m/s (calme), à 3 m/s. Les courbes courtes et transversales aux courbes longues correspondent aux températures résultantes.

Exemple : Température résultante sèche de 20 °C, air calme, degré hygrométrique de 50 %. Température humide (d'après le diagramme psychrométrique = 13,9 °C). Température résultante (point cerclé : 19,2 °C). (D'après MISSENARD)

d) l'hétérogénéité des températures résultantes sèches:

On ne doit enregistrer d'écart supérieur à 2°C entre les t_{rs} aux niveaux des pieds et de la tête. (cet écart dépend de la nature du chauffage).

IV LES ZONES DE CONFORT

1) définition:

a) Les travaux de Koch et al (1960) ont montré que les effets de l'humidité pour φ 60% et $t_a < 18^\circ\text{C}$ étaient négligeables.

b) Les travaux de Nevins et al (1966) aboutissent à des résultats intermédiaires à ceux de Yaglou et Koch.

c) Depuis 1963, le Kansas State University travaille sur le confort de personnes sédentaires et habillées en s'appuyant sur sept sensations thermiques: "hot, warm, slightly warm, confortable, slightly cool, cool, cold".

P.O. Fanger, à partir des travaux effectués au KSU a défini une équation de confort déduite de l'équation de bilan thermodynamique (avec $S = 0$):

$$f(M, clo, E, t_p, v, t_r, t_a, P_{vs}) = 0$$

en remarquant que $t_p = 35,7 - 0,0372 M$ en °C si M en W / m²

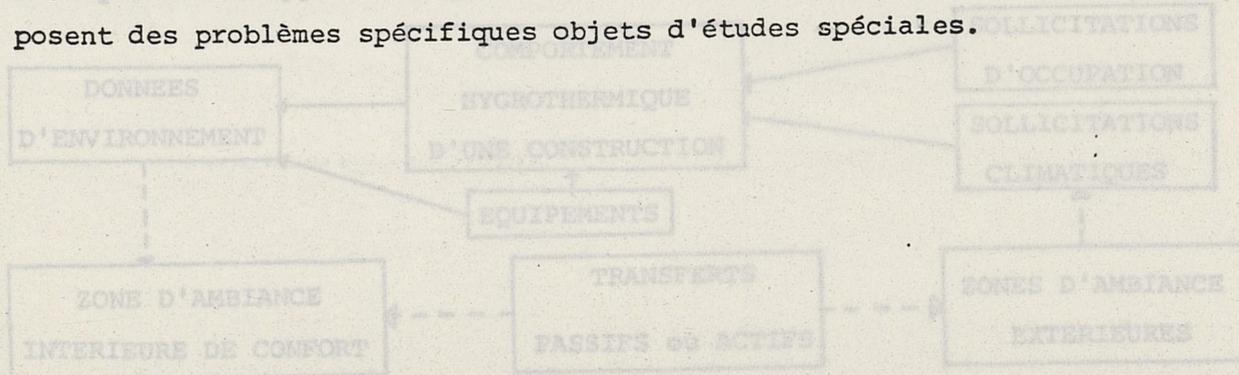
et $E_{sud} = 0,42 (M - 58,2)$ en W / m²

on obtient:

$$f(M, clo, v, t_r, t_a, P_{vs}) = 0$$

d) Winslow et al (1937) se sont appuyés sur les catégories: "pleasantness - unpleasantness" par opposition au "warm - comfortable - cool" de Yaglou et Houghton, marquant ainsi la difficulté d'unifier les bases physiques et physiologiques du confort.

e) Les conditions particulières d'échanges intensifs par rayonnement à grande longueurs d'onde, d'ambiances chaudes et humides, ou très froides posent des problèmes spécifiques objets d'études spéciales.



2) représentation graphique:

a) Les frères Olgyay ont été les premiers à retranscrire la zone de confort sur un diagramme (t_a en ordonnée, φ en abscisse) et ensuite les conditions à satisfaire pour réintégrer cette zone (cf. p. 48)

b) B. Givoni, après avoir défini sur un diagramme psychométrique (P_v en ordonnée, t_o en abscisse) la zone de confort, a cherché à définir les zones caractérisant l'ambiance extérieure à partir desquelles il est possible de réintégrer la zone de confort caractérisant l'ambiance intérieure. Ainsi a-t-il estimé les effets de l'inertie de la construction, de la ventilation, du refroidissement par évaporation, du chauffage et de la climatisation (cf. p. 49)

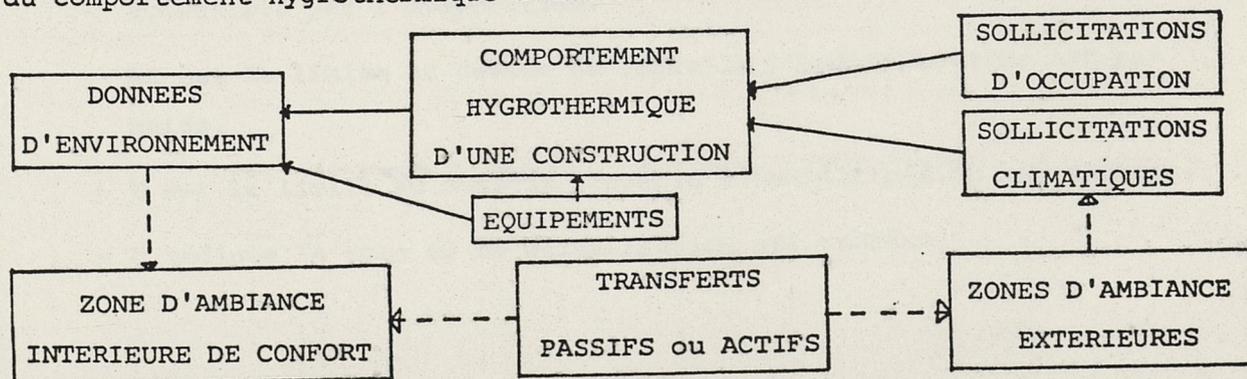
c) Vogt et Miller-Chagas ont retranscrit graphiquement le polygone défini par les sept conditions suivantes:

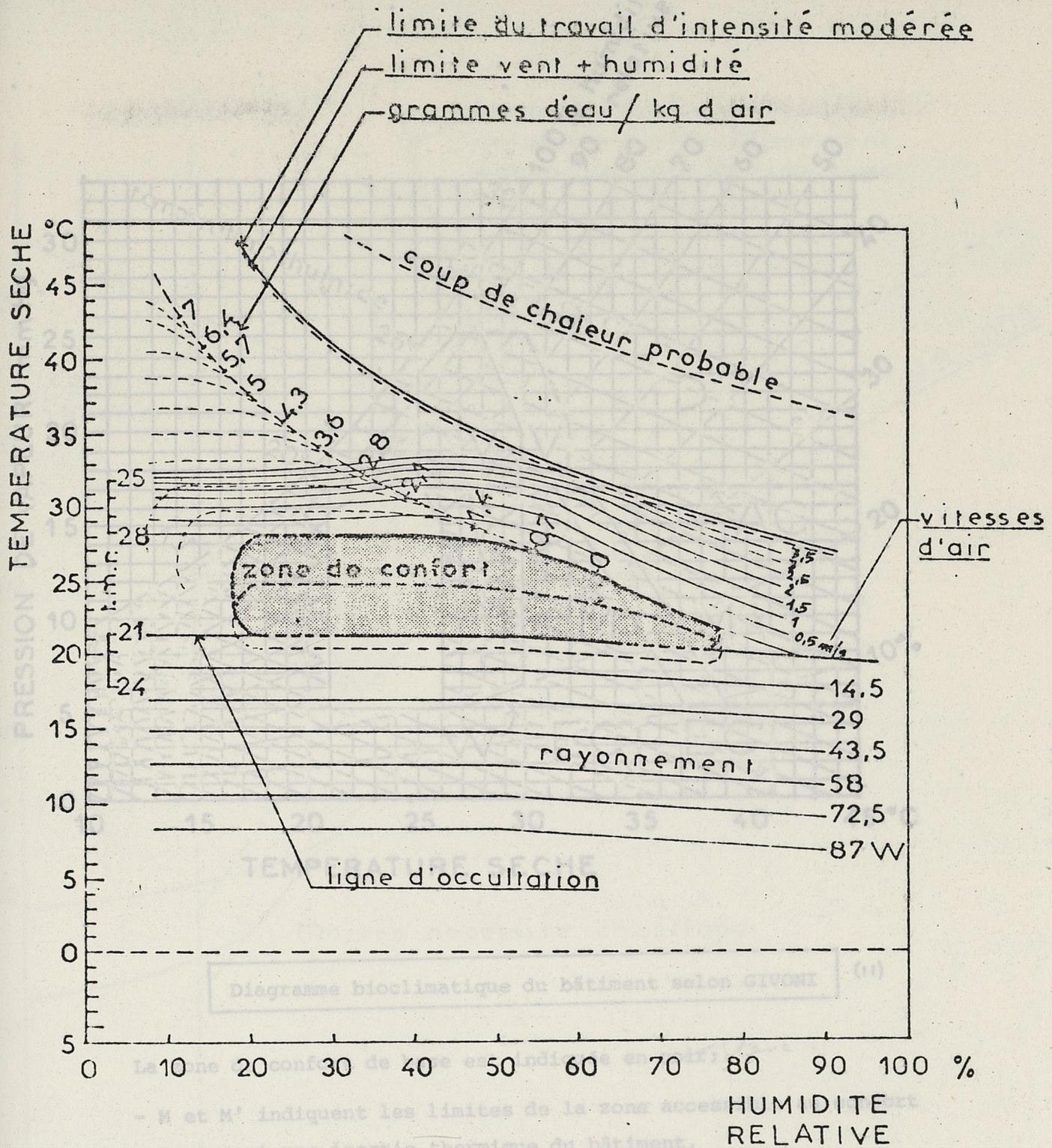
- 1- $S = 0$ (homéothermie centrale)
- 2- $t_p = 33^\circ\text{C}$
- 3- $E_{\text{sud}} \leq 100 \text{ gr / h}$ (expression du flux massique de sudation)
- 4- $m_s \leq 0,1$ (peau sèche)
- 5- $M = \text{cte}$
- 6- $P_v \geq 10 \text{ mm Hg}$ (non dessiccation des muqueuses de la bouche)
- 7- $\varphi \leq 75 \text{ à } 80\%$

sur un diagramme psychométrique inversé (P_v en abscisse, t_o en ordonnée)

Le groupe ABC y a rajouté les limites d'influence de facteurs architecturaux ou de dispositifs d'appoint (cf. p. 50)

Il est en fait nécessaire de préciser les mécanismes du comportement hygrothermique des bâtiments pour mieux juger des possibilités d'aboutissement dans la zone de confort. Le diagramme ci-dessous résume les relations entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure au travers du comportement hygrothermique d'une construction.





Conditions à satisfaire pour réintégrer la zone de confort selon OLGAY. (11)

- M et M' indiquent les limites de la zone accessible moyennant une inertie thermique du bâtiment,
- V et V' indiquent les limites de la zone accessible au moyen de la ventilation,
- EC et EC' indiquent les limites de la zone accessible par l'évaporation,
- AC est la limite au dessus de laquelle l'humidification est requise,
- W est la limite au dessous laquelle l'humidification est requise,
- D indique la zone où la climatisation est requise.

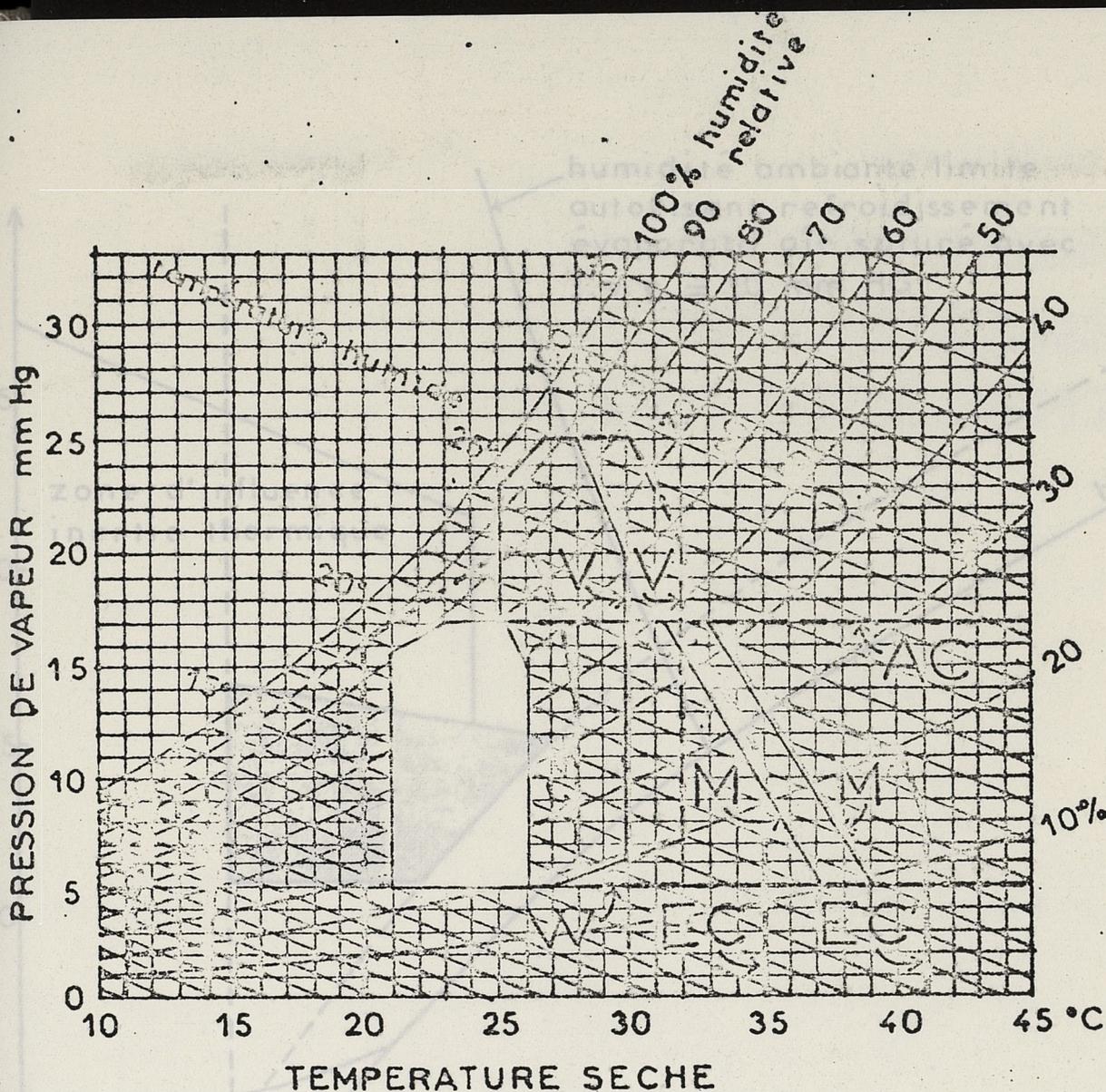
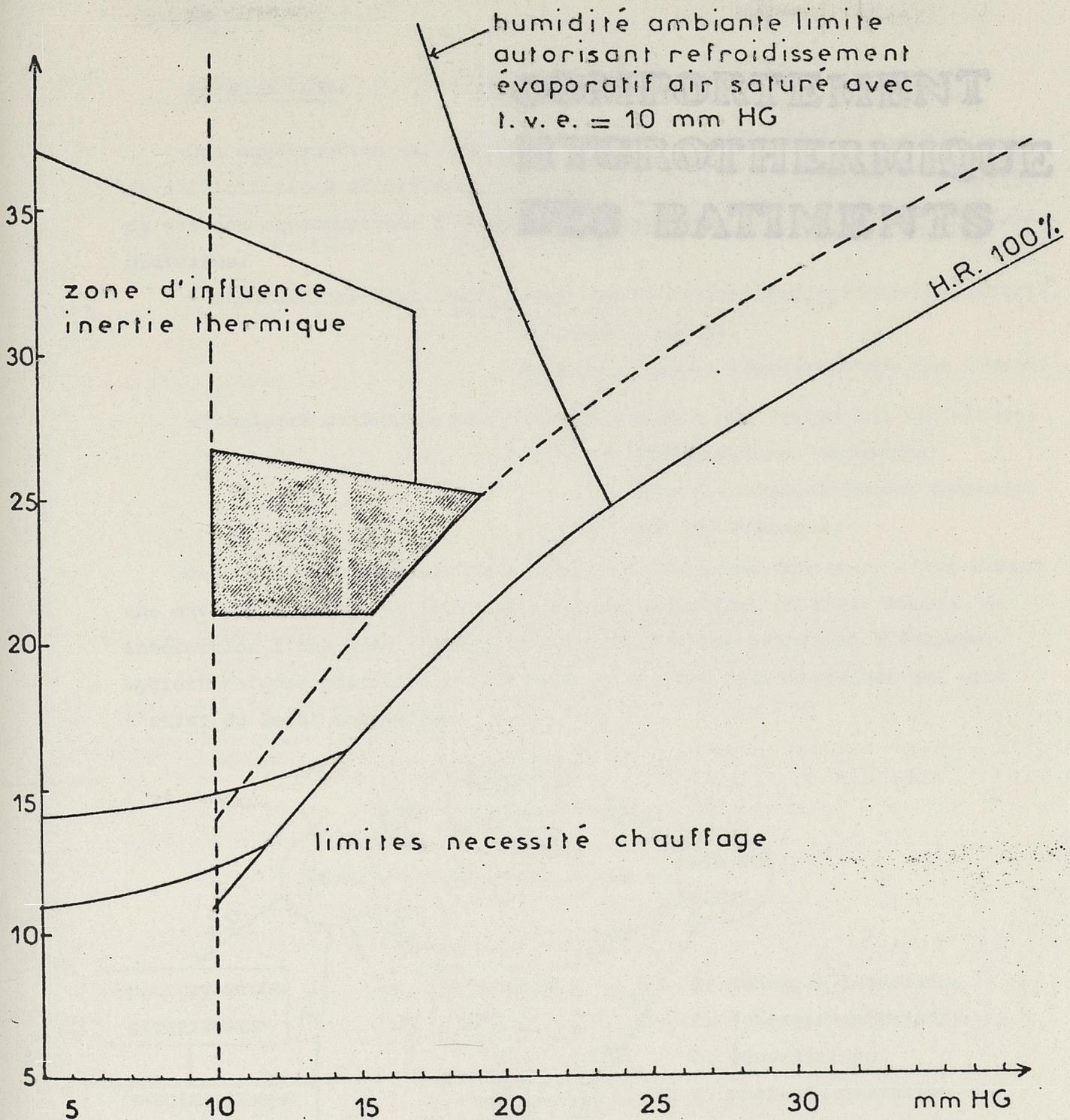


Diagramme bioclimatique du bâtiment selon GIVONI (11)

- La zone de confort de base est indiquée en noir; blanc.
- M et M' indiquent les limites de la zone accessible au confort moyennant une inertie thermique du bâtiment,
 - V et V' indiquent les limites de la zone où le confort est accessible au moyen de la ventilation,
 - EC et EC' indiquent les limites de la zone où le confort est accessible par l'évaporation,
 - AC est la limite au dessus de laquelle l'humidification est requise,
 - W est la limite au dessous laquelle l'humidification est requise,
 - D indique la zone où la climatisation est requise.



Limites d'influence de facteurs architecturaux ou de dispositifs d'appoint d'après le groupe ABC.

(ii)

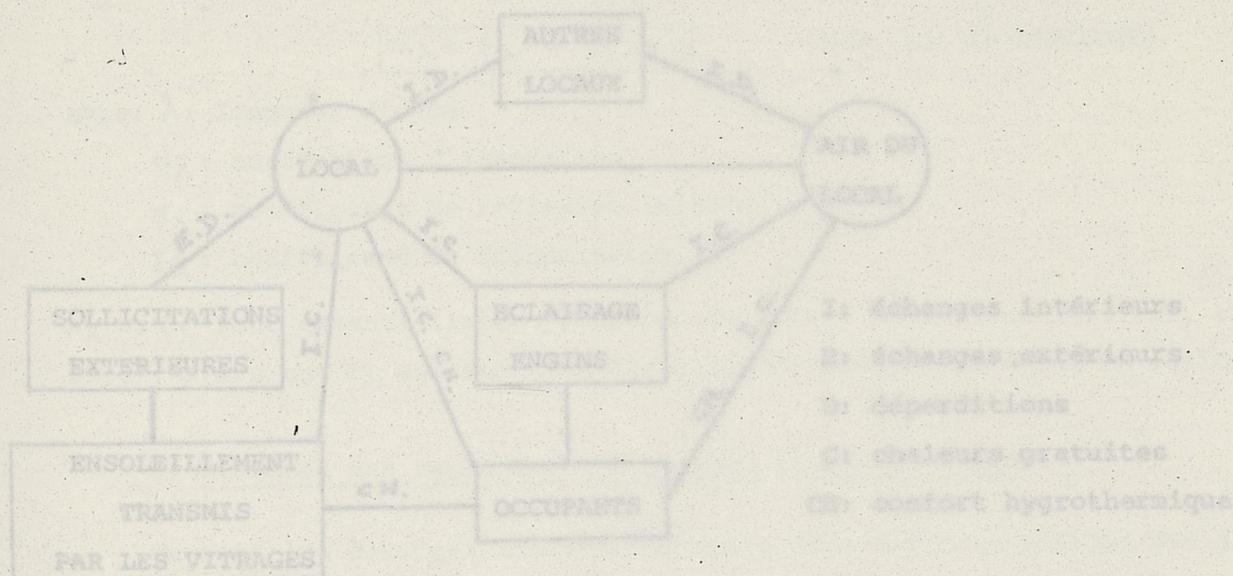
INTRODUCTION

COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE DES BATIMENTS

Une construction est l'objet de sollicitations extérieures et de vue des consommations d'énergie gratuites:

- déperditions d'un local: dues aux sollicitations extérieures (soleil, vent, pluie et vent).
- chaleurs gratuites pour un local: dues à son occupation (éclairage, moteurs divers, occupants) dues à l'ensoleillement transmis par les vitrages.

Un local doit toujours être considéré comme un système, c'est-à-dire une enveloppe contenant (et conditionnant en partie) de l'air humide, en interaction l'une avec l'autre. D'où les multiples relations d'échanges hygrothermiques possibles participant au confort hygrothermique qui sont l'effet du local sollicité:



* Notons que les apports déphasés dus à l'ensoleillement des parois opaques sont considérés comme des déperditions négatives.

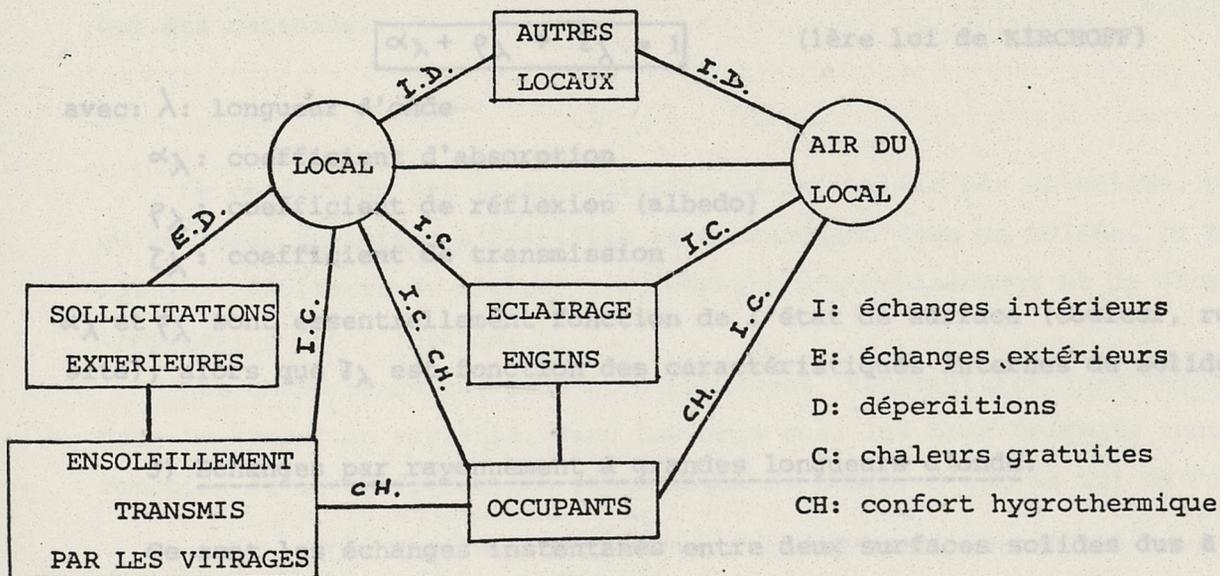
INTRODUCTION:

Une construction est l'objet d'échanges hygrométriques sous l'effet de sollicitations extérieures et intérieures. Ces sollicitations, du point de vue des consommations d'énergies, sont appelées déperditions ou chaleurs gratuites:

- déperditions d'un local: dues aux sollicitations extérieures (soleil*, atmosphère et sol)

$$P_c = h_c (\theta_a - \theta_{int})$$
 dues au couplage hygrothermique des locaux.
- chaleurs gratuites pour un local: dues à son occupation (éclairage, engins divers, occupants)
 dues à l'ensoleillement transmis par les vitrages.

Un local doit toujours être considéré comme une ambiance, c'est-à-dire une enveloppe contenant (et conditionnant en partie) de l'air humide, en interaction l'une avec l'autre. D'où les multiples relations d'échanges hygrothermiques possibles participant au confort hygrothermique qui sont l'effet du local sollicité:



*Notons que les apports déphasés dus à l'ensoleillement des parois opaques sont considérés comme des déperditions négatives.

I NATURE DES ECHANGES HYGROTHERMIQUES

Ces échanges hygrothermiques sont de natures très différentes:

1) Echanges par convection:

La convection est l'échange thermique instantané entre une surface solide et l'ambiance fluide dans laquelle elle se trouve. Le flux surfacique d'échange par convection a pour expression:

$$\phi_c = h_c (\theta_a - \theta_s) \quad (\text{en w/m}^2)$$

avec: h_c : coefficient d'échange superficiel par convection, exprimé en $\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$

θ_a : température de l'air ambiant

θ_s : température superficielle du solide

h_c est essentiellement fonction du mouvement d'air, donc de la vitesse de l'air et du sens du flux d'échange qui influence ce mouvement.

2) Echanges par rayonnement à courtes longueurs d'onde:

Le rayonnement à courtes longueurs d'onde incident instantanément sur une surface solide est absorbé, transmis et réfléchi dans des proportions spécifiques pour chaque longueur d'onde:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (\text{1ère loi de KIRCHOFF})$$

avec: λ : longueur d'onde

α_λ : coefficient d'absorption

ρ_λ : coefficient de réflexion (albedo)

τ_λ : coefficient de transmission

α_λ et ρ_λ sont essentiellement fonction de l'état de surface (couleur, rugosité), alors que τ_λ est fonction des caractéristiques internes du solide.

3) Echanges par rayonnement à grandes longueurs d'onde:

Ce sont les échanges instantanés entre deux surfaces solides dus à leurs températures respectives. Du point de vue énergétique, une surface, pour une longueur d'onde, émet autant qu'elle absorbe:

$$\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda \quad (\text{2ème loi de KIRCHOFF})$$

ϵ_λ étant l'émissivité.

Le flux surfacique d'échange par rayonnement a pour expression:

$$\Phi_r = \sigma \epsilon (T_1^4 - T_2^4)$$

avec: σ : constante de BOLTZMANN

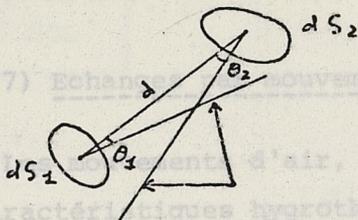
T_1 et T_2 : températures absolues (en °K) des surfaces en regard.

Comme $T = 273,15 + \theta$, avec θ en °C, variant dans une plage limitée, on peut écrire: $\Phi_r \approx \sigma \epsilon 4 T_1^3 (\theta_1 - \theta_2)$

Ainsi: $\Phi_r = h_r (\theta_1 - \theta_2)$ (en w/m²)

h_r est essentiellement fonction de l'état de surface.

Du point de vue géométrique: les deux surfaces se voient réciproquement sous un certain point de vue. Elles "éclairent et sont éclairées suivant une loi géométrique complexe qui fait intervenir au niveau macroscopique des facteurs de forme:



$$F_{1,2} = \frac{1}{S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi d^2} dS_1 \cdot dS_2$$

Pour des dispositions relativement simples, ces facteurs de forme ont été calculés.

La conduction est la transmission de la chaleur par un solide. Bien qu'un champ thermique s'établisse instantanément dans un solide, la transmission résultante de chaleur s'accompagne d'amortissement et de décalage temporel: c'est l'inertie.

Le champ thermique peut être permanent (températures invariantes dans le temps) ou variable. Dans les deux cas, les flux transmis sont fonction de la configuration géométrique du champ; c'est la loi de FOURIER:

$$\phi = -\lambda \frac{\Delta \theta}{\Delta x}$$
 (champ unidimensionnel)

avec: λ : conductivité du solide (en w/m.°K)

$\Delta \theta$: variation de température entre deux points du solide distants de Δx

Lorsque les températures ne sont pas constantes dans le temps, la transmission sera caractérisée par d'autres facteurs:

- la diffusivité $a = \frac{\lambda}{c \rho}$ avec c : chaleur massique du solide (en J/kg.°K)

ρ : masse volumique

et donc $c \rho$: chaleur volumique

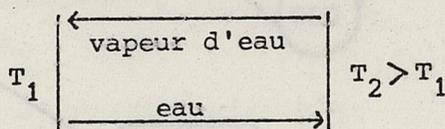
- l'effusivité: $\sqrt{\lambda c \rho}$.

5) Echanges par évaporation et condensation:

A la surface d'un solide, l'état de pression et de température ambiant peut provoquer une production ou une consommation d'énergie - à température constante - par changement de phase d'une certaine quantité d'humidité présente dans l'air ou dans le solide. Mais ce phénomène superficiel n'est pas encore bien quantifié dans ses effets.

6) Echanges par thermomigration:

Il y a modification réciproque entre le transfert d'humidité à travers un solide poreux par diffusion, capillarité ou convection, et le champ thermique où celui-ci intervient. Mais ce phénomène n'est pas encore pris sérieusement en considération.



7) Echanges par mouvements d'air:

Les mouvements d'air, forcés ou naturels, entraînent des mélanges d'airs de caractéristiques hygrothermiques différentes, aboutissant presque instantanément à une nouvelle homogénéité ou à des stratifications d'airs distincts par le fait que la densité de l'air diminue quand la température croît. En fait, de ces distributions d'air, on retient généralement l'instabilité des mélanges et les effets de mouvements d'air qu'elles provoquent (tirage thermique).

8) Conclusion:

En laissant provisoirement de côté les aspects hygrométriques du comportement des bâtiments, on peut regrouper les échanges thermiques sur un organigramme (cf. p. suivante fig I)

Ainsi, le comportement thermique des bâtiments suit le schéma fonctionnel de la figure II (cf. p. suivante).

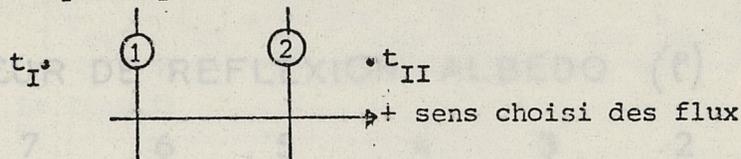
Il apparaît donc nécessaire de bien connaître:

- les bilans thermiques des faces des parois
- les apports convectifs directs à l'air
- les renouvellements d'air.

II LE BILAN THERMIQUE DES FACES DES PAROIS

1) Parois opaques:

Lorsqu'on peut admettre que l'hypothèse d'invariance des températures est justifiée (régime permanent), on peut exprimer simplement le bilan thermique d'une face de paroi par le schéma suivant:



a) Les échanges superficiels de la face 2 par rayonnement à grandes longueurs d'onde et par convection avec l'ambiance à température t_{II} ont pour valeur:

$$\phi_{R+C} = h_2 (t_2 - t_{II})$$

avec: h_2 : coefficient d'échange superficiel global

$h_2 = h_{c2} + h_{r2}$ avec h_{c2} et h_{r2} coefficients d'échange superficiel par convection et par rayonnement à grandes longueurs d'onde.

On suppose donc que l'ambiance a une température radiante moyenne égale à t_{II} . Si tel n'était pas le cas, il faudrait écrire:

$$\phi_{R+C} = h_{c2} (t_2 - t_{rII}) + h_{r2} (t_2 - t_{rII})$$

avec t_{rII} : température radiante moyenne de l'ambiance "vue" de la face 2. Cette température est la moyenne barycentrique des températures superficielles t_i des autres faces "vues" de la face 2 sous des angles solides Ω_i .

$$t_{rII} = \frac{\sum_i \Omega_i \cdot t_i}{\sum_i \Omega_i}$$

b) Les apports supplémentaires par rayonnement à courtes ou grandes longueurs d'onde ont pour valeur:

$$\phi_{glo} = -\alpha_{glo} \cdot R_{glo}$$

et

$$\phi_{clo} = -\alpha_{clo} \cdot R_{clo}$$

avec α_{glo} et α_{clo} : coefficients d'absorption des rayonnements incidents R_{glo} et R_{clo} . (cf tableau page suivante)

c) Les échanges internes par conduction ont pour valeur:

$$\phi_{cond} = \frac{t_1 - t_2}{R}$$

avec: R : résistance thermique globale de la paroi, $R = \frac{e_i}{\lambda_i}$

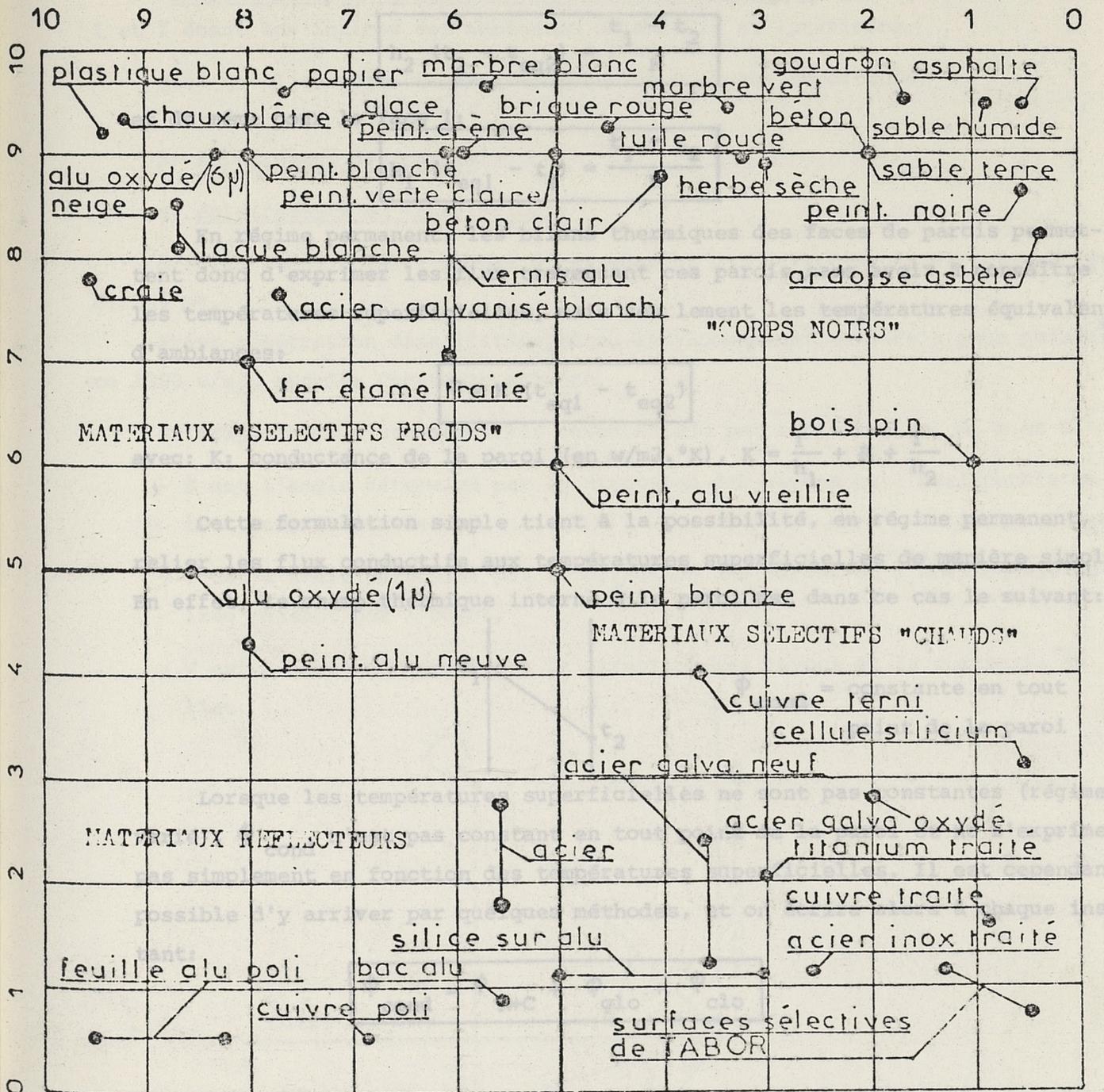
avec: e_i : épaisseur de couche homogène

λ_i : conductivité de cette même couche

TABLEAU DES PROPRIETES PHYSIQUES DES MATERIAUX

(d'après J. YELLOTT)

FACTEUR DE REFLEXION : ALBEDO (e)



FACTEUR D'ABSORPTION R. S. [α_{cl0}] (II)
(exprimé en dixièmes)

Le bilan thermique de la face 2 peut s'écrire en régime permanent:

$$\phi_{\text{cond}} = \phi_{\text{R+C}} + \phi_{\text{glo}} + \phi_{\text{clo}}$$

En définissant une température équivalente t_{eq2} qui regroupe tous les effets de l'ambiance II:

$$t_{\text{eq2}} = t_{\text{II}} + \frac{1}{h_2} (\alpha_{\text{glo}} \cdot R_{\text{glo}} + \alpha_{\text{clo}} \cdot R_{\text{clo}})$$

on obtient pour la face 2:

$$h_2 (t_2 - t_{\text{eq2}}) = \frac{t_1 - t_2}{R}$$

et de même pour la face 1:

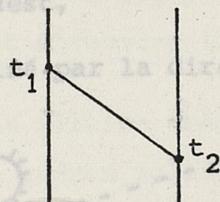
$$h_1 (t_{\text{eq1}} - t_1) = \frac{t_1 - t_2}{R}$$

En régime permanent, les bilans thermiques des faces de parois permettent donc d'exprimer les flux traversant ces parois sans avoir à connaître les températures superficielles, mais seulement les températures équivalentes d'ambiances:

$$\phi = K (t_{\text{eq1}} - t_{\text{eq2}})$$

avec: K : conductance de la paroi (en $\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$), $K = \frac{1}{h_1} + R + \frac{1}{h_2}$

Cette formulation simple tient à la possibilité, en régime permanent, de relier les flux conductifs aux températures superficielles de manière simple. En effet, le champ thermique interne à la paroi est dans ce cas le suivant:



$\phi_{\text{cond}} = \text{constante en tout point de la paroi}$

Lorsque les températures superficielles ne sont pas constantes (régime varié), ϕ_{cond} n'est pas constant en tout point de la paroi et ne s'exprime pas simplement en fonction des températures superficielles. Il est cependant possible d'y arriver par quelques méthodes, et on écrira alors à chaque instant:

$$\phi_{\text{cond}} = \phi_{\text{R+C}} + \phi_{\text{glo}} + \phi_{\text{clo}}$$

2) Parois vitrées:

Dans le cas des parois vitrées, le phénomène d'absorption du rayonnement incident à courtes longueurs d'onde (R_{clo}) n'est plus superficiel, mais est le résultat de la traversée de la paroi transparente. On ne peut donc plus écrire l'équation précédente.

En régime permanent, on peut cependant écrire le bilan global pour un vitrage:

$$h_1 (t_I - t_1) - h_2 (t_2 - t_{eq2}) + \alpha_{clo} \cdot R_{clo} = 0$$

1 et 2 étant les indices des ambiances extérieure et intérieure.

Quoi qu'il en soit, la détermination de R_{clo} est importante.

3) Éclaircissement des parois:

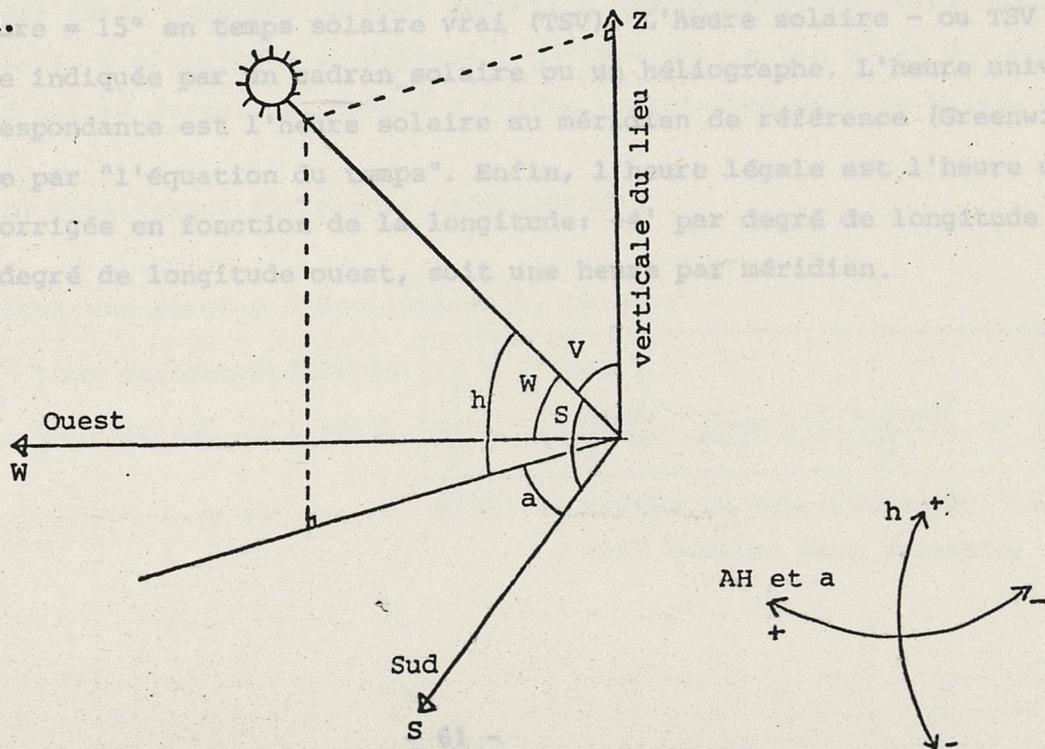
a) Éclaircissements et irradiations:

L'éclaircissement solaire global G° se compose des éclaircissements directs I° et diffus D° .

Avant pénétration dans l'atmosphère, le rayonnement solaire a pour puissance 1390 w/m², appelée constante solaire.

Sa trajectoire a une géométrie caractérisée par trois angles, S, W et V:

- S est l'angle déterminé par la direction des rayons et l'horizontale du lieu passant par le sud,
- W est l'angle déterminé par la direction des rayons et l'horizontale du lieu passant par l'ouest,
- V est l'angle déterminé par la direction des rayons et la verticale du lieu.



$$\cos V = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos AH = \sin h$$

$$\cos W = \sin AH \cdot \cos \delta = \sin a \cdot \cos h$$

$$\cos S = \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos AH - \sin \delta \cdot \cos \varphi = \cos a \cdot \cos h$$

avec: φ : latitude du lieu

δ : déclinaison, liée à la position relative terre / soleil (1)

$\sin \delta = 0,4 \sin \frac{360}{365} t$ avec t: nombre de jours écoulés depuis le 21 mars.

h: hauteur du soleil

a: azimut du soleil

AH: angle horaire (correspond à l'azimut, mais en coordonnées équatoriales)

En appelant l, m et n les cosinus directeurs d'une paroi:

$$l = \cos \beta$$

avec: β : inclinaison de la paroi sur le plan

$$m = \sin a_p \cdot \sin \beta$$

horizontal,

$$n = \cos a_p \cdot \sin \beta$$

a_p : azimut de la paroi

l'inclinaison du rayonnement direct incident par rapport à la normale à cette paroi a pour valeur:

$$\begin{aligned} \cos i &= l \cdot \cos V + m \cdot \cos W + n \cdot \cos S \\ &= \sin h \cdot \cos \beta + \cos h \cdot \sin \beta \cdot \cos(a - a_p) \end{aligned}$$

- (1) La déclinaison du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial; elle varie de $-23,27^\circ$ au solstice d'hiver (22 décembre) à $+23,27^\circ$ au solstice d'été (22 juin), en passant par 0° aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre).
- (2) 1 heure = 15° en temps solaire vrai (TSV). L'heure solaire - ou TSV - est celle indiquée par un cadran solaire ou un héliographe. L'heure universelle correspondante est l'heure solaire au méridien de référence (Greenwich) corrigée par "l'équation du temps". Enfin, l'heure légale est l'heure universelle corrigée en fonction de la longitude: $+4'$ par degré de longitude est, $-4'$ par degré de longitude ouest, soit une heure par méridien.

L'atmosphère, par diffusion moléculaire, par diffusion par les aérosols et par absorption gazeuse (ozone, vapeur d'eau) réduit l'éclairement direct arrivant au sol. Pour la FRANCE, nous obtenons les formules suivantes:

$$\begin{array}{l}
 \text{- ciel très pur: } I^\circ = 1210 e^{-\left[\frac{1}{6 \sin(h+1)}\right]} \\
 \text{- conditions normales: } I^\circ = 1230 e^{-\left[\frac{1}{3,8 \sin(h+1,6)}\right]} \\
 \text{- zone industrielle: } I^\circ = 1260 e^{-\left[\frac{1}{2,3 \sin(h+3)}\right]}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \text{Moyenne} \\
 \text{en w/m}^2 \\
 \text{quand } h \text{ en} \\
 \text{degré.}
 \end{array} \right\}$$

G° et D° sont habituellement donnés sur une surface horizontale, I° sur une surface normale au rayonnement; on a alors:

$$G^\circ = D^\circ + I^\circ \sin h$$

Enfin, au sol, la nébulosité influence les éclairagements diffus et global. Aussi introduit-on la fraction d'insolation:

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0}$$

avec: SS : durée d'insolation quotidienne (durée d'incidence au sol de l'éclairement direct, mesurée)

SS_0 : durée d'insolation théorique maximale quotidienne (durée du jour);

SS_0 est fonction de la latitude et de la déclinaison:

$$SS_0 = \frac{2}{15} \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta)$$

Ainsi, on passe des éclairagements (puissances) aux irradiations (énergies).

Pour une durée horaire, on peut aboutir à des expressions statistiques des irradiations globales G et diffuse D du type: $G = A \sin h^B$ et $D = C \sin h$.

Pour d'autres durées, il existe d'autres expressions de G et D (cf. p)

b) éclairage des parois extérieures:

Pour une paroi p d'inclinaison β , on aura:

$$\begin{array}{l}
 \text{- pour incidence directe: } I_p^\circ = I^\circ \cos i \\
 \text{- pour incidence diffuse: } D_p^\circ = \frac{1 - \cos \beta}{2} a \cdot G^\circ + \frac{1 + \cos \beta}{2} D^\circ
 \end{array}$$

avec: a : albedo du sol (coefficient de réflexion du rayonnement solaire)

(cf. tableau page suivante)

VALEURS DE L'ALBEDO POUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL (12)

		Moyenne			
1/ - PLANETE -					
Valeurs moyennes annuelles	0.20 à 0.60	0.28			
2/ - SOL -					
Couverture de neige fraîche	0.80 à 0.90	0.85			
Couverture de neige tassée et vieillie	0.50 à 0.70	0.60			
Terre cultivée nue	0.08 à 0.25	0.15			
Prairies et herbages verts	0.12 à 0.25	0.20			
Terre sableuse	0.15 à 0.25	0.20			
Sable clair, sec ou mouillé	0.25 à 0.45	0.32			
Forêts d'arbres à feuilles caduques, en été	0.10 à 0.20	0.16			
Forêts d'arbres à feuillage persistant (sapins)	0.05 à 0.15	0.12			
Forêt et neige	0.25 à 0.50	0.35			
Herbe et végétation sèche	0.28 à 0.33	0.30			
3/ - ETENDUES D'EAU (MERS, LACS) -					
Eau parfaitement calme, hauteur du Soleil > 30°	0.06 à 0.02	0.04			
Eau parfaitement calme, hauteur du Soleil < 10°	0.35 à 0.60	0.45			
Mers et océans, hauteur du Soleil > 30°	0.02 à 0.05	0.04			
Mers et océans, hauteur du Soleil < 10°	0.20 à 0.02	0.10			
Vastes surfaces glacées	0.25 à 0.40	0.30			
4/ - MATERIAUX DIVERS (Valeurs moyennes approchées) -					
Argent poli	0.94	Argent oxydé	0.50	Graviers	0.25
Aluminium poli	0.97	Béton	0.50	Asphalte	0.18
Aluminium oxydé	0.85	Charbon	0.15	Chaux blanche	0.65
Papier blanc	0.85	Verre à vitres	0.10		
Peintures blanches	0.90	Peintures mates	0.07		
5/ - NUAGES -					
Stratiformes	0.4 à 0.75			0.60	
Cumuliformes	0.6 à 0.85			0.75	

N.B - L'albedo représente la fraction du rayonnement incident qui est réfléchi ou rediffusé : c'est normalement le complément à 1 de la fraction absorbée, pour tous les corps non transparents au rayonnement solaire.

c) éclairement des parois intérieures:

Lorsque $\cos i > 0,13$, les flux transmis par les parois vitrées sont:

$$\begin{aligned} \text{- simple vitrage} & \left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{direct}} = (-0,093 + 0,975 \cos i) I^\circ \\ \phi_{\text{diffus}} = 0,395 D^\circ \end{array} \right. \\ \text{- double vitrage} & \left\{ \begin{array}{l} \phi_{\text{direct}} = (-0,113 + 0,897 \cos i) I^\circ \\ \phi_{\text{diffus}} = 0,335 D^\circ \end{array} \right. \end{aligned} \quad (13)$$

Par simplification, on pourra ensuite estimer que:

- les éclairements diffus sont absorbés au prorata des surfaces des parois intérieures,
- les éclairements directs sont répartis arbitrairement.

Enfin, on estime que les flux réfléchis (de manière diffuse) sont absorbés au prorata des surfaces des parois intérieures.

4) Isolation et inertie:

L'hypothèse de régime permanent montre le rôle des caractéristiques internes de l'enveloppe dans l'isolation. L'absorption du rayonnement incident n'intervient que pour majorer ou minorer le potentiel d'échange.

L'hypothèse de régime varié introduit le phénomène d'inertie: le bilan superficiel est lié au passé thermique de l'enveloppe et ses températures superficielles sont couplées par ce passé. Les caractéristiques internes et superficielles ont leur rôle:

- internes: pour la transmission de chaleur,
- superficielles: pour le reflux de chaleur.

Ainsi, les apports convectifs directs à l'air dépendent:

- des caractéristiques énergétiques des vecteurs de chaleurs gratuites (occupants, engins, éclairage)
- des coefficients d'absorption des vitrages pour les éclairements directs et diffus,
- des résistances thermiques des vitrages et des occultations (les lames d'air intérieures créées par les occultations n'ont pas encore été bien indicées pour les champs thermiques particuliers qu'elles créent.

III LES APPORTS CONVECTIFS DIRECTS A L'AIR

Il s'agit de la part convective des chaleurs gratuites dues aux occupants, aux engins, à l'éclairage et aux vitrages; elle s'estime comme suit:

1) Occupants:

Environ $\frac{R + C}{3}$.

2) Engins:

Très variable.

3) Eclairage:

Lampes à incandescence: 0,2 x (puissance installée)

Lampes fluorescentes: 0,5 x (puissance installée)

4) Vitrages:

La fraction absorbée du rayonnement incident chauffe les vitrages sans inertie notable. Il en résulte un échange convectif superficiel instantané:

Pour un vitrage simple, la fraction ϕ de l'énergie absorbée pénétrant instantanément dans le local sera:

$$\phi = \frac{h_i}{h_i + h_e}$$

avec h_i et h_e coefficients d'échange superficiel par convection.

Pour un vitrage double:

$$\phi_i = \frac{\frac{1}{h_e} + R}{\frac{1}{h_i} + R + \frac{1}{h_e}} \quad \left(\begin{array}{l} \text{fraction de l'énergie absorbée par} \\ \text{le vitrage intérieur} \end{array} \right)$$

$$\phi_e = \frac{\frac{1}{h_e}}{\frac{1}{h_i} + R + \frac{1}{h_e}} \quad \left(\begin{array}{l} \text{fraction de l'énergie absorbée par} \\ \text{le vitrage extérieur} \end{array} \right)$$

La présence d'occultation serait traitée comme le vitrage double.

Ainsi, les apports convectifs directs à l'air dépendent:

- des caractéristiques énergétiques des vecteurs de chaleurs gratuites (occupants, engins, éclairage)
- des coefficients d'absorption des vitrages pour les éclairagements directs et diffus,
- des résistances thermiques des vitrages et des occultations (les lames d'air intérieures créées par les occultations n'ont pas encore été bien indicées pour les champs thermiques particuliers qu'elles créent.

IV LE RENOUELEMENT D'AIR

Les infiltrations naturelles sont l'effet du vent et du tirage thermique:

1) Les effets du vent:

Les parois exposées au vent sont dites "au vent", les autres, non exposées ou parallèles à la direction du vent, sont dites "sous le vent". L'action surfacique du vent sera: $P_v = c \cdot q$ (en Pa)

avec: q : pression dynamique, $q = 0,6 v^2$, v étant la vitesse du vent en m/s,

c : coefficient de pression, $c = c_e - c_i$, c_e et c_i étant les coefficients de pression extérieurs et intérieurs;

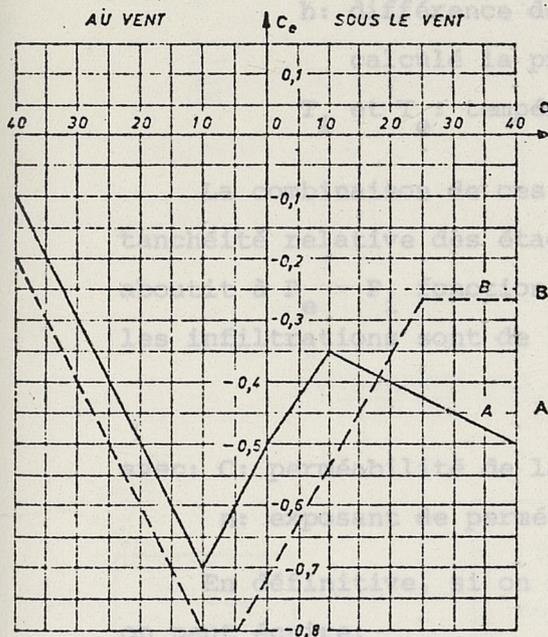
c_e a pour valeur: - paroi verticale au vent: +0,8

- paroi verticale sous le vent: -0,5

- toiture:

. pour un vent glissant parallèlement aux génératrices: -0,5

. pour un vent glissant normalement aux génératrices: cf. figure ci-contre.



TOITURES A VERSANTS PLANS OU EN VOÛTE:

COEFFICIENT c_e

- A: toitures à versants plans

α° : inclinaison

- B: toitures en voûte

de la toiture.

(14)

c_i a pour valeur: - construction fermée: +0,3

- construction avec ouverture face au vent: +0,8

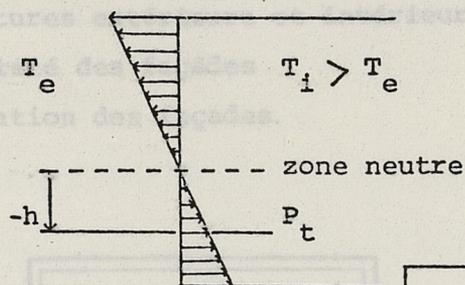
- construction avec ouverture sous le vent: -0,5

En désignant par P_{vf} , P_{vs} , P_i les pressions extérieures face au vent, extérieures sous le vent et intérieures, et par A_f et A_s les surfaces d'infiltration face au vent et sous le vent, on a:

$$P_{vf} - P_i = \frac{P_{vf} - P_{vs}}{1 + \frac{A_f}{A_s} n} \quad (9)$$

2) Tirage thermique:

La diminution de la densité de l'air lorsque la température augmente entraîne une dépression en bas des locaux et une surpression en haut. Il s'établit alors une zone neutre:



Par rapport à cette zone neutre, on a: $P_t = 0,0342 P \cdot h \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right)$ (9)

avec: P: pression atmosphérique (en Pa)

h: différence de hauteur entre la zone neutre et le point où est calculé la pression

T_i et T_e : températures intérieure et extérieure absolues (en °K)

La combinaison de ces différences de pression, en tenant compte de l'étanchéité relative des étages d'une construction l'un par rapport à l'autre, aboutit à $P_e - P_i$ fonction de la hauteur, moteur des infiltrations. Ainsi, les infiltrations sont de la forme:

$$Q = C (P_e - P_i)^n \quad (\text{en m}^3/\text{s})$$

avec: C: perméabilité de la zone d'infiltration,

n: exposant de perméabilité (ouvertures = 0,5, fenêtres = 0,67)

En définitive, si on néglige les infiltrations à travers les parois, on peut écrire:

$$\sum Q = \sum P (p + e) + Q_e \quad (\text{en m}^3/\text{h})$$

avec: Q_e : débit total d'air introduit

$$p = \frac{Q_g - Q_e}{P} \quad \text{où } Q_g \text{ est le débit d'air extrait}$$

e: coefficient d'exposition au vent

$$P = 0,25 A_o + \sum m \cdot A_m$$

A_o étant la section des orifices de ventilation (en cm²)

A_m : surface des ouvrants (en m²)

m: perméabilité des menuiseries par m² d'ouvrant

Les renouvellements d'air naturels, modulés par le bilan global de renouvellement d'air, dépendent ainsi de:

- la vitesse de l'air sur les façades
- les températures extérieure et intérieure
- la perméabilité des façades
- la configuration des façades.

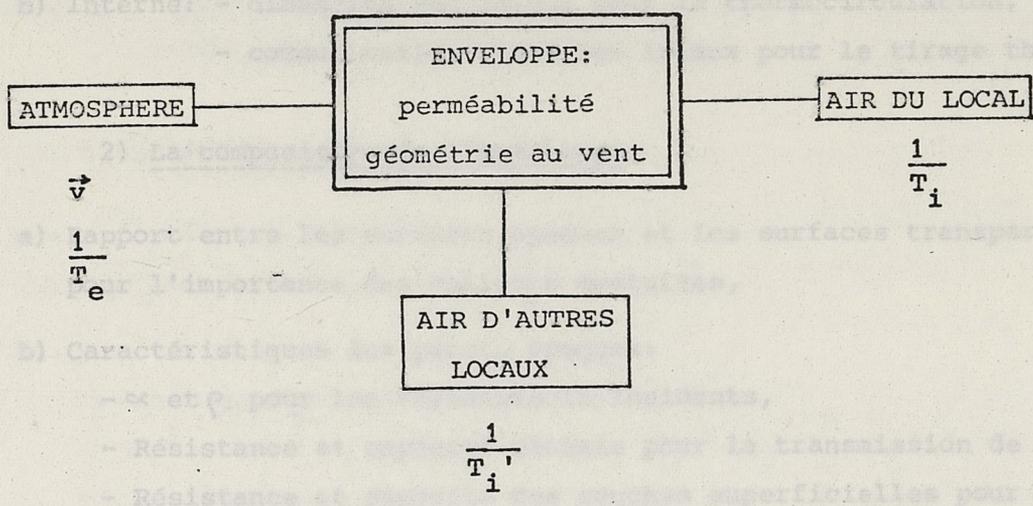


DIAGRAMME DES ECHANGES DUS AU RENOUELEMENT D'AIR

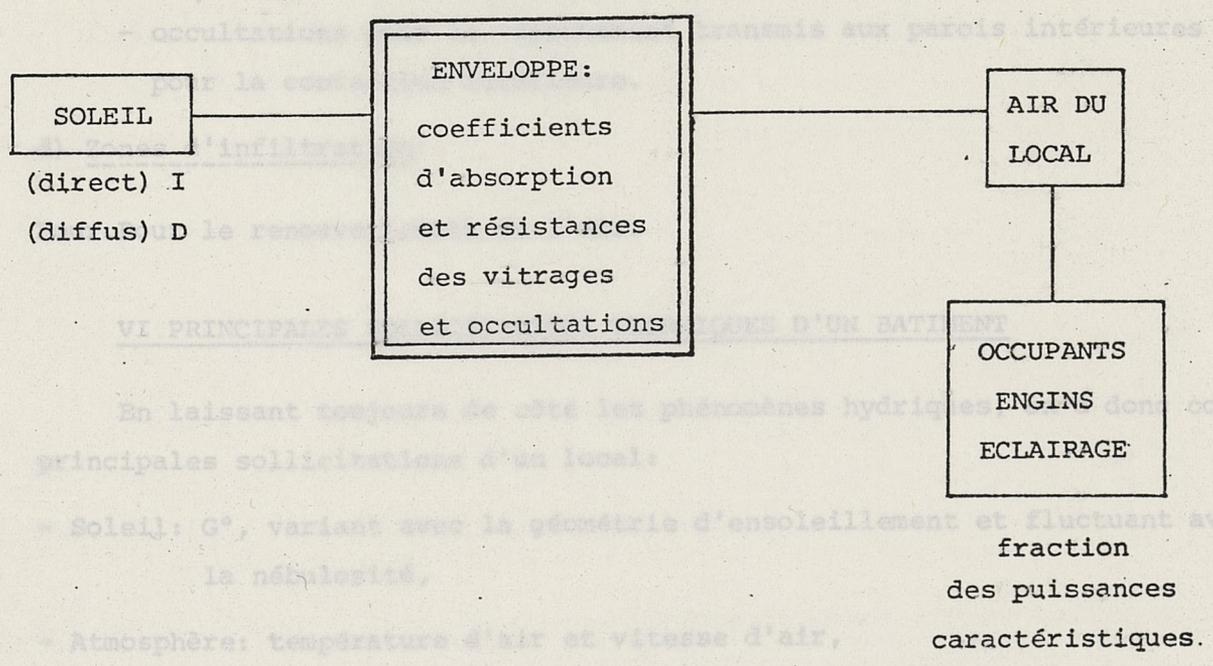


DIAGRAMME DES ECHANGES DUS AUX APPORTS CONVECTIFS DIRECTS A L'AIR

V CONCLUSION: PRINCIPALES CARACTERISTIQUES THERMIQUES D'UN BATIMENT

Ayant laissé de côté les phénomènes hydriques, nous pouvons dire que le comportement thermique d'un bâtiment dépend essentiellement des facteurs suivants:

1) La configuration:

- a) Externe: orientation des parois (β , a_p) pour l'ensoleillement.
- b) Interne: - dimension des locaux pour la thermocirculation,
- communication entre les locaux pour le tirage thermique.

2) La composition de l'enveloppe:

- a) Rapport entre les surfaces opaques et les surfaces transparentes (vitrages) pour l'importance des chaleurs gratuites,
- b) Caractéristiques des parois opaques:
 - α et ρ pour les rayonnements incidents,
 - Résistance et capacité globale pour la transmission de chaleur,
 - Résistance et capacité des couches superficielles pour le reflux de chaleur.
- c) Caractéristiques des vitrages:
 - α , ρ et Z pour les rayonnements incidents,
 - occultations pour le rayonnement transmis aux parois intérieures et pour la convection intérieure.
- d) Zones d'infiltration:

Pour le renouvellement de l'air.

VI PRINCIPALES SOLLICITATIONS THERMIQUES D'UN BATIMENT

En laissant toujours de côté les phénomènes hydriques, on a donc comme principales sollicitations d'un local:

- Soleil: G° , variant avec la géométrie d'ensoleillement et fluctuant avec la nébulosité,
- Atmosphère: température d'air et vitesse d'air,
- Sol: ses caractéristiques thermiques hétérogènes et variables,
- Occupation: occupants, éclairage, engins à puissances rayonnante et convective,
- Autres locaux: température d'air.

EBAUCHE METHODOLOGIQUE POUR LA CONCEPTION THERMIQUE D'UN BATIMENT

I QUELQUES METHODES DE CALCUL DE LA BALANCE DEPERDITIONS-CHALEURS GRATUITES

1) Le coefficient volumique de déperdition (G) : Le calcul des déperditions s'appuie sur l'utilisation du coefficient volumique de déperditions G en (w/m³*K) et des degrés-jours DJ_{t₁}.

Le coefficient volumique de déperditions G a pour valeur :

$$G = G_t + G_r$$

où : G_t : coefficient volumique de déperditions par transmission à travers les parois.

$$G_t = \frac{\sum K_i S_i + \sum k_{l_i} l_i}{V}$$

avec : K_i : coefficient surfacique de transmission en w/m²*K

k_{l_i} : coefficient linéique de transmission en w/m*K

V : volume habitable en m³

G_r : coefficient volumique de déperdition par renouvellement d'air.

$$G_r = 0,34 NV$$

avec : N : taux de renouvellement en nombre de volumes par heure (valeur généralement admise ≈ 1).

2) Les degrés-jours :

C'est la valeur sur une journée de l'écart positif entre t₁ (t° intérieure) et t₀ (t° extérieure) :
de consigne

$$DJ_{t_1} = \int_0^{24} (t_1 - t_0) dt$$

Suivant ses caractéristiques propres, un bâtiment régule de manière dynamique ce qu'on appelle les déperditions et les chaleurs gratuites. Certaines méthodes de calcul, bien que basées sur l'hypothèse de régime permanent, donnent une idée assez précise de cette balance et peuvent aider à orienter la conception.

I QUELQUES METHODES DE CALCUL DE LA BALANCE DEPERDITIONS-CHALEURS

GRATUITES

1) Le coefficient volumique de déperdition (G) : le calcul des déperditions s'appuie sur l'utilisation du coefficient volumique de déperditions G en (w/m³°K) et des degrés-jours DJ_{t_i}.

Le coefficient volumique de déperditions G a pour valeur :

$$G = G_t + G_r$$

où : G_t : coefficient volumique de déperditions par transmission à travers les parois.

$$G_t = \frac{\sum_i K_i S_i + \sum_i k_i l_i}{V}$$

avec : K_i : coefficient surfacique de transmission en w/m²°K

k_i : coefficient linéique de transmission en w/m°K

V : volume habitable en m³

G_r : coefficient volumique de déperdition par renouvellement d'air.

$$G_r = 0,34 NV$$

avec : N : taux de renouvellement en nombre de volumes par heure (valeur généralement admise ≈ 1).

2) Les degrés-jours :

C'est la valeur sur une journée de l'écart positif entre t_i (t° intérieure) et t_e (t° extérieure) :
de consigne

$$DJ_{t_i} = \int_0^{24} (t_i - t_e) dt$$

- le total du Rayonnement Global reçu par une façade pendant 7 mois de la période de chauffage pour les orientations : S, SW, W, NW, N
- les déperditions à travers un vitrage ou un double vitrage isolant pendant
- le bilan au gain opposé à la différence entre Rayonnement Global reçu et déperdition

- Lorsque que $t_i \geq t_e \text{ max}$ (de la journée) :

$$DJ_{t_i} = t_i - \frac{t_e \text{ min} + t_e \text{ max}}{2}$$

- Lorsque $t_i \leq t_e \text{ min}$:

$$DJ_{t_i} = 0$$

- Lorsque $t_e \text{ min} < t_i < t_e \text{ max}$

Ce cas plutôt rare durant la saison de chauffe est calculé suivant différentes méthodes pour la publication des tables de degrés-jours.

3) Déperditions et chaleurs gratuites :

D'où l'expression des déperditions :

$$D = 24 G V \sum DJ_{t_i} \quad \text{en wh}$$

où $\sum DJ_{t_i}$ correspond à la somme des degrés-jours sur la période considérée.

Quant aux chaleurs gratuites elles ont à priori pour expression :

$$C = \int_0^x C(t) dt \quad (0, x) : \text{période considérée:}$$

Cette intégrale est difficilement calculable.

Il est cependant possible de surmonter la difficulté du calcul de D-C en minorant D :

- En tenant compte des chaleurs gratuites par ensoleillement à travers les vitrages par minoration des coefficients K de ceux-ci. (cf page suivante).

- En tenant compte des chaleurs gratuites par occupation, récupérées en minorant la température intérieure de consigne pour le calcul des degrés-jours (en passant de 20°C à 18 par exemple).

Dans ces démarches approximatives de l'expression de D-C, le rôle du bâtiment est concentré dans G et, plus particulièrement, dans G_t .

G_t peut s'exprimer de différentes manières qui introduisent certains facteurs pour sa minoration (qui maintenant correspond à la minoration de D-C).

Orientation le 15 de mois de :	SUD		SUD-OUEST		OUEST		NORD-OUEST		NORD	
	Rayonnement Global Reçu	entrent = reçu x 0,60								
Janvier	1307	784	961	577	365	219	102	61	98	58
Février	1561	937	1117	670	505	303	117	70	145	87
Mars	2033	1220	1517	910	705	423	172	103	215	129
Avril	2363	1417	2251	1351	1204	722	262	157	399	239
Mai	2693	1610	2581	1549	1553	932	332	196	512	317
Juin	3023	1803	2911	1747	1902	1142	442	265	687	427
Juillet	3353	2000	3241	1945	2351	1351	552	334	812	517
Août	3683	2197	3571	2143	2800	1560	662	403	937	587
Septembre	4013	2394	3901	2341	3249	1769	772	474	1062	657
Octobre	4343	2591	4231	2539	3698	1978	882	545	1187	747
Novembre	4673	2788	4561	2737	4147	2187	992	616	1312	817
Décembre	5003	2985	4891	2935	4596	2396	1102	687	1437	887
Σ Rayonnement Global entrent sur 7 mois en Kcal/jc/m ²	2380	1425	4257	2537	3417	2037	1279	790	1790	1087
Σ Rayonnement Global entrent sur 30jrs/rok en thermies/m ²	+233	+143	+418	+254	+342	+204	+128	+79	+179	+109
Déperditions Vitrage simple en thermies/m ²	-240	-240	-240	-240	-240	-240	-240	-240	-240	-240
Bilan I : Vitrage simple en thermies/m ²	-7	+3	+18	+14	+2	-36	-112	-161	-161	-131
K'ev. en kcal/h.m ² (vitrage simple)	+0,86	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13
Déperditions Vitrage isolant en thermies/m ²	-150	-150	-150	-150	-150	-150	-150	-150	-150	-150
Bilan II : Vitrage isolant en thermies/m ²	+143	+143	+143	+143	+143	+143	+143	+143	+143	+143
K'ev. en kcal/h.m ² .°C (vitrage isolant)	+0,86	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13	+2,13

TABLEAU DONNANT :

- le total du Rayonnement Global reçu par une façade pendant 7 mois de la période de chauffage pour 5 orientations : S, SW, W, NW, N
- les déperditions à travers un simple ou un double vitrage isolant pendant la même période
- le bilan ou gain apparent résultant de la différence entre Rayonnement Global reçu et déperditions

(d'après WOLF)

Orientation le 15 du mois de :	SUD		SUD-OUEST		OUEST		NORD-OUEST		NORD	
	Rayonnement Global Gs en Kcal/jr./m ²		Rayonnement Global Gs en Kcal/jr./m ²		Rayonnement Global Gs en Kcal/jr./m ²		Rayonnement Global Gs en Kcal/jr./m ²		Rayonnement Global Gs en Kcal/jr./m ²	
	Reçu	entrant = reçu x 0,60								
Janvier	1307	784	960	576	365	219	102	61	98	58
Février	1960	1176	1491	894	705	423	217	130	162	97
Mars	2428	1456	2007	1204	1209	725	406	243	253	151
Avril	2363	1417	2251	1350	1704	1022	862	517	399	239
Octobre	2292	1375	1799	1079	953	571	327	196	212	127
Novembre	1496	897	1113	667	461	276	136	81	117	70
Décembre	1125	675	829	497	303	181	86	51	81	48
Σ Rayonnement Global entrant sur 7 mois en Kcal/jr./m ²	7780		6267		3417		1279		790	
Σ Rayonnement Global entrant sur 30jrs/mois en thermies/m ²	+ 233		+ 188		+ 102		+ 38		+ 23	
Déperditions Vitrage simple en thermies/m ²	- 240		- 240		- 240		- 240		- 240	
Bilan I : Vitrage simple en thermies/m ²	- 7		- 52		- 128		- 202		- 217	
K'sv en kcal/h.m ² .°C (vitrage simple)	+ 0,11		+ 0,86		+ 2,13		+ 3,36		+ 3,61	
Déperditions Vitrage isolant en thermies/m ²	- 150		- 150		- 150		- 150		- 150	
Bilan II : Vitrage isolant en thermies/m ²	+ 83		+ 38		- 48		- 112		- 127	
K'dv en kcal/h.m ² .°C (vitrage isolant)	- 1,38		- 0,63		+ 0,8		+ 1,86		+ 2,11	

4) Influence de la configuration

On peut écrire :

$$G_t = G_p + G_{pt}$$

avec :

$$G_p = \frac{\sum_i K_i S_i}{V}$$

(relatif aux parois)

et :

$$G_{pt} = \frac{\sum_i k_i l_i}{V}$$

(relatif aux ponts thermiques)

a) La minoration de G_{pt} relève d'une étude géométrique apparemment jamais faite. On peut déjà dire qu'elle doit dépendre d'options prises pour minorer G_p et qu'elle relève de la réduction des hétérogénéités des parois (contour des surfaces vitrées) et de la recherche de la compacité des volumes.

b) La minoration de G_p est trop souvent liée à la minoration de $\frac{\sum_i S_i}{V}$. Mais chaque S_i est pondéré par un K_i qui doit tenir compte des chaleurs gratuites récupérées par les vitrages. Les S_i ne sont donc pas isotropes. La solution de la minoration n'est donc pas la sphère mais un bâtiment réaliste qui tient des K_i réalisables. (L'orientation et la constitution des parois jouent également.)

A priori il serait possible d'envisager la minoration de G_t comme celle d'une fonction à 6 variables (6 orientations des surfaces) pondérées d'une manière probable. Il s'agit donc de chercher la valeur de ces 6 variables en tenant compte de leur partition (problème de la minoration de G_{pt}).

5) Influence du rapport surface vitrée - surface opaque

On peut écrire :

$$G_p = G_{po} + G_{pv}$$

G_{po} et G_{pv} étant relatifs aux surfaces opaques et aux surfaces vitrées.

Comme les K_1 relatifs aux différentes surfaces tiennent compte des chaleurs gratuites récupérées on ne peut dissocier l'étude de ce rapport de la question des orientations soulevée précédemment. En définitive la question de la minoration de G_t revient à celle de la minoration d'une fonction à 11 variables (8 pour les surfaces verticales et 3 pour les surfaces horizontales: Chaque paroi verticale et la toiture peuvent être opaque ou transparente ; le sol étant supposé opaque, on a : $(4 + 1) \times 2 + 1 = 11$ variables.).

Il ne faut pas oublier que le mode constructif et des considérations géométriques banales peuvent réduire sensiblement ce nombre. Il n'y a probablement que peu d'excuse à ne pas mener ce genre d'étude.

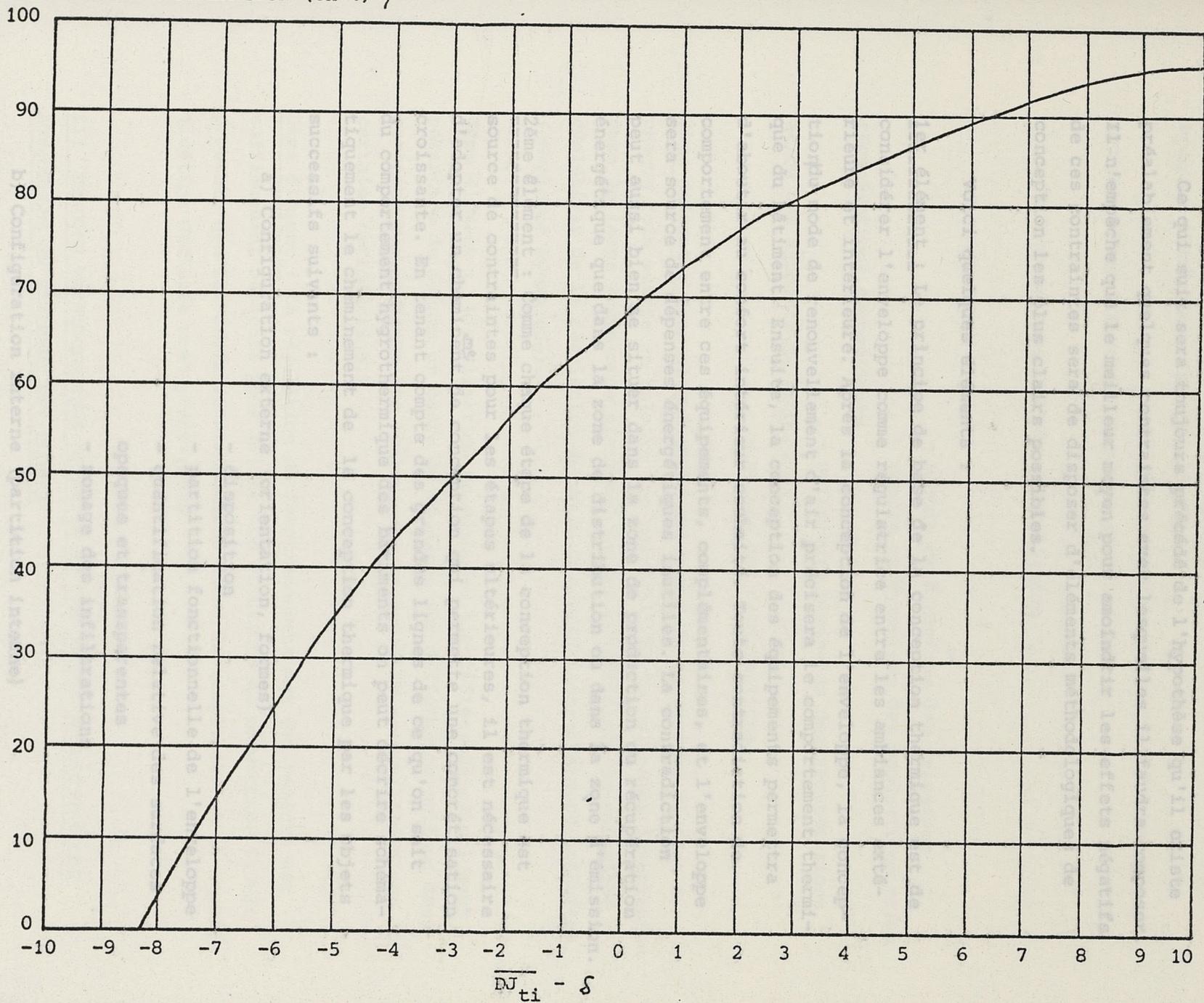
6) Influence de l'inertie d'un local

La récupération des chaleurs gratuites dépend de l'inertie du local (caractéristiques superficielles des parois intérieures pour le reflux de chaleur et caractéristiques internes des parois pour la transmission de chaleur) et de son passé thermique. Une méthode approchée permet de prendre en compte l'effet de ce passé thermique sur le taux de récupération des chaleurs gratuites. Les étapes de calcul sont les suivantes sur un pas de temps mensuel par exemple :

- Calcul de D avec les degrés-jours DJ_{t_i} , t_i étant la température de confort souhaitée.
- Calcul des puissances de chaleurs gratuites : P_{cg}
- Calcul de $\delta th = P_{cg} / GV$
- Calcul de C
- Calcul de $\overline{DJ_{t_i}} - \delta th$, où $\overline{DJ_{t_i}}$ est la moyenne journalière de DJ_{t_i} .
- Détermination de η sur l'abaque (cf page suivante).
- Calcul des consommations : $D - \eta C$

Cette méthode due à Monsieur VEZILLIER a surtout pour avantage de figurer la valeur d'un taux de récupération des chaleurs gratuites suivant l'époque. Mais elle demande à être affinée pour être réellement opérationnelle.

TAUX DE RECUPERATION (en %) η



II. QUELQUES ELEMENTS METHODOLOGIQUES DE CONCEPTION

II QUELQUES ELEMENTS METHODOLOGIQUES DE CONCEPTION

Ce qui suit sera toujours précédé de l'hypothèse qu'il existe préalablement quelques contraintes avec lesquelles il faudra composer. Il n'empêche que le meilleur moyen pour amoindrir les effets négatifs de ces contraintes sera de disposer d'éléments méthodologiques de conception les plus clairs possibles.

Voici quelques éléments :

1er élément : Le principe de base de la conception thermique est de considérer l'enveloppe comme régulatrice entre les ambiances extérieure et intérieure. Après la conception de l'enveloppe, la conception du mode de renouvellement d'air précisera le comportement thermique du bâtiment. Ensuite, la conception des équipements permettra d'aboutir au confort intérieur souhaité. Toute contradiction de comportement entre ces équipements, complémentaires, et l'enveloppe sera source de dépenses énergétiques inutiles. La contradiction peut aussi bien se situer dans la zone de production ou récupération énergétique que dans la zone de distribution ou dans la zone d'émission.

2ème élément : Comme chaque étape de la conception thermique est source de contraintes pour les étapes ultérieures, il est nécessaire d'adopter un cheminement de conception qui permette une concrétisation croissante. En tenant compte des grandes lignes de ce qu'on sait du comportement hygrothermique des bâtiments on peut décrire schématiquement le cheminement de la conception thermique par les objets successifs suivants :

5ème élément : La régulation du fonctionnement des équipements est suffisante pour assurer le confort. Il est probable que les choix intermédiaires entre la simplicité et la sophistication déclarés sont pénalisés.

a) Configuration externe (orientation, formes)

- disposition
- partition fonctionnelle de l'enveloppe
- quantification relative des surfaces opaques et transparentes
- zonage des infiltrations

b) Configuration interne (partition interne)

- partition fonctionnelle des espaces intérieurs

En suivant le cheminement de la conception thermique on peut prendre en compte les différentes sollicitations (soleil, atmosphère, sol et mode d'occupation). Ces prises en compte ont un

c) Conformation de l'enveloppe

- détermination des parties d'enveloppe opaques (isolation, inertie, captage)

1) Contraintes préalables

- détermination des parties d'enveloppe transparentes (filtrage, captage, occultation)

a) Le mode d'occupation implique le caractère principalement continu, intermittent par périodes du comportement thermique du bâtiment.

d) Renouvellement d'air : ventilation

Données : données d'occupation.

e) Equipements

- nature et dynamique des émissions

b) Les caractéristiques de récupérations énergétiques

- nature et dynamique des productions et/ou

en partie par la conception et/ou des appoints de production

- puissances nominales des récupérations

atmosphériques, d'irradiation

- nature des distributions

3ème élément : Pour chaque objet successif de conception il faut à chaque fois mettre en balance les possibilités de solutions invariantes dans le temps (enveloppe statique) et les possibilités de solutions évolutives de la régulation du doublet déperditions-chaleurs gratuites (enveloppe dynamique).

Données : géométrie moyenne mensuelle. Masques.

4ème élément : L'utilisation de méthodes simplifiées de calcul peut permettre de donner un ordre de grandeur aux différentes options dans certains cas (lorsque les contraintes laissent la possibilité d'une certaine optimisation.)

5ème élément : La régulation du fonctionnement des équipements est suffisamment délicate pour éviter les solutions de compromis. Il est probable que les choix intermédiaires entre la simplicité et la sophistication déclarée sont pénalisants.

d) La vitesse du vent dominant précise le potentiel de déper-

III EBAUCHE METHODOLOGIQUE DE PRISE EN COMPTE DES SOLLICITATIONS AUXQUELLES UN BATIMENT EST SOUMIS

Données : roses des vents par classes de températures.

En suivant le cheminement de conception thermique d'un bâtiment on peut prendre en compte les différentes sollicitations (soleil, atmosphère, sol et mode d'occupation). Ces prises en compte ont un de la température équivalente :

effet à l'étape de conception correspondante, mais aussi pour des étapes ultérieures. On ne le rappellera pas.

1) Contraintes préalables

a) Le mode d'occupation implique le caractère principalement continu, intermittent, continu par périodes, intermittent par périodes du comportement thermique du bâtiment.

Données : Périodes d'occupation.

b) Les caractéristiques saisonnières et leur contraste impliquent le choix du confort (d'hiver et/ou d'été) qu'on peut espérer réaliser en partie par la conception de l'enveloppe.

Données : répartitions statistiques mensuelles des caractéristiques atmosphériques, d'irradiation globale.

2) Configuration externe

a) La géométrie d'ensoleillement relativement à l'implantation possible du bâtiment qualifie les orientations. L'effet de masque de l'environnement infléchit cette qualification (cf page 37)

Données : géométrie moyenne mensuelle. Masques.

b) Le vent dominant qualifie aussi les orientations.

Données : roses des vents annuelles, saisonnières.

Il s'en déduit une qualification des orientations où irradiations + vent donne une première approche qualitative de la balance (D-C).

c) La température d'air précise le potentiel thermique de déperdition par transmission.

Données : évolution quotidienne des températures moyennes mensuelles.

d) La vitesse du vent dominant précise le potentiel de déperdition par infiltration d'air, sous l'effet du vent, pour chaque orientation.

Données : roses des vents par classes de températures.

e) Le rayonnement global module le potentiel thermique de déperdition par transmission pour chaque orientation par l'utilisation de la température équivalente :

$$t_{eq} = t_e + \frac{\alpha G}{h_e}$$

avec : t_e : température extérieure

α : coefficient d'absorption de la paroi

h_e : coefficient superficiel global d'échange

Données : évolution quotidienne des irradiations directes et diffuses horaires (moyennes mensuelles). Il s'en déduit une qualification des orientations pour les potentiels de déperdition par transmission et par renouvellement d'air par effet du vent. En supposant des résistances probables aux déperditions par parties d'enveloppe on a un élément de décision pour la disposition et la partition fonctionnelle.

f) Le rayonnement global indique le potentiel de chaleur gratuite transmise par les surfaces transparentes pour chaque orientation.

Données : évolution annuelle des irradiations globales quotidiennes moyennes.

Il s'en déduit une qualification des orientations pour les potentiels de chaleurs gratuits par ensoleillement. En supposant des coefficients de déperditions probables des surfaces transparentes on peut en déduire des coefficients K corrigés tenant compte des chaleurs gratuites par orientation.

g) La superposition des températures d'air et du rayonnement global transmissible par les surfaces transparentes indique le potentiel de surchauffe suivant les orientations.

Données : superposition de l'évolution quotidienne des températures et des irradiations globales horaires moyennes mensuelles.

Il s'en déduit une pénalisation des coefficients K corrigés. On peut ensuite en déduire un zonage des infiltrations par effet du vent.

Il est alors possible d'avoir une deuxième approche saisonnière de la balance (D-C) qui par le travail du coefficient G permet d'aboutir à :

- une disposition
- des formes
- une partition fonctionnelle de l'enveloppe
- une quantification relative des surfaces opaques et transparentes.

3) Configuration interne

a) La température d'air précise le potentiel de déperdition par infiltration d'air sous l'effet du tirage thermique.

Données : évolution annuelle de la température d'air moyenne (moyenne ou maximale ou minimale). Etanchéité relative des espaces intérieurs.

b) Le mode d'occupation spatial précise le potentiel de chaleurs gratuites par occupation.

Données : énergies journalières moyennes d'occupation des espaces intérieurs (occupation, éclairage, engins).

Il s'en déduit une partition fonctionnelle des espaces intérieurs pour une troisième approche (par périodes d'occupation dans le rythme saisonnier) de la balance (D-C).

A ce moment les contraintes thermiques sont cernées.

4) Conformation de l'enveloppe

Deux points de vue successifs (consommations et confort) permettent de préciser la conformation de l'enveloppe.

a) Minoration des consommations :

La reprise de toutes les sollicitations des différents locaux dans leur évolution quotidienne moyenne sur les périodes retenues permet de déduire une quatrième approche (quotidienne moyenne) de la balance (D-C).

En reportant les résultats sur les coefficients K et les chutes de température, on peut travailler le coefficient G de manière à pouvoir aboutir :

- aux coefficients K souhaitables des parties d'enveloppe opaques.
- aux coefficients K et aux caractéristiques de filtrage des parties d'enveloppe transparentes.

b) Réalisation du confort :

Les risques de surchauffe repérés ne pouvant être combattus que par des options qualitatives.

- caractéristiques superficielles des parois intérieures pour

amoindrir les reflux de chaleur trop rapides.

- occultation des parties d'enveloppe transparentes (cf page 88)

c) Vérification des options :

Les contraintes thermiques, la configuration et la conformation de l'enveloppe étant maintenant cernées, il est souhaitable de vérifier la correction du cheminement de conception et quantifier les effets résultant des diverses options ; quitte à revenir sur certaines d'entre elles.

La quantification des effets sur le confort nécessite des calculs en régime varié (utilisation d'ordinateurs) qui ne sont qu'exceptionnellement entrepris.

5) Renouvellement d'air

Des niveaux précédents la ventilation naturelle peut apparaître suffisante, insuffisante ou incertaine. D'autres modes de ventilation sont à considérer en conséquence.

6) Equipements :

Des niveaux précédents on peut déduire les besoins éventuels d'appoint énergétique :

- quantitativement
- phénoménologiquement

Le deuxième aspect a des conséquences très diverses sur les qualités de l'installation suivant le mode d'utilisation (besoins et surtout habitudes) : besoins d'actions rapides pour les utilisations discontinues, habitude de besoin de forte chauffe dans les zones froides par exemple. Il ne faudrait jamais oublier ces aspects aussi bien pour l'estimation des puissances d'installation que pour le choix d'inertie de cette installation.

La position du soleil pour un lieu donné par ses coordonnées est possible de tracer les courbes de hauteur et de déclinaison - pour des jours remarquables de l'année, ceci sur un repère orthogonale (cf. p. 84) ou circulaire (cf. p. 85). Ces diagrammes sont les outils de base pour l'étude de l'ensoleillement d'un bâtiment.

GEOMETRIE DE L'ENSOLEILLEMENT

II ETUDE DES MASQUES DUS A L'ENVIRONNEMENT

1) Etudes in-situ:

Si l'environnement du site, en particulier la ligne d'horizon, est stable et ne risque pas d'être modifiée par le projet à construire, deux types d'appareil permettent de faire une étude sur le terrain:

a) "L'horizontographe"

Inventé par F. TONNE, il s'agit d'un theodolite amélioré: en le plaçant au milieu du site à bâtir, et en suivant dans le viseur la ligne d'horizon, un stylet retranscrit cette ligne sur un diagramme solaire de type circulaire. La lecture de l'influence des masques sur l'ensoleillement se fait automatiquement.



(cf. dessin ci-contre)

b) Le "globoscope" de Pleijel:

Il s'agit d'un miroir parabolique qu'on observe du dessus et qui donne une image stéréographique de l'environnement. En intercalant un diagramme solaire sur un support transparent entre l'œil et le miroir, on peut lire directement l'influence des masques. Un appareil photographique peut remplacer l'œil et fixer l'image; on peut également photographier l'image et superposer ensuite le diagramme.



(cf. schéma ci-contre)

20 MAI
22 JUIN
23 JUILLET
27 AOUT
23 SEPTEMBRE
29 OCTOBRE
22 NOVEMBRE

49°N
PARIS

I DIAGRAMMES SOLAIRES

La position du soleil étant déterminée à tout instant pour un lieu donné par ses coordonnées angulaires a et h (cf. p.61), il est possible de tracer les courses du soleil - fonctions de H , angle horaire et de déclinaison - pour des jours remarquables de l'année, ceci sur un repère orthonormé (cf. p.86) ou circulaire (cf. p.85). Ces diagrammes sont les outils de base pour l'étude de l'enselement d'un bâtiment.

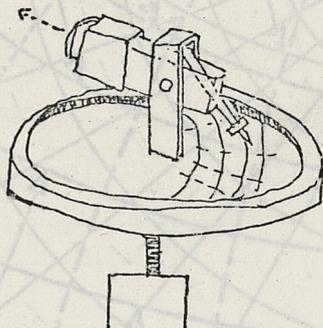
II ETUDE DES MASQUES DUS A L'ENVIRONNEMENT

1) Etudes in-situ:

Si l'environnement du site, en particulier la ligne d'horizon, est stable et ne risque pas d'être modifiée par le projet à construire, deux types d'appareil permettent de faire une étude sur le terrain:

a) "L'horizontographe"

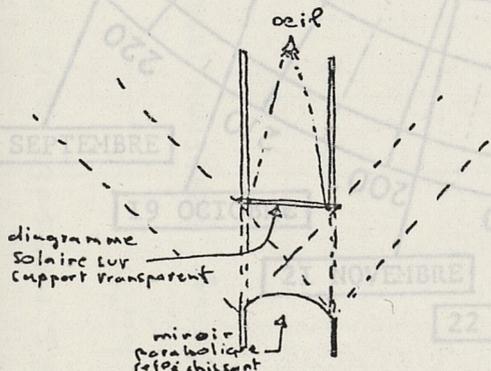
Inventé par F. TONNE, il s'agit d'un theodolite amélioré: en le plaçant au milieu du site à bâtir, et en suivant dans le viseur la ligne d'horizon, un stylet retranscrit cette ligne sur un diagramme solaire de type circulaire. La lecture de l'influence des masques sur l'enselement se fait automatiquement.



(cf. dessin ci contre)

b) Le "globoscope" de Pleijil:

Il s'agit d'un miroir parabolique qu'on observe du dessus et qui donne une image stéréographique de l'environnement. En intercalant un diagramme solaire sur un support transparent entre l'oeil et le miroir, on peut lire directement l'influence des masques. Un appareil photographique peut remplacer l'oeil et fixer l'image; on peut également photographier l'image et superposer ensuite le diagramme.



(cf. schéma ci-contre)

DIAGRAMME SOLAIRE SUR
REPERE CIRCULAIRE.

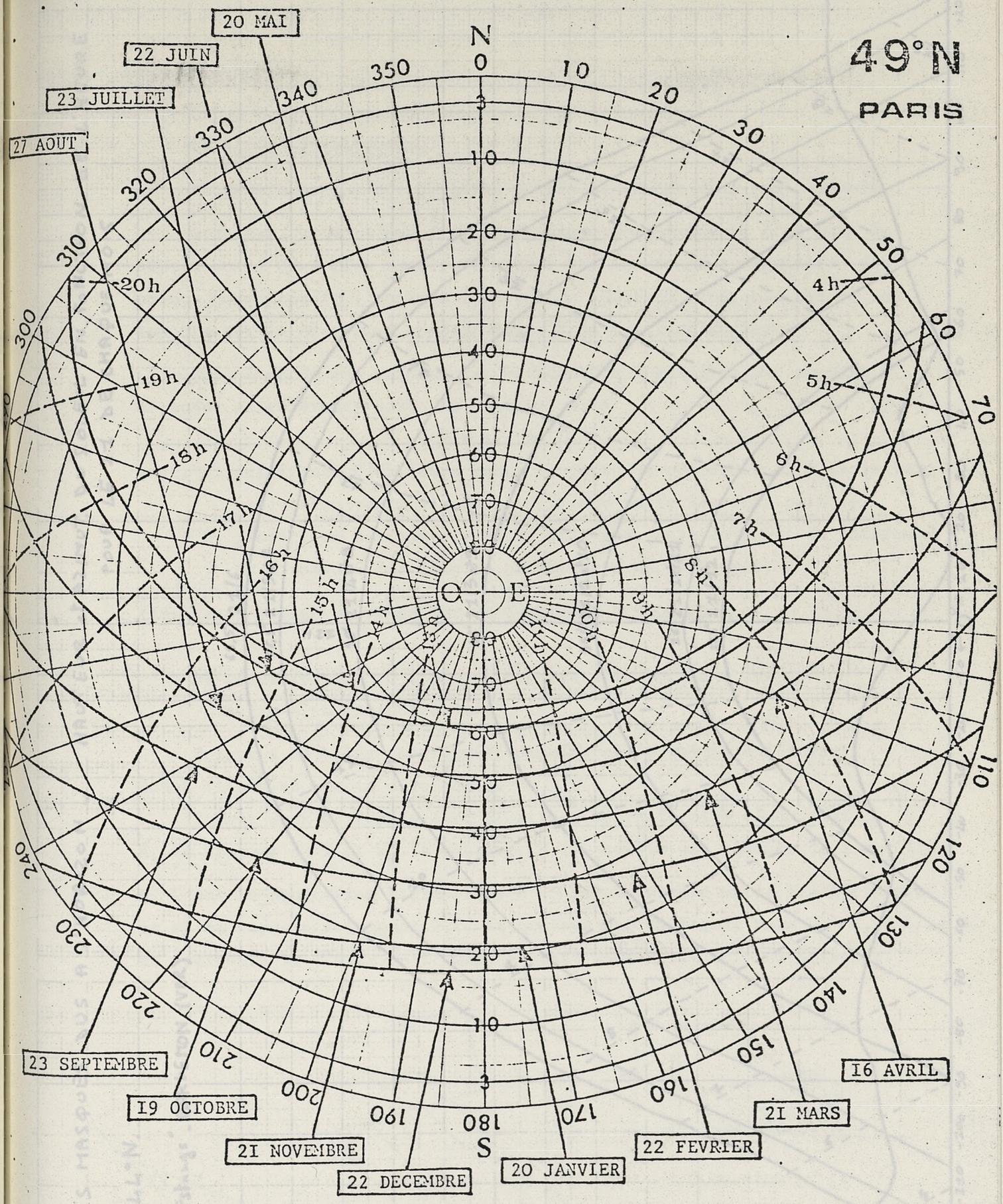
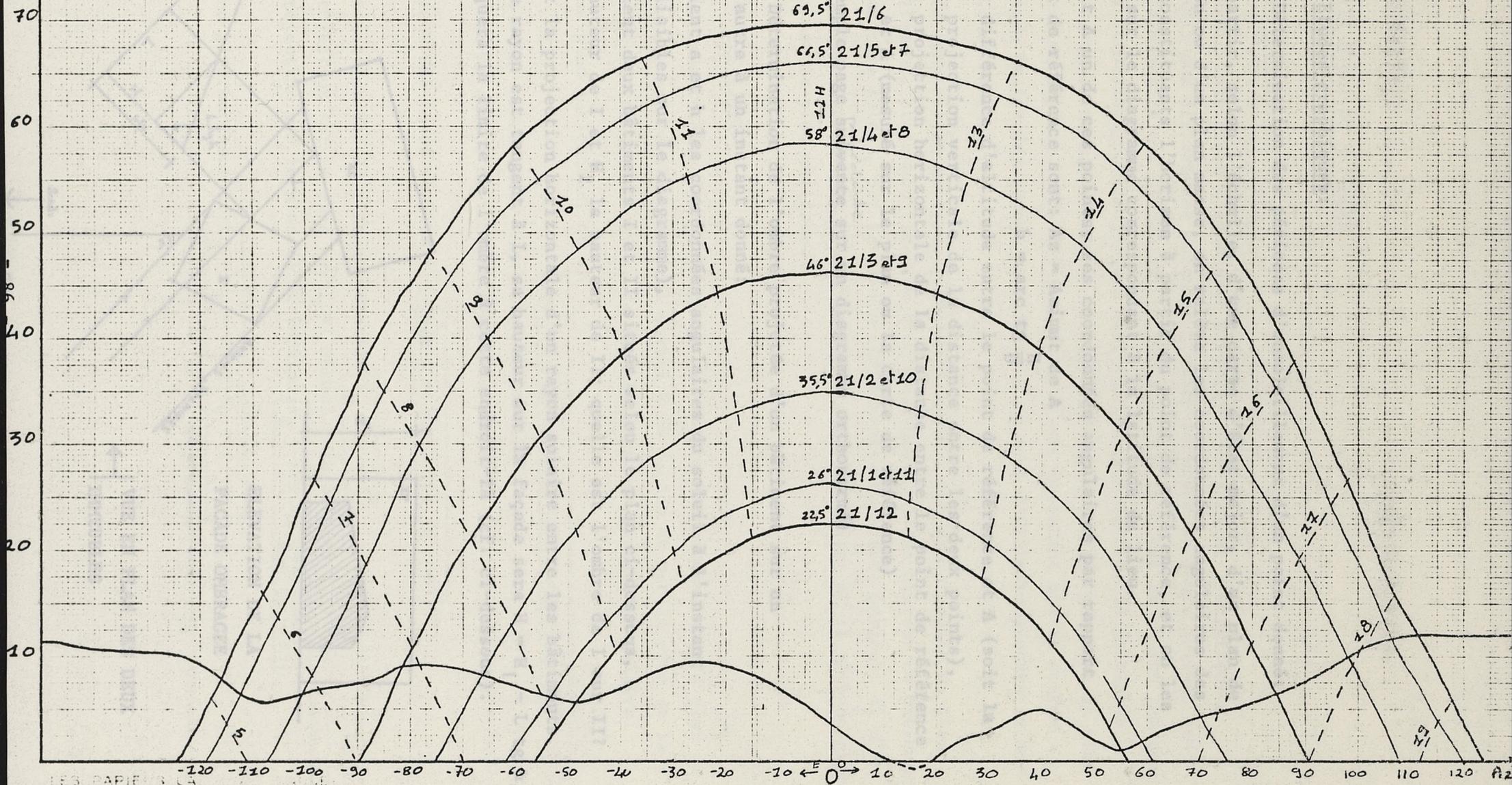


DIAGRAMME SOLAIRE SUR
REPERE CIRCULAIRE.

ETUDE DES MASQUES DUS A L'HORIZON HAUTEUR et AZIMUT DU SOLEIL EN FONCTION DE L'HEURE
 POUR LE 21 DE CHAQUE MOIS

LATITUDE 44°N.

lieu-dit "Les Estangs" BARBETON. (VAR)



2) Etudes graphiques:

a) Détermination des périodes d'ensoleillement d'un point donné:

A partir, selon l'échelle, d'une carte d'état major, d'un plan de situation ou d'un plan masse, on relève les coordonnées angulaires des points constituant l'horizon à partir du point de référence, et on les reporte sur le diagramme correspondant à la latitude du lieu.

Soit A un de ces points, ses coordonnées angulaires par rapport au point de référence sont: $Az = \text{Azimut de A}$

$$h = \text{arc tg } \frac{H}{D}$$

avec: H: différence d'altitude entre le point de référence et A (soit la projection verticale de la distance entre les deux points),

D: projection horizontale de la distance entre le point de référence et A (mesuré sur le plan ou la carte de référence)

(cf. exemple page ^{précédente} suivante sur un diagramme orthonormé)

b) Détermination de l'ombre projetée d'un bâtiment sur un autre à un instant donné:

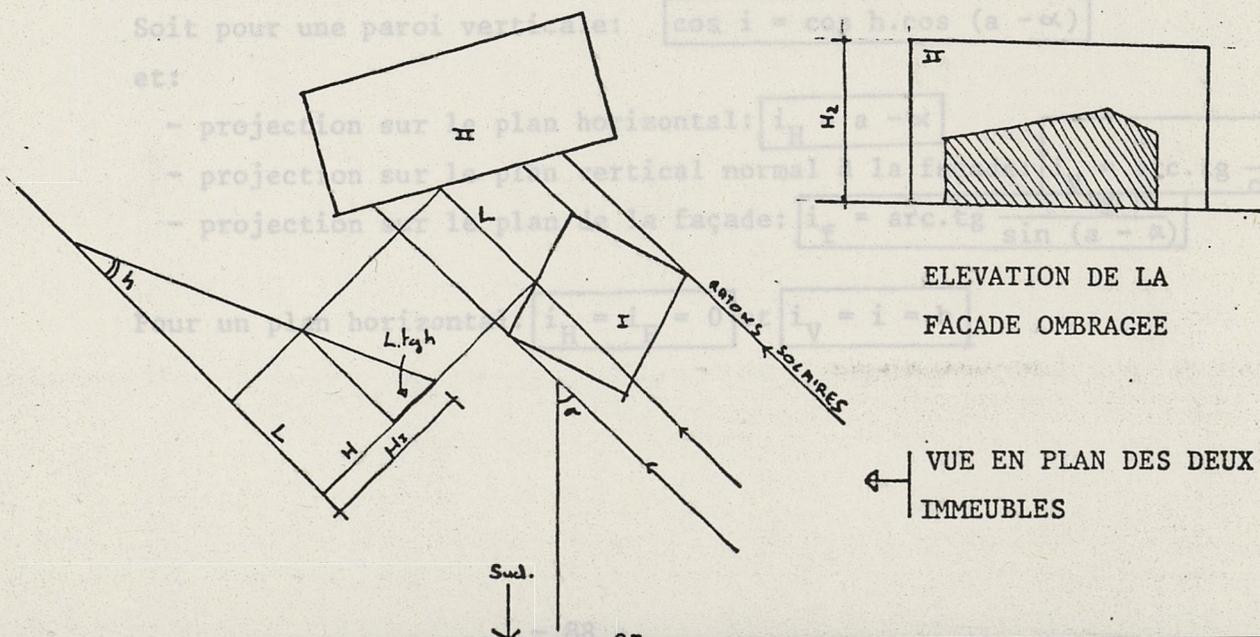
Soient a et h les coordonnées angulaires du soleil à l'instant donné (lisibles sur le diagramme),

Soient deux bâtiments I et II situés selon le plan ci-dessous,

H_1 la hauteur de I et H_2 la hauteur de II; quelle est l'ombre de I sur II?

Si L est la projection horizontale d'un rayon solaire entre les bâtiments,

et si ce rayon est tangent à I, sa hauteur sur la façade sera $H = H_1 - L \text{ tg } h$, et indiquera la limite de l'ombre à cet endroit-là (cf. ci-dessous).



III ETUDE DU BATIMENT

1) Sur maquette:

Différents types d'appareils permettent de simuler l'éclairement du soleil aux différentes dates de l'année et heure du jour. Suivant les cas, la maquette est placée sur un plateau fixe et c'est la source lumineuse qui se déplace pour se mettre dans la position désirée (à partir de repères angulaires); ou bien la source lumineuse est fixe et c'est le plateau qui se déplace. Dans les deux cas, il est important que la source lumineuse émette des rayons parallèles (on peut d'ailleurs prendre le soleil comme source).

Un appareil de ce type, l'héliodon, permet une étude rapide de l'ensoleillement, et la modification d'un plan masse, d'une hauteur de bâtiment, ou d'un pare soleil, par la vision instantanée des ombres portées. Il n'existe malheureusement en France que très peu d'héliodon, et la méthode graphique est la plus utilisée.

2) Sur plans:

La connaissance des projections de l'angle d'incidence sur le plan horizontal, sur le plan vertical normal à la façade et sur le plan de la façade permettra de choisir et de dimensionner une protection solaire:

Pour un plan quelconque, on a:

$$\cos i = \sin h \cdot \cos \beta + \cos h \cdot \cos (a - \alpha)$$

avec a et h : coordonnées angulaires du soleil,

α et β : azimut et inclinaison de la paroi.

Soit pour une paroi verticale: $\cos i = \cos h \cdot \cos (a - \alpha)$

et:

- projection sur le plan horizontal: $i_H = a - \alpha$

- projection sur le plan vertical normal à la façade: $i_V = \text{arc.tg} \frac{\text{tg } h}{\cos (a - \alpha)}$

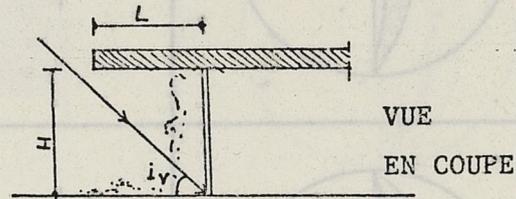
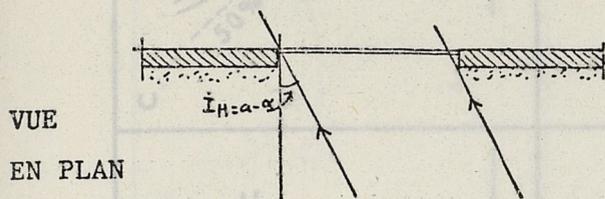
- projection sur le plan de la façade: $i_f = \text{arc.tg} \frac{\text{tg } h}{\sin (a - \alpha)}$

Pour un plan horizontal: $i_H = i_F = 0$ et $i_V = i = h$

Exemple: soit un mur vertical S-O ($\alpha = 45^\circ$ ouest) et les coordonnées du soleil: $a = 15^\circ$ ouest et $h = 45^\circ$

$$i_H = a - \alpha = 30^\circ$$

$$i_V = \text{arc.tg} \frac{\text{tg } 45^\circ}{\cos 30^\circ} = \text{arc.tg} \frac{2}{3} = 48^\circ$$



Le choix et le dimensionnement du pare soleil à partir de ces trois projections sont automatiques: lorsque $i_H < i_V$, un pare soleil vertical sera plus efficace, inversement lorsque $i_V < i_H$, c'est le pare soleil horizontal qui est plus efficace.

Dans le cas d'un pare soleil horizontal, si L est la profondeur du pare-soleil, la hauteur du mur ombragé sera :

$$H = L \cdot \text{tg } i_V$$

Inversement, si l'on veut que le mur soit entièrement ombragé, on aura:

$$L = \frac{H}{\text{tg } i_V}$$

Si l'on veut qu'il soit à moitié ombragé, on aura $L = \frac{H}{2 \text{tg } i_V}$, et ainsi de suite.

Le raisonnement est le même pour un pare-soleil vertical avec i_H .

La projection sur la façade de l'angle d'incidence permet de manière analogue de tracer l'ombre portée d'un pare soleil sur la façade.

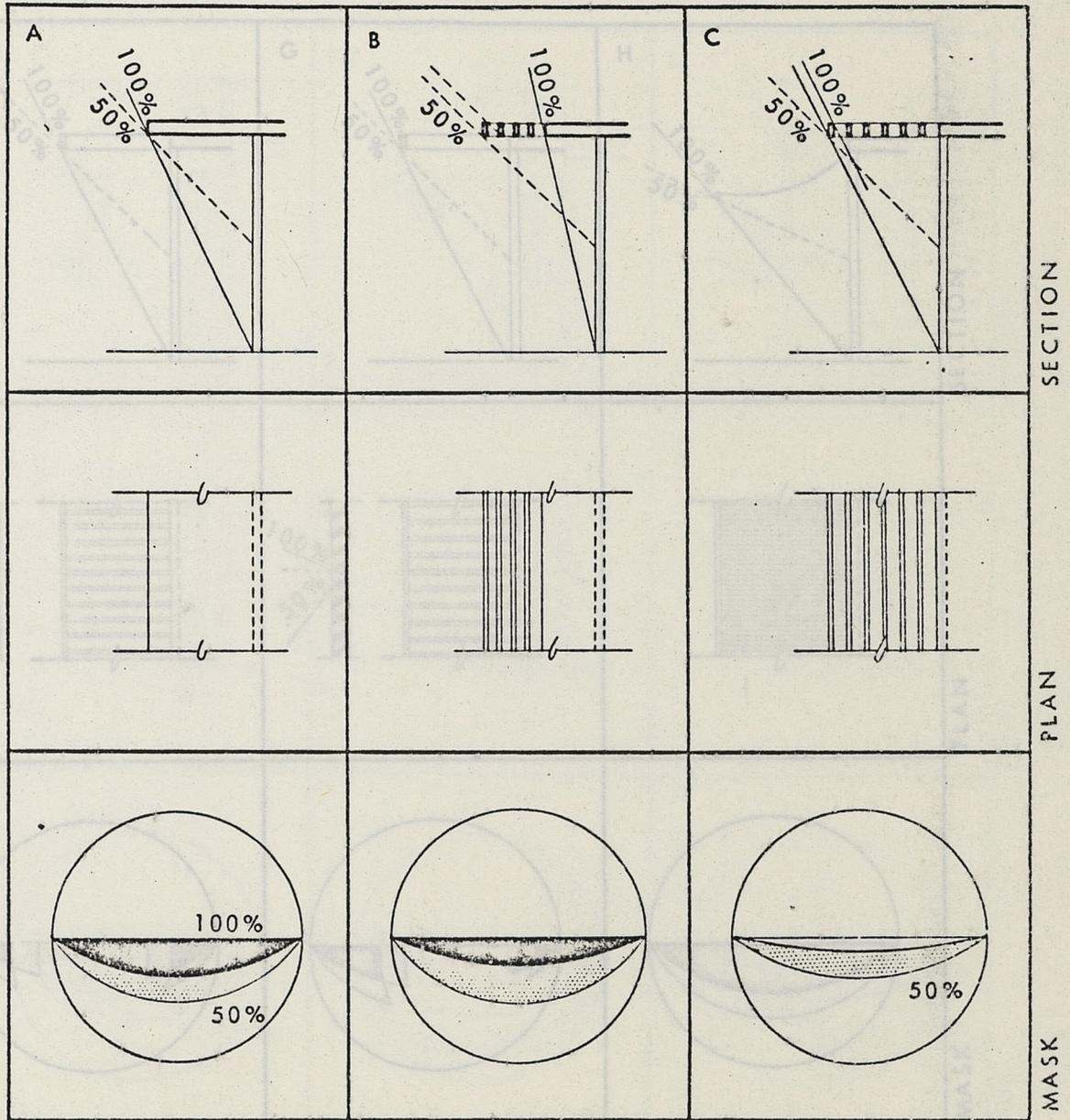
V.OLGYAY a établi une typologie des pare-soleil avec la schématisation de leurs moments d'efficacité portée sur un diagramme solaire (cf. pages suivantes)

HORIZONTAL TYPES

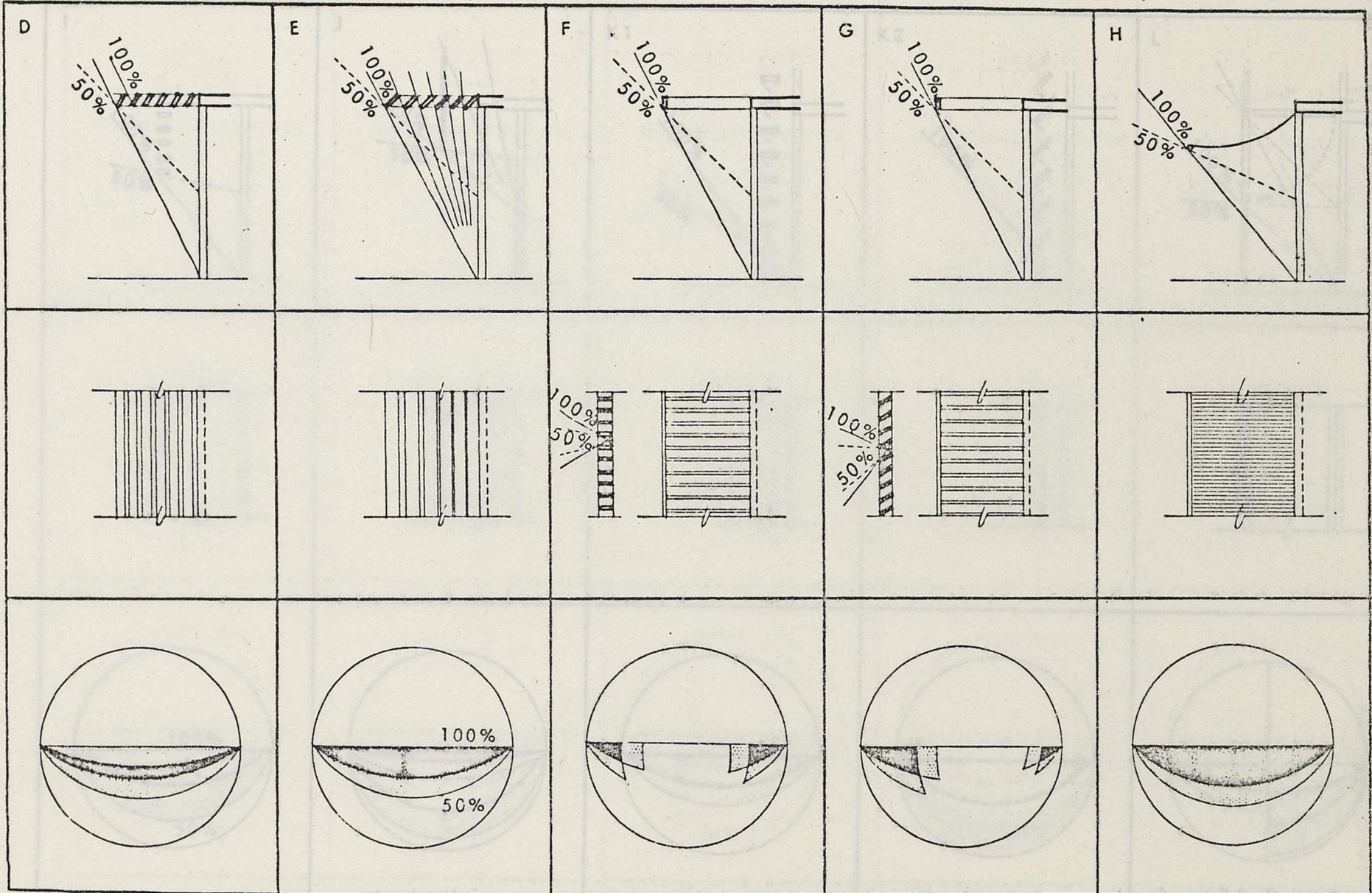
TYPOLOGIE DES PARE-SOLEIL

(V.OLGYAY) (15)

HORIZONTAL TYPES



HORIZONTAL TYPES



SECTION

PLAN

MASK

HORIZONTAL TYPES

<p>I</p>	<p>J</p>	<p>K1</p>	<p>K2</p>	<p>L</p>

SECTION

PLAN

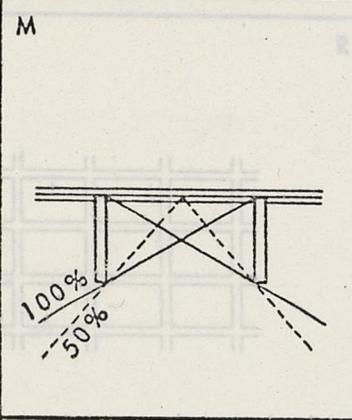
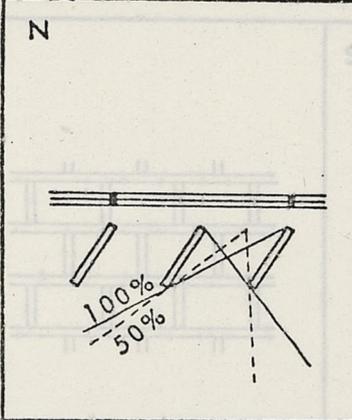
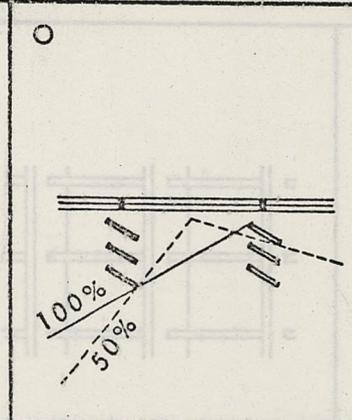
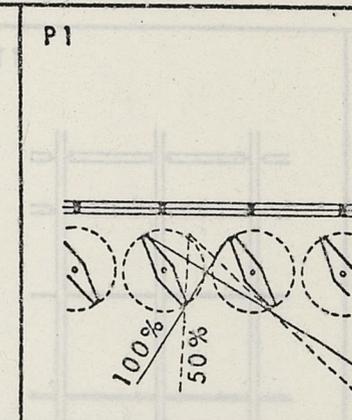
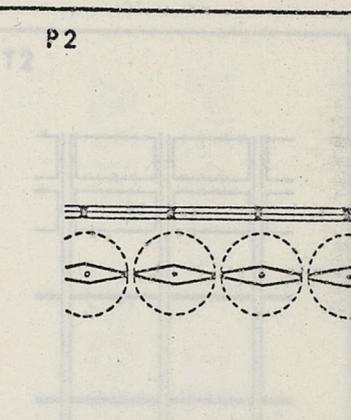
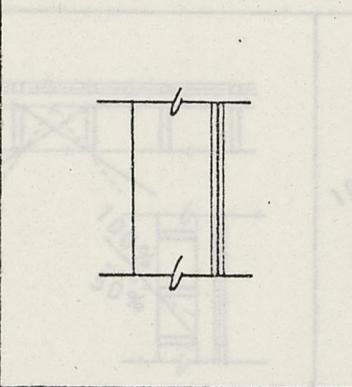
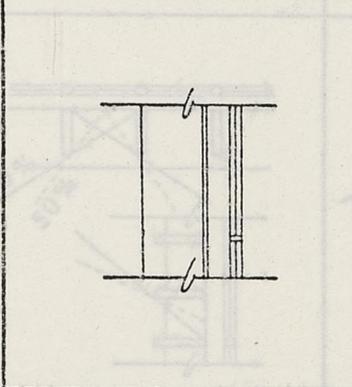
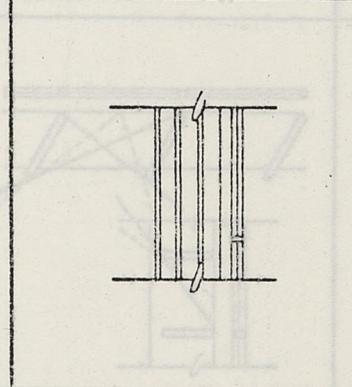
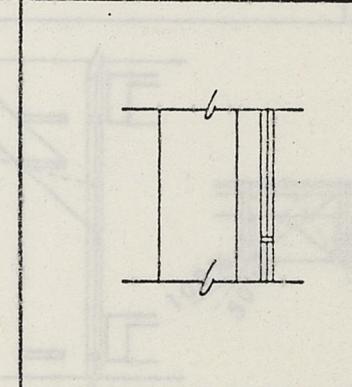
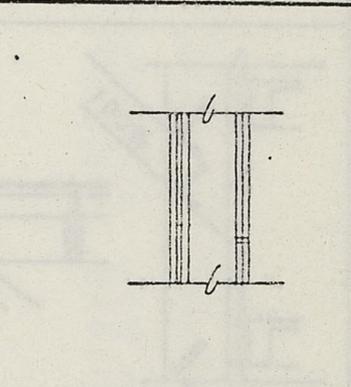
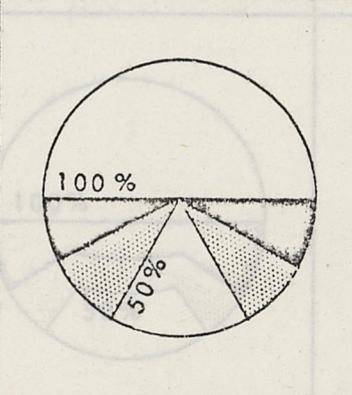
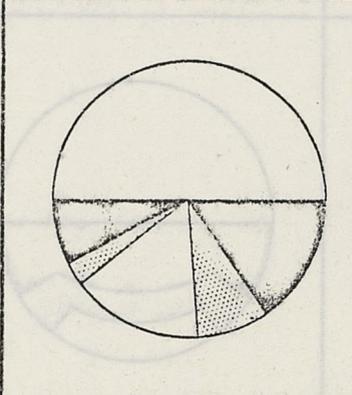
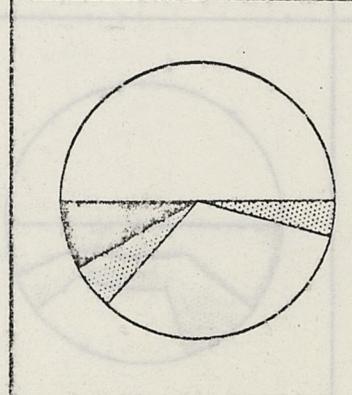
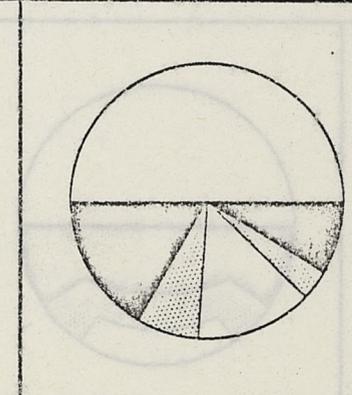
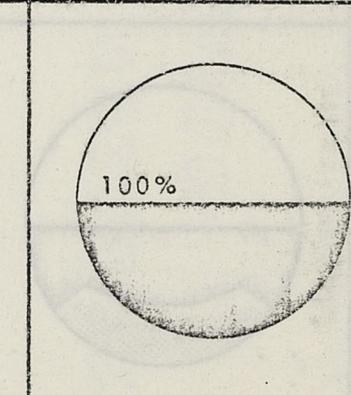
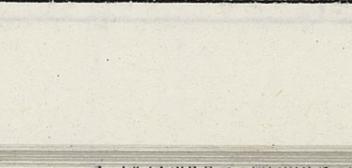
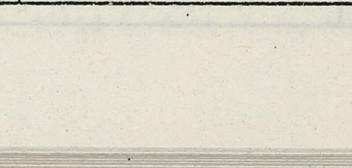
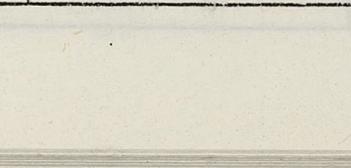
MASK

SECTION

PLAN

MASK

VERTICAL TYPES

	M	N	O	P1	P2
SECTION					
PLAN					
ELEVATION					
MASK					

SECTION

PLAN

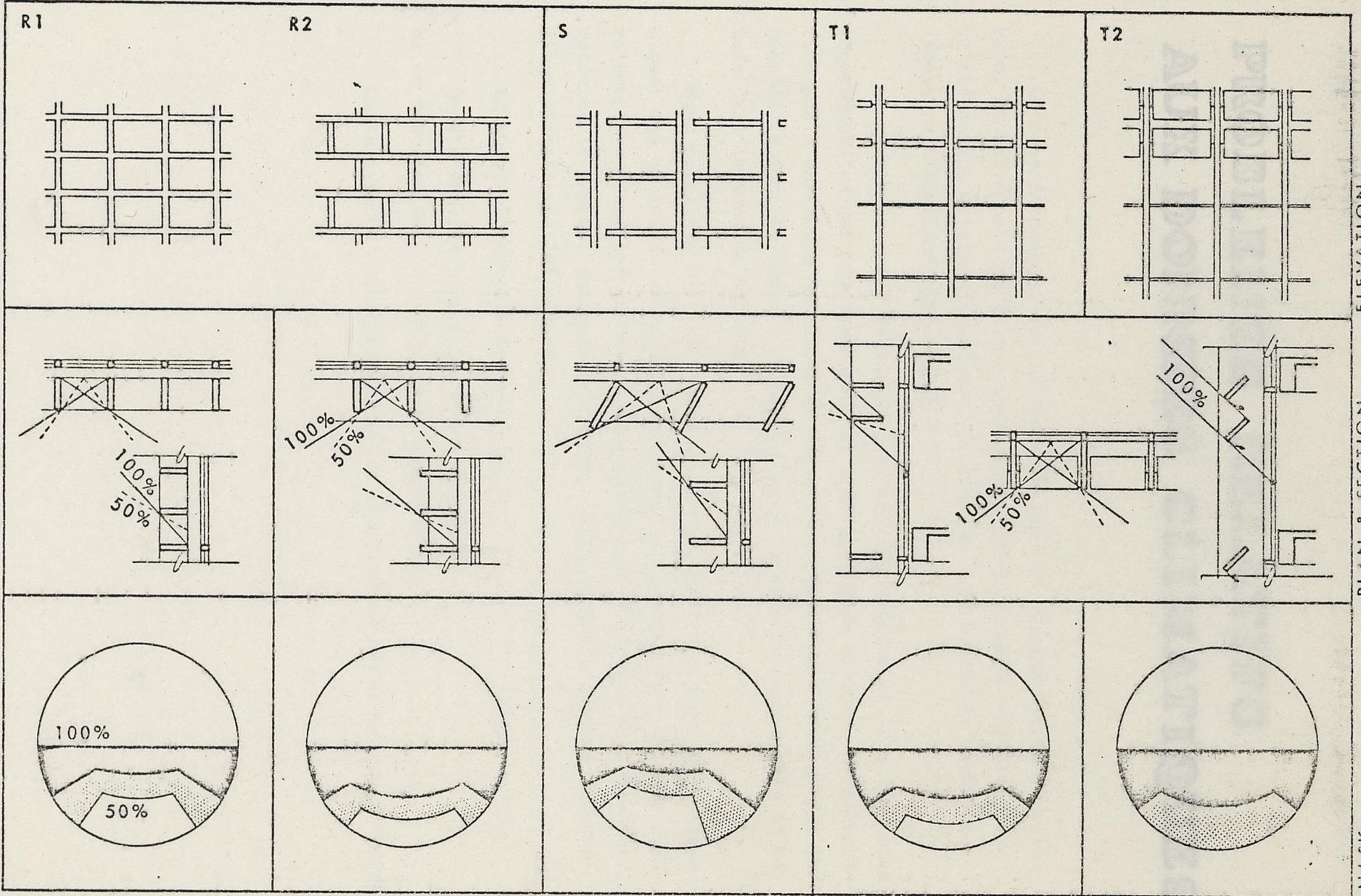
MASK

PLAN

ELEVATION

MASK

EGGCRATE TYPES



ELEVATION

PLAN & SECTION

MASK

PROBLEMES RELATIFS AUX DONNEES CLIMATIQUES

La zone de confort est caractérisée par des paramètres en corrélation, ce qui montre la nature synthétique des phénomènes climatiques, qu'ils soient originaux (ambiance climatique extérieure) ou modifiés (ambiance climatique intérieure).

Les paramètres qui définissent la zone de confort et le climat sont identiques, ce qui peut garantir une correspondance directe: transformation par l'enveloppe du climat extérieur incontrôlable et souvent en dehors de la zone de confort en une ambiance intérieure contrôlable et située dans la zone de confort.

Pour permettre à l'architecte de concevoir l'enveloppe (et sa dynamique) qui optimise les apports des énergies climatiques - et plus généralement, en fonction du climat, des conditions extérieures et des besoins, optimise le rapport chaleurs gratuites / déperditions, quelles informations climatiques lui offrir?

La question centrale devient alors:

Quelle échelle climatique est pertinente?
ou en fonction de l'échelle climatique abordée,

Quels types d'informations opérationnelles est-on en mesure de dégager?

I PROBLEME DE L'ECHELLE CLIMATIQUE

L'architecte a besoin de données climatiques à l'échelle de site sur lequel il intervient. Or, à moins de se trouver à proximité immédiate d'une station de mesures, ces données n'existent pas. Comment donc procéder?

INTRODUCTION

L'EDF par exemple, fait réaliser des campagnes de mesures sur le site.

La zone de confort est caractérisée par des paramètres en corrélation, ce qui montre la nature synthétique des phénomènes climatiques, qu'ils soient originels (ambiance climatique extérieure) ou modifiés (ambiance climatique intérieure).

Les paramètres qui définissent la zone de confort et le climat sont identiques, ce qui peut garantir une correspondance directe: transformation par l'enveloppe du climat extérieur incontrôlable et souvent en dehors de la zone de confort en une ambiance intérieure contrôlable et située dans la zone de confort.

Pour permettre à l'architecte de concevoir l'enveloppe (et sa dynamique) qui optimise les apports des énergies climatiques - et plus généralement, en fonction du climat, des conditions extérieures et des besoins - optimise le rapport chaleurs gratuites / déperditions, quelles informations climatiques lui offrir?

La question centrale devient alors:

Quelle échelle climatique est pertinente?

ou en fonction de l'échelle climatique abordée,

Quels types d'informations opérationnelles est-on en mesure de dégager?

La prise en compte de la qualité de l'étude devrait en 4 régions est très nettement insuffisante, tandis que la prise en compte des quelques 80 stations paraît démesurée eu égard à:

- l'importance des variations locales des différents paramètres qui rend inutile un maillage trop fin tant qu'on ne connaît pas parfaitement les modifications des données régionales dues à la nature du site étudié,
- l'optique de la réalisation d'un document opérationnel pour chaque région climatique qui limite leur nombre.

I PROBLEME DE L'ECHELLE CLIMATIQUE

L'architecte a besoin de données climatiques à l'échelle du site sur lequel il intervient. Or, à moins de se trouver à proximité immédiate d'une station de mesure, ces données n'existent pas. Comment donc procéder?

L'EDF par exemple, fait réaliser des campagnes de mesures sur le site même des futures barrages ou centrales (qui risquent de modifier sensiblement le climat local) en installant des stations mobiles. Cette solution est idéale, mais ce qui est possible pour EDF ne l'est pas pour tout constructeur, et le plus souvent, l'importance de l'opération ne justifie pas un tel investissement, ni en temps, ni en argent.

Nous devons donc partir, non pas des données relatives au lieu concret, mais des mesures effectuées à l'échelle régionale, éventuellement par la station la plus proche.

II PROBLEME DU MAILLAGE

Nous avons vu que, d'un point de vue climatologique pur, la France était divisée en quatre grandes régions. Pourtant, le réseau de la Météorologie Nationale comprend plusieurs centaines de stations, dont environ 80 offrent des mesures assez complètes, et ce depuis plusieurs dizaines d'années (exception faite du rayonnement pour lequel les données sont encore rares (cf §42)).

Il y a donc là une disproportion que la finalité de l'étude devrait supprimer. En effet, au regard des besoins de la thermique, la division en 4 régions est très nettement insuffisante, tandis que la prise en compte des quelques 80 stations paraît démesurée eu égard à:

- l'importance des variations locales des différents paramètres qui rend inutile un maillage trop fin tant qu'on ne connaît pas parfaitement les modifications des données régionales dues à la nature du site étudié,
- l'optique de la réalisation d'un document opérationnel pour chaque région climatique qui limite leur nombre.

III DIVISION DE LA FRANCE EN REGIONS CLIMATIQUES

Notre recherche ne portant pas sur la division de la France en régions climatiques, nous présentons ici la classification de A.FOURNOL, parue dans le cahier n°26 du CSTB (1954).

Celle-ci répond partiellement aux exigences des concepteurs et précise utilement la division "légale" de la France en trois zones pour l'hiver et trois zones pour l'été, destinée à la réglementation en matière d'isolation thermique des bâtiments*. De plus, cette classification permet une relativisation du climat étudié, donnant ainsi une meilleure image de celui-ci et des valeurs le caractérisant.

Cette étude demande à être affinée (par exemple, Calais et Villefranche de Rouergue se situent dans la même zone climatique), les connaissances tant en thermique qu'en climatologie s'étant considérablement développées, sans parler de l'utilisation de l'énergie solaire dans le bâtiment qu'on n'envisageait pas encore. Mais la méthode reste intéressante par rapport aux objectifs fixés, c'est à dire aider les maîtres d'oeuvre dans la conception thermique des bâtiments et le dimensionnement des équipements de chauffage. Le conditionnement n'existant pas à cette époque en France, il est remarquable que les solutions proposées pour l'obtention du confort d'été soient des solutions architecturales (protection solaire, ventilation naturelle, ...), alors que les solutions proposées pour le confort d'hiver concernent l'isolation, éventuellement l'inertie, mais surtout la puissance du chauffage à installer.

cf. pages suivantes: Les critères climatologiques,
Les caractéristiques des 10 climats retenus,
Le tableau résumé.

* cf. page suivante



Comme pour l'hiver, des zones d'été ont été tracées par l'UEAtc (Union Européenne pour l'Agrement technique dans la construction).

Les zones françaises établies en partant des mêmes bases sont données sur la figure . Pour des raisons de simplicité administrative, le tracé des zones françaises suit les limites des départements et les cotes d'altitude 200 et 500 mètres.

ZONES CLIMATIQUES
D'ETE zone: a b c

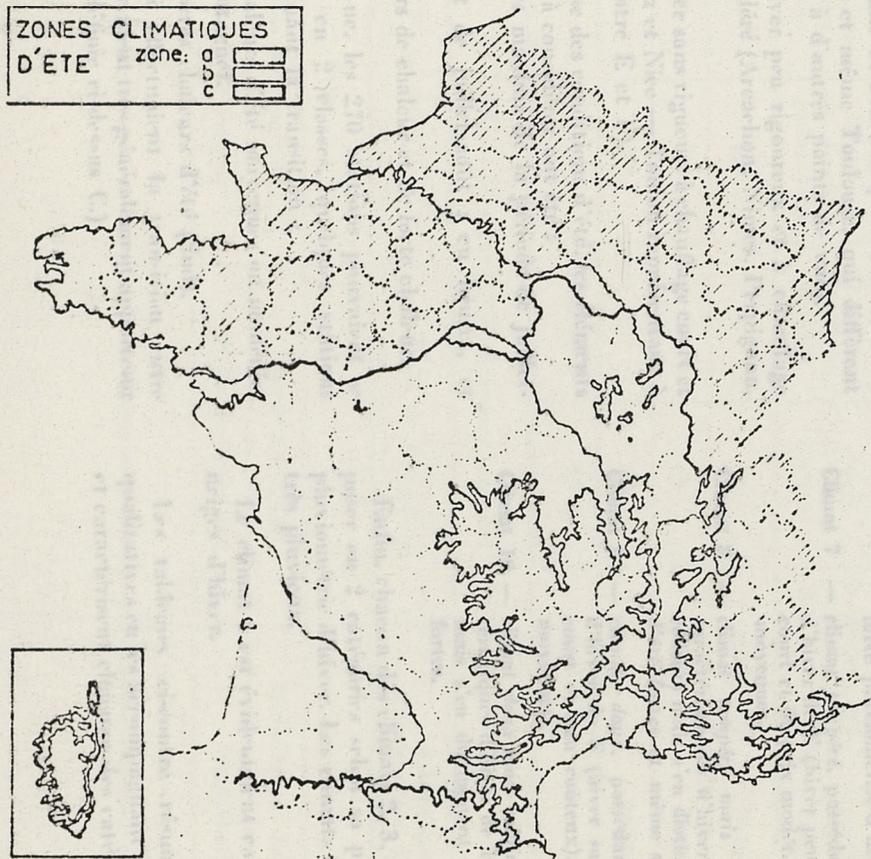


Fig.

ZONES CLIMATIQUES
D'HIVER zone: A B C

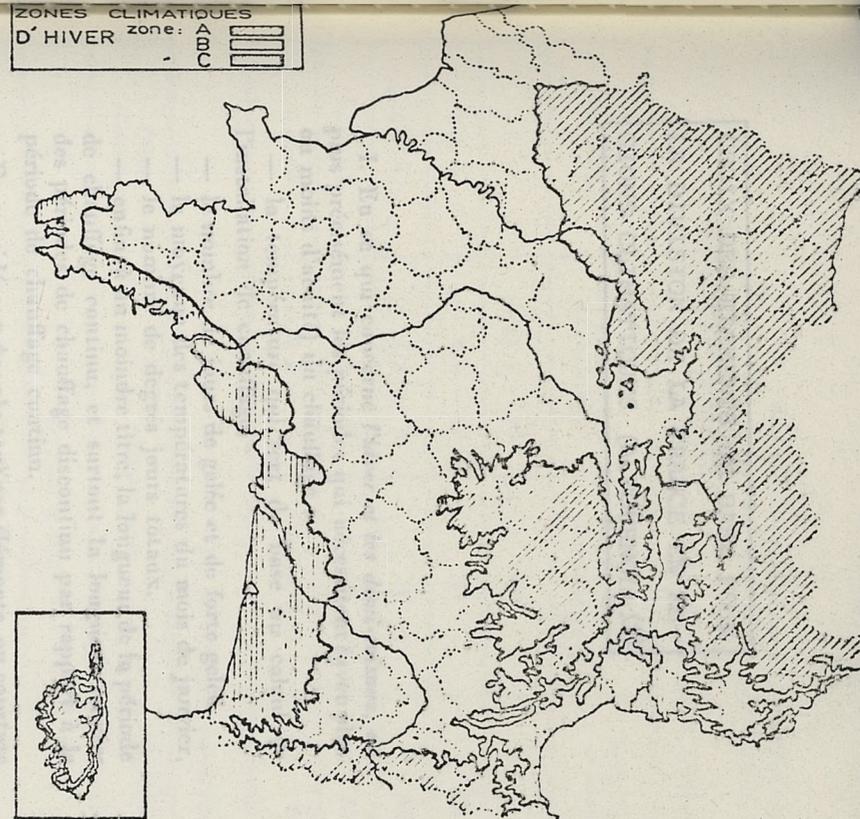


Fig.

Les températures d'exigence et de calcul sont, dans chacune de ces trois zones, égales aux valeurs suivantes :

Zone européenne.....	HI	HII	HIII	HIV	HV
Zone française	A au-dessus de 800 m	A au-dessous de 800 m	B	C	
Température d'exigence..	-19 à -29	-14 à -18	-9 à -13	-4 à -8	+1 à -3
Température de calcul..	-15 à -25	-10 à -14	-5 à -9	0 à -4	+5 à +1

CHOIX DES ELEMENTS DE BASE POUR
LA DIVISION DE LA FRANCE EN RE-
GIONS CLIMATIQUES (A. FOURNOL) (3)

I. En ce qui concerne l'hiver et les demi-saisons, ou plus précisément les périodes qui nécessitent (avec plus ou moins d'acuité) un chauffage :

- la température qui sert de base au calcul de l'installation de chauffage,
- le nombre de jours de gelée et de forte gelée,
- la moyenne des températures du mois de janvier,
- le nombre de degrés jours totaux.
- enfin, à un moindre titre, la longueur de la période de chauffage continu, et surtout la longueur relative des périodes de chauffage discontinu par rapport à la période de chauffage continu.

En considérant de près tous ces éléments, on constate que les résultats des 270 stations françaises peuvent très valablement se répartir en 6 classes dont les qualités sont à peu près les suivantes :

A. un climat à hiver très rigoureux et à chauffage long et extrêmement coûteux (Briançon).

B. un climat à hiver rigoureux et à chauffage long et très coûteux (Chaumont, Annecy, Mulhouse).

C. un climat à hiver rigoureux et à chauffage de durée moyenne, mais encore très coûteux (Clermont-Ferrand, St-Étienne, Dijon).

D. un climat à hiver de rigueur moyenne et à chauffage de durée moyenne et coûteux (Paris, mais aussi Lorient, Montélimar et même Toulouse, qui diffèrent cependant beaucoup à d'autres points de vue).

E. un climat à hiver peu rigoureux et à chauffage court et de prix modéré (Arcahon, Nîmes, Perpignan, Marseille).

F. un climat à hiver sans rigueur, à chauffage court et peu coûteux (Biarritz et Nice — Toulon représentant à peu près la limite entre E et F).

II. Du point de vue des conditions d'été, les éléments les plus intéressants à considérer ont été :

- la moyenne des maxima de la période de juillet-août.
- Penseillement de juillet-août : en heures, et surtout en énergie.
- le nombre de jours de chaleur et de forte chaleur.

De ce point de vue, les 270 stations pouvaient se répartir assez bien en 2 classes, quelques stations intermédiaires effectuant la transition :

A. un climat à chaleurs d'été moyennes ou modérées (Nord, océan et montagne).

B. un climat à fortes chaleurs d'été (Sud).

(Les stations qui effectuaient la transition entre ces 2 climats se trouvaient très généralement appartenir à la classe d'hiver définie ci-dessus C.)

III. Du point de vue des conditions d'humidité, comme nous l'avons indiqué, nous considérons que les climats E et F ci-dessus ne posent pas de problème grave d'humidité :

— d'une part parce que la saison d'hiver y est de courte durée,

— d'autre part, quelle que soit la pluviométrie, les conditions d'assèchement, même en saison froide, sont bonnes.

En ce qui concerne les autres climats, nous n'avons pu en faire qu'un classement sommaire basé sur la pluviométrie d'hiver.

Le rapprochement des distinctions I, II et III ci-dessus conduit à considérer dans l'ensemble du territoire 10 climats auxquels nous avons attribué les appellations simplifiées suivantes :

- Climat 1 — climat de *montagne*, possédant les caractéristiques d'hiver de A (hiver très rigoureux, chauffage long et extrêmement coûteux) et de faibles chaleurs d'été.
- Climat 2 — climat *rude*, possédant les caractéristiques d'hiver de B (hiver rigoureux, chauffage long et très coûteux) et des chaleurs d'été modérées ou moyennes.
- Climat 3 — climat de *transition*, possédant les caractéristiques d'hiver de C (hiver rigoureux, chauffage de durée moyenne mais encore très coûteux) et des chaleurs d'été déjà fortes.
- Climat 4 — climat *moyen* français, possédant les caractéristiques d'hiver de D (hiver de rigueur moyenne, chauffage de durée moyenne et coûteux), et des chaleurs d'été modérées ou moyennes.
- Climat 5 — climat *contrasté*, possédant les caractéristiques d'hiver de D, à peu de chose près comme le climat précédent, mais s'en distinguant notamment par des chaleurs d'été fortes.
- Climat 6 — climat *constant*, possédant les caractéristiques d'hiver de D, et des chaleurs d'été faibles, avec forte pluviométrie d'hiver.
- Climat 7 — climat *tempéré*, possédant les caractéristiques d'hiver de E (hiver peu rigoureux à chauffage court et de prix modéré), et des chaleurs d'été moyennes.
- Climat 8 — climat *tempéré mais solaire*, possédant les caractéristiques d'hiver de E (comme le précédent) mais s'en distinguant par des chaleurs d'été fortes et même très fortes.
- Climat 9 — climat *doux*, possédant les caractéristiques d'hiver de F (hiver sans rigueur à chauffage court et peu coûteux), et des chaleurs d'été moyennes.
- Climat 10 — climat *doux mais solaire*, possédant les caractéristiques d'hiver de F (comme le précédent), mais s'en distinguant par des chaleurs d'été fortes.

Enfin, chacun des climats 2, 3, 4 et 5 peut se décomposer en 2 catégories selon sa plus ou moins grande pluviométrie d'hiver. Les climats 6 et 7 sont tout entier très pluvieux.

Le climat 1 est évidemment caractérisé par de fortes neiges d'hiver.

Les tableaux ci-contre résument ces indications qualitatives en les accompagnant de chiffres qui bornent et caractérisent chacune des catégories.

I. DONNÉES NUMÉRIQUES CLIMATOLOGIQUES

CARACTÉRISTIQUES STATISTIQUES PRINCIPALES
DES 10 CLASSES CLIMATIQUES RETENUES

I. — POINTE DE L'HIVER

Classe climatique	Base des installations de chauffage	Jours de fortes gelées en moyenne	Jours de gelée en moyenne	Moyenne de Janvier	Rigueur de l'hiver (qualitatif)
1	- 13 à - 20	35		0 à - 5	extrême
2 et 3	- 9 à - 13	20	75	0 à + 3,5	rude
4 et 5	- 5 à - 9	8	50	4°	moyenne
6, 7 et 8	- 1 à - 5	2	30	5 à 8°	tempérée
9 et 10	- 1 à + 1	moins de 1	5	8 à 10°	l'hiver est doux

II. — COUT DU CHAUFFAGE

Classe climatique	Degrés jours	Appréciation qualitative : chauffage	Coefficient quantitatif moyen 1 = climat parisien
1	de 2500 à 4000	Très cher	2
2	de 1850 à 2500		1,3
3 et 4	de 1450 à 1850	Cher	1
5 et 6	de 1150 à 1500		0,8
7 et 8	de 850 à 1250	Prix modéré	0,65
9	750		0,5
10	de 350 à 850	Peu coûteux	0,4

III. — CHALEURS

Classe climatique	Moyenne Juillet Août	Moyenne des maxima Juillet Août	Jours de très fortes chaleurs	Jours de fortes chaleurs	Ensoleillement moyen Juillet Août	Appréciation qualitative Chaleurs :
1 et 6	16°	22°	0	0	4000	Modérées
2, 4, 7 et 9	19°	24°	1	8	4300	Moyennes
3	20°	26°	1	12		Assez fortes
5, 8 et 10	23°	29°	Plus de 2	25	5000	Fortes à très fortes

IV. — HUMIDITÉ (Classification provisoire)

Classe climatique	Pluies d'hiver	Pluies de demi-saison	Conditions d'évaporation d'hiver
1	Neige		
2H, 3H, 4H, 5H, 6, 7	Plus de 2 mm/jour	Plus de 2 mm/jour	Médiocres ou mauvaises
2S, 3S, 4S, 5S	Moins de 2 mm/jour	Moins de 2 mm/jour	Variables ?
8, 9, 10			Moyennes ou bonnes

IV LES DONNÉES ET LEURS PRÉSENTATIONS

1) Les données régionales:

L'échelle climatique de la région étant adoptée, il faut pour

Type et Dénomination Schématique	1 Montagne	2 Rude	3 Transition	4 Moyen	5 Contrasté	6 Constant	7 Tempéré	8 Tempéré mais solaire	9 Doux	10 Doux mais solaire
Géivité.....		-16°	-15°	-13°	-13°	-7°	-7°	-7°	-4°	-3°
Écart de base du chauffage...	35°	29°	28°	24°	24°	20°	21°	22°	19°	18°
Jours de fortes gelées T < -5.	35	20	20	10	6	1	1	3	1	< 1
Moyenne de janvier.....	-3°	+1°	+2,5°	+3,5°	+4°	+6°	+6°	+6°	+8°	+9°
Densité de flux solaire (Kcal/ m ² /j) janvier...		700		650	1 000	750		1 250	1 000	1 300
Degrès jours de chauffage.....	3 000	2 100	1 800	1 650	1 350	1 250	1 150	1 000	750	600
Longueur des demi-saisons... (en jours)	70	70	70	70	80	80	100	90	130	100
Rapport : Durée 1/2 saison Durée chauffage	1/4	1/3	1/3	1/2,5	1/2	1/2,5	2/3	2,3 à 1	1	1
Moyenne des maxima juillet-août.....	15° à 24°	24°	26°	24°	28°	22°	25°	29°	24°	28°
Jours de fortes chaleurs T > 30°.	0	7	12	5 à 8	20	1	10	25 à 40	5	10
Densité de flux solaire (K cal/ m ² /j) juillet-août		4 000		4 000	4 500	4 000		5 000	4 300	5 500

I. DONNÉES NUMÉRIQUES CLIMATOLOGIQUES

IV LES DONNEES ET LEURS PRESENTATIONS

1) Les données régionales:

L'échelle climatique de la région étant adoptée, il faut pour chacune de celles-ci: - déterminer les valeurs des différents paramètres
- quantifier, quand elles sont sensibles, les modifications locales.

Deux méthodes sont possible pour la détermination des données régionales:

a) Prendre les données relatives à toutes les stations incluses dans le périmètre étudié et établir des "valeurs moyennes" pour la région. Cette méthode offre l'avantage de n'être sûrement jamais très loin de la réalité, mais aussi l'inconvénient de ne sûrement jamais l'atteindre, une moyenne étant, par définition, abstraite.

b) Prendre une station de référence et subdiviser la région en sous-régions affectées de coefficients de variations pour les différents paramètres. Cette méthode peut être très fine sous réserve que:

- les données de base soient fiables, c'est à dire que:

- les mesures soient faites très soigneusement dans la station choisie (en particulier fiabilité et bon entretien des appareils de mesure),
- les séries de mesures portent sur des périodes assez longues.

- qu'elles soient comparables, c'est à dire que:

- les conditions dans lesquelles sont faites ces mesures soient parfaitement connues (emplacement des appareils, nature de l'environnement, méthode et périodicité des relevés, méthode de calcul des moyennes, ...),
- que l'influence de la nature d'un site sur les différents paramètres soit quantifiable avec la même précision que celle obtenue pour les mesures de base (ce qui n'est pas encore le cas).

Ainsi, nous pensons que l'on peut être moins fin au niveau du maillage des réseaux de mesure si l'on est plus fin au niveau climatique local et topoclimatique, c'est à dire si l'on peut caractériser le lieu concret étudié par comparaison avec le lieu de mesure (cf. le tableau synoptique ci-dessous).

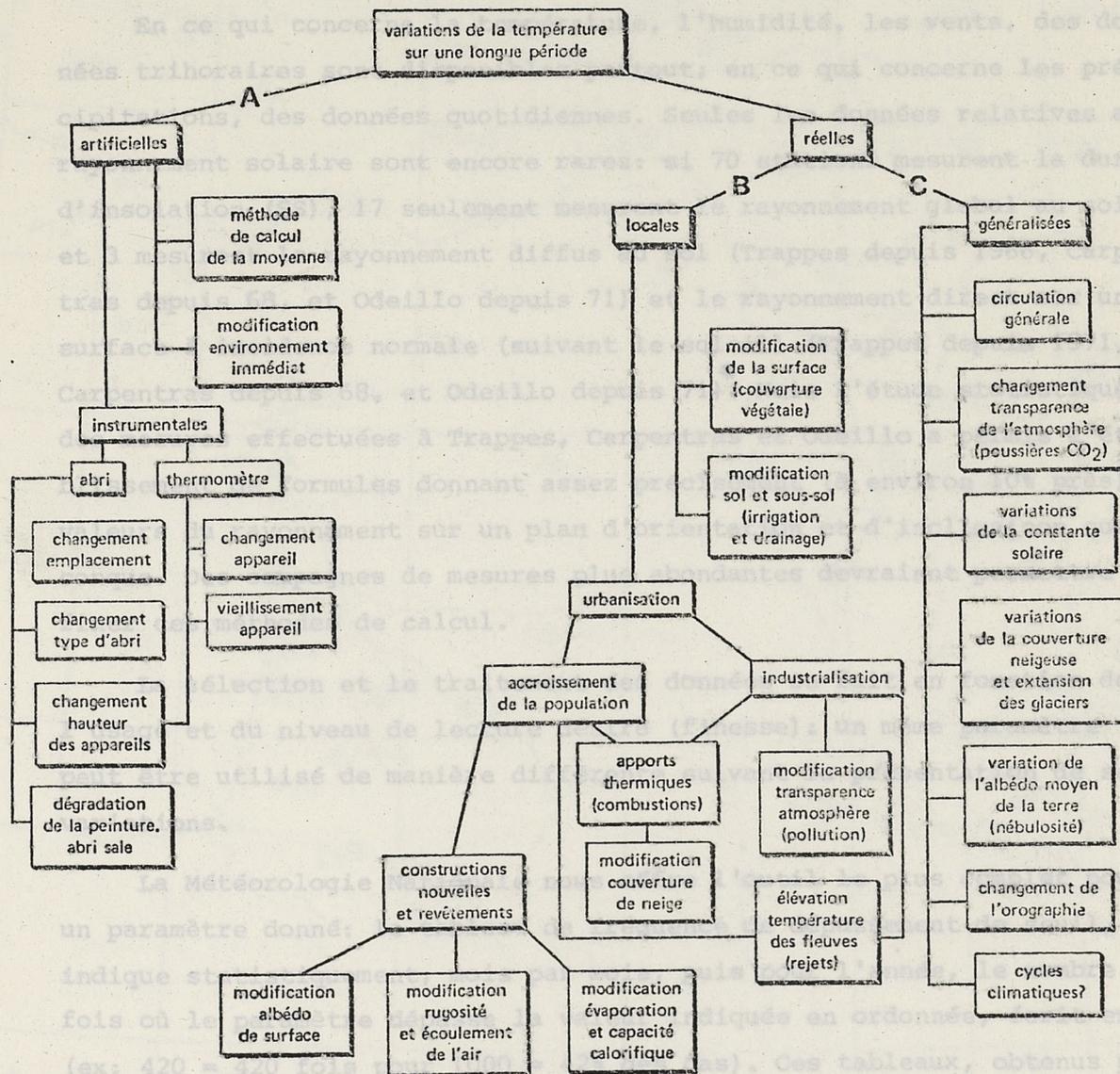


Tableau synoptique résumé des causes possibles des variations de la température moyenne sous abri
(Adapté de J. Murray Mitchell) (7)

2) Leur présentation:

L'abondance des données disponibles pour chaque station impose un traitement, une sélection et un mode de présentation adapté à leur utilisation (rappelons que la Météorologie Nationale dépend du Secrétariat d'Etat aux Transports, et que sa mission première était le renseignement pour l'aviation).

En ce qui concerne la température, l'humidité, les vents, des données trihoraires sont disponibles partout; en ce qui concerne les précipitations, des données quotidiennes. Seules les données relatives au rayonnement solaire sont encore rares: si 70 stations mesurent la durée d'insolation (SS), 17 seulement mesurent le rayonnement global au sol (\bar{G}), et 3 mesurent le rayonnement diffus au sol (Trappes depuis 1966, Carpentras depuis 68, et Odeillo depuis 71) et le rayonnement direct sur une surface à incidence normale (suivant le soleil) (Trappes depuis 1971, Carpentras depuis 68, et Odeillo depuis 71)*. Mais l'étude statistique des mesures effectuées à Trappes, Carpentras et Odeillo a permis l'établissement de formules donnant assez précisément (à environ 10% près) les valeurs du rayonnement sur un plan d'orientation et d'inclinaison quelconque. Des campagnes de mesures plus abondantes devraient permettre d'affiner ces méthodes de calcul.

La sélection et le traitement des données se fait en fonction de l'usage et du niveau de lecture désiré (finesse): un même paramètre peut être utilisé de manière différente suivant la présentation de ses variations.

La Météorologie Nationale nous offre l'outil le plus complet pour un paramètre donné: le tableau de fréquence de dépassement de seuil, qui indique statistiquement, mois par mois, puis pour l'année, le nombre de fois où le paramètre dépasse la valeur indiquée en ordonnée, écrit en % (ex: 420 = 420 fois pour 1000 = 42% des cas). Ces tableaux, obtenus par traitement informatique des données brutes, indiquent en outre les valeurs moyennes, minimums et maximums, les médianes (valeur pour laquelle la fréquence de dépassement est de 50%, c'est à dire autant de valeurs au dessus qu'au dessous) et les quintiles: 1er quintile, fréquence de dépassement de 20%, 2ème 40%, 3ème 60% et 4ème 80%. (cf. p.143)

*cf carte page suivante.

N.B. Les périodes d'observations correspondent ici aux périodes exploitables (peu de données manquantes).

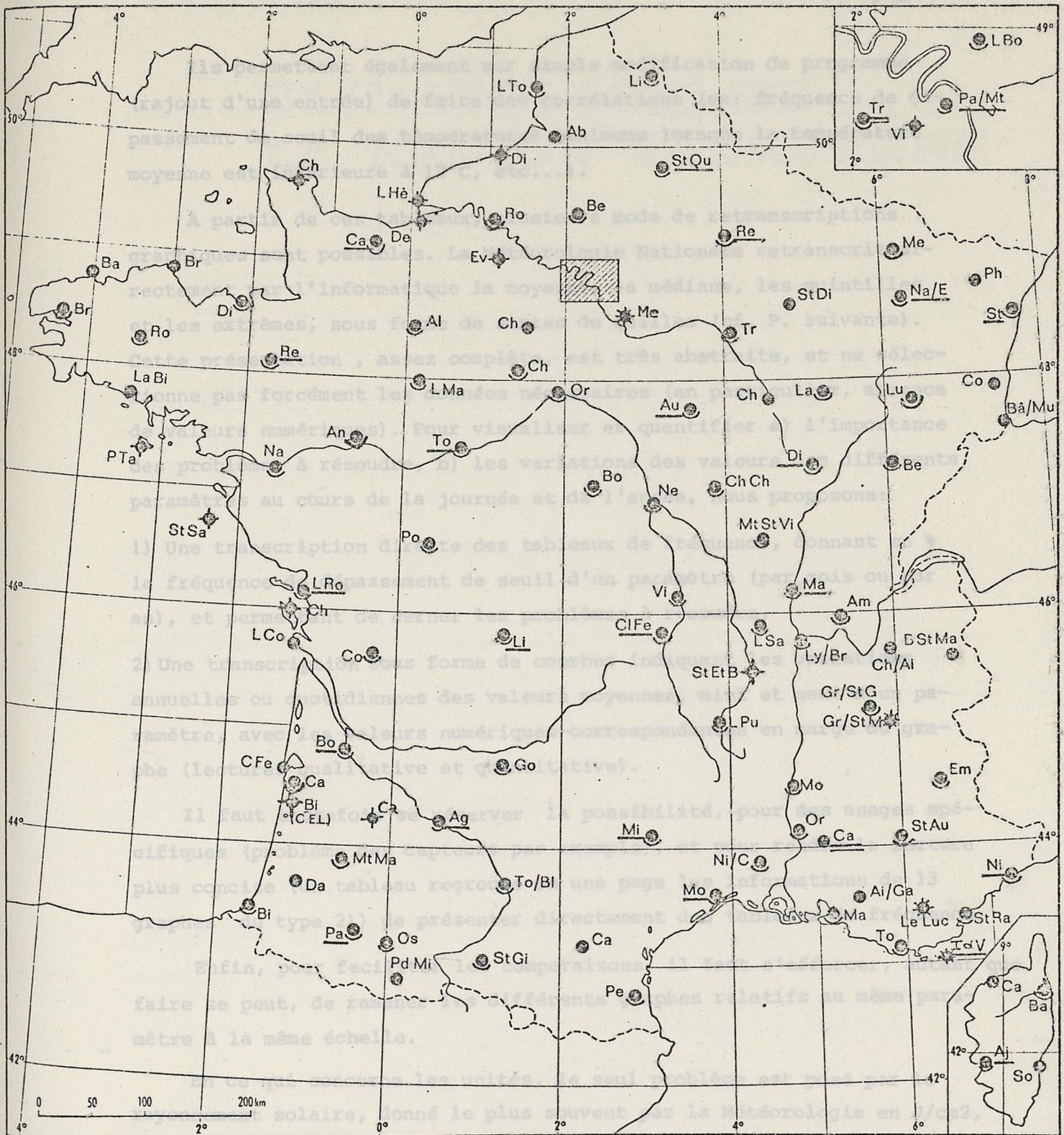
la carte indique les stations effectuant les mesures régulièrement en 1977, et aux autres stations ayant effectué des mesures.

RÉSEAU INSTRUMENTAL (16)

Héliographes

Pyranomètres et Intégrateurs

1977



- Durée de l'insolation:
- .plus de 20 ans d'observations.
 - .entre 10 et 20 ans d'observations.
 - ◆ .moins de 10 ans d'observations.
 - ★ .moins de 5 ans d'observations.

Rayonnement global : Stations soulignées d'un trait.

Rayonnement global, diffus et direct : Stations soulignées de deux traits.

N.B. Les périodes d'observations correspondent ici aux périodes exploitables (peu de données manquantes).

- la carte indique les stations effectuant les mesures régulièrement en 1977 et non toutes les stations ayant effectué des mesures.

I. DONNÉES NUMÉRIQUES CLIMATOLOGIQUES

Ils permettent également sur simple modification de programme (rajout d'une entrée) de faire des corrélations (ex: fréquence de dépassement de seuil des températures maximums lorsque la température moyenne est inférieure à 12°C, etc...).

A partir de ces tableaux, plusieurs mode de retranscriptions graphiques sont possibles. La Météorologie Nationale retranscrit directement par l'informatique la moyenne, la médiane, les quintiles et les extrêmes, sous forme de sortes de quilles (cf. P. suivante). Cette présentation, assez complète, est très abstraite, et ne sélectionne pas forcément les données nécessaires (en particulier, absence de valeurs numériques). Pour visualiser et quantifier a) l'importance des problèmes à résoudre, b) les variations des valeurs des différents paramètres au cours de la journée et de l'année, nous proposons:

- 1) Une transcription directe des tableaux de fréquence, donnant en % la fréquence de dépassement de seuil d'un paramètre (par mois ou par an), et permettant de cerner les problèmes à résoudre,
- 2) Une transcription sous forme de courbes indiquant les variations annuelles ou quotidiennes des valeurs moyennes, mini et maxi d'un paramètre, avec les valeurs numériques correspondantes en marge du graphe (lectures qualitative et quantitative).

Il faut toutefois se réserver la possibilité, pour des usages spécifiques (problème des capteurs par exemple), et pour rendre la lecture plus concise (un tableau regroupe en une page les informations de 13 graphes du type 2)) de présenter directement des tableaux de fréquence.

Enfin, pour faciliter les comparaisons, il faut s'efforcer, autant que faire se peut, de ramener les différents graphes relatifs au même paramètre à la même échelle.

En ce qui concerne les unités, le seul problème est posé par le rayonnement solaire, donné le plus souvent par la Météorologie en J/cm², et utilisé en thermique en wh/m². Il faudrait donc, ou établir une table de conversion, ou mieux, convertir préalablement les données.

I. DONNÉES NUMÉRIQUES. CLIMATOLOGIQUES

CLIMATOLOGIE DE LA REGION PARISIENNE

- océaniques et continentales d'autre part, dues aux flux zonaux.

L'alternance et l'interaction de ces influences, ainsi que l'aisance qui en découle, sont les premières caractéristiques de ce climat.

Dans la classification zonale, c'est à dire à l'échelle de la planète, c'est un climat tempéré moyen, sans extrêmes notables:

- quasiment aucun jour de grand froid ($T_{\min} < -15^{\circ}\text{C}$) - moins de 0,14, soit moins de 0,2 jour/an en moyenne - et de très grande chaleur ($T_{\max} < 30^{\circ}\text{C}$) - moins de 8%, soit moins de 2,75 jour/an en moyenne.
- température moyenne annuelle: $10,1^{\circ}\text{C}$; 97% des températures comprises entre -5°C et $+25^{\circ}\text{C}$.
- amplitudes des températures quotidiennes variant de 5°C en hiver à 10°C en été.
- précipitations régulières au cours de l'année: 613 mm répartis sur 190 jours de pluies.
- durée moyenne d'insolation entre 1650 et 1750 heures/an
- Rayonnement global moyen reçu par une surface horizontale: 3 Kwh/jour.
- vents réguliers au cours de l'année, à dominante Sud-Ouest; vitesse moyenne entre 3 et 4 m/s.
- Humidité absolue quotidienne moyenne comprise entre 7 et 15 mb.

II DIVISION DE L'ANNEE EN SAISONS

Les variations des humidités absolues et relatives, ainsi que des précipitations, n'étant pas caractéristiques au cours de l'année, nous retiendrons les paramètres températures et ensoleillement (durée d'insolation et irradiations) pour la caractérisation des saisons (d'autant que du point de vue du comportement hygrothermique des bâtiments qui nous intéresse, ces deux paramètres sont déterminant).

I CARACTERISTIQUES GENERALES DU CLIMAT

Le bassin parisien se trouve au carrefour de plusieurs influences contradictoires: - polaires et tropicales d'une part, dues aux mouvements méridiens des masses d'air correspondant pour la saison chaude, - océaniques et continentales d'autre part, dues aux flux zonaux. novembre d'autre part.

L'alternance et l'interaction de ces influences, ainsi que l'aléatoire qui en découle, sont les premières caractéristiques de ce climat.

Dans la classification zonale, c'est à dire à l'échelle de la planète, c'est un climat tempéré moyen, sans extrêmes notables:

- quasiment aucun jour de grand froid ($T_{\min} < -15^{\circ}\text{C}$) - moins de 0,1%, soit moins de 0,2 jour/an en moyenne - et de très grande chaleur ($T_{\max} < 30^{\circ}\text{C}$)
- moins de 8%, soit moins de 2,75 jour/an en moyenne.
- température moyenne annuelle: $10,1^{\circ}\text{C}$; 97% des températures comprises entre -5°C et $+25^{\circ}\text{C}$.
- amplitudes des températures quotidiennes variant de 5°C en hiver à 10°C en été.
- précipitations régulières au cours de l'année: 613 mm répartis sur 190 jours de pluies.
- durée moyenne d'insolation entre 1650 et 1750 heures/an
- Rayonnement global moyen reçu par une surface horizontale: 3 Kwh/jour.
- vents réguliers au cours de l'année, à dominante Sud-Ouest; vitesse moyenne entre 3 et 4 m/s.
- Humidité absolue quotidienne moyenne comprise entre 7 et 15 mb.

II DIVISION DE L'ANNEE EN SAISONS

La durée astronomique du jour passe par un minimum le 21 décembre (8h). On n'... Les variations des humidités absolues et relatives, ainsi que des précipitations, n'étant pas caractéristiques au cours de l'année, nous retiendrons les paramètres températures et ensoleillement (durée d'insolation et irradiations) pour la caractérisation des saisons (d'autant que du point de vue du comportement hygrothermique des bâtiments qui nous intéresse, ces deux paramètres sont déterminant).

I. DONNÉES NUMÉRIQUES CLIMATOLOGIQUES

L'observation des graphes nous montre:

- 1) les mois extrêmes, c'est à dire janvier pour la saison froide, juillet et août pour la saison chaude,
- 2) les mois adjacents se rattachant à ces saisons: décembre et février pour la saison froide, juin et septembre pour la saison chaude,
- 3) les mois de transition: mars - avril - mai d'une part, octobre - novembre d'autre part.

Nous définissons ainsi quatre saisons de durées inégales:

L'hiver, décembre, janvier, février,

Le printemps: mars, avril, mai,

L'été, juin, juillet, août, septembre

L'automne: octobre, novembre.

III CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES SAISONS

1) L'HIVER (décembre - janvier - février):

Dominé par les influences océaniques, l'hiver en région parisienne est en général peu rigoureux. Cependant, par période, des vagues de froid d'origine continentale persistent pendant plusieurs jours (essentielle-ment en janvier et février). Et, si les grands froids restent exceptionnels, il n'est pas rare de voir des jours avec fortes gelées ($T_{\min} \leq -5^{\circ}\text{C}$) dans la campagne parisienne.

Cette saison s'installe dès le mois de décembre avec l'apparition des premières journées sans dégel (≈ 10 jours), et une nette augmentation des gelées sous abri qui passent par un maximum en janvier (≈ 15 jours). Toutefois, il n'est pas rare d'avoir un mois de février plus froid que le mois de janvier, ce qui le rattache à l'hiver. Les amplitudes thermiques sont en générale les plus faibles de l'année ($\approx 5^{\circ}\text{C}$).

La durée astronomique du jour passe par un minimum le 21 décembre (8h). On note un nombre important de journées avec des faibles fractions d'insolation (en décembre et janvier, plus de 50% des jours $\sigma < 5\%$), nombre qui diminue au mois de février.

L'hiver est en général pluvieux (maximum de jours avec précipitations en décembre - 19), la neige, occasionnelle, tombant principalement en jan-

L. DONNERS. NOMBRES CLIMATOLOGIQUES

vier et février (≈ 5 jours/mois). Les brouillards, fréquents en décembre (≈ 10 jours) diminuent progressivement jusqu'en février (6,7 jours).

Le mois de janvier est celui qui réalise le mieux les traits essentiels de l'hiver en région parisienne: il caractérisera cette saison.

2) LE PRINTEMPS (mars - avril - mai):

Saison de transition par excellence, le printemps se caractérise essentiellement par la variation continue des différents phénomènes et paramètres de la saison d'hiver à la saison d'été. Mars et mai étant "à cheval" respectivement sur l'hiver et sur l'été, c'est le mois d'avril qui caractérise le mieux cette saison.

Elle se distingue sur le plan thermique par une forte croissance des températures maximales (de 10 à 15°C), minimales (de 3 à 8°C) et moyennes (de 6,2 à 12,5°C), ainsi que des amplitudes thermiques (de 8 à 10°C). On note la quasi disparition des journées sans dégel. Les dernières gelées sous abri se produisent en général avant la dernière décade d'avril. Le mois de mai, bien que conservant les caractéristiques générales du printemps, voit l'apparition des premières chaleurs qui nous mènent à l'été.

La durée astronomique du jour - en augmentation rapide - devient supérieure à celle de la nuit, et les jours de faibles durées d'insolation deviennent moins fréquents qu'en hiver (augmentation simultanée de la durée du jour et de la fraction d'insolation).

Sur le plan des hygrométéores, les jours avec précipitations diminuent (15 jours en avril), alors que les jours avec orages deviennent progressivement moins rares (1,3 jour/mois). C'est la saison où les chutes de grêle sont les plus fréquentes (avec un maximum en avril, 1 jour en moyenne). Les brouillards et les chutes de neige disparaissent rapidement dès le mois d'avril (2,5 et 1 jours).

3) L'ETE (juin - juillet - août - septembre):

En région parisienne, l'été, sous l'influence océanique, reste relativement doux en comparaison des fortes chaleurs continentales ou méditerranéennes. Toutefois, certaines années, cette saison prend un caractère chaud et sec, et la chaleur persiste alors pendant plusieurs jours.

I. DONNÉES NUMÉRIQUES CLIMATOLOGIQUES

Le mois de juillet, souvent le plus chaud de l'année ($T_{\text{moy}} = 17^{\circ}\text{C}$, plus de 8 jours où $T_{\text{max}} \geq 25^{\circ}\text{C}$), caractérise le mieux les conditions climatiques de l'été parisien, bien que le mois d'août lui soit en général proche. Si, par ses conditions astronomiques, le mois de septembre se rattache à l'automne, il est très semblable sur le plan thermique ($T_{\text{moy}} = 15,2^{\circ}\text{C}$, jours de chaleur, de forte chaleur, ...) au mois de juin. Aussi est-il inclus dans les mois d'été.

L'été est la saison où la durée astronomique du jour passe par un maximum le 21 juin (16h). C'est aussi la période où les fractions d'insolation sont les plus fortes de l'année ($\approx 45\%$)

C'est la saison où le nombre de jours de pluie est le plus faible, ≈ 14 jours/mois, ce qui est encore relativement élevé. C'est également le moment où les orages sont les plus fréquents, le maximum d'orages ayant lieu en juin (3 jours en moyenne).

4) L'AUTOMNE (octobre - novembre):

Le mois de septembre étant rattaché à l'été, l'automne parisien se trouve considérablement écourté. Le mois de novembre annonçant déjà l'hiver, c'est le mois d'octobre qui traduit le mieux les phénomènes de transition de l'été vers l'hiver.

Les températures baissent rapidement, qu'elles soient maximales (de 15 à 9°C), minimales (de 7 à $3,5^{\circ}\text{C}$), ou moyennes (de $6,2$ à $3,7^{\circ}\text{C}$). On note la disparition des jours de chaleur ($T_{\text{max}} \geq 25^{\circ}\text{C}$). Les premières gelées sous abri peuvent se produire dès le tout début du mois de novembre. Toutefois, le froid n'est pas suffisamment installé pour que l'on note des périodes sans dégel.

Du point de vue des durées d'insolation, le mois de novembre marque une nette aggravation sur le mois d'octobre (de 38 à 22%). C'est aussi la saison où la nuit commence à l'emporter sur le jour.

On note une recrudescence des brouillards - avec un maximum en octobre ($9,5$ jours) à égalité avec décembre - et du nombre de jours de pluie ($18,5$ jours en décembre). Notons enfin que la neige peut occasionnellement faire son apparition dès le mois de novembre.

DONNEES CLIMATOLOGIQUES

STATION DE PARIS--TRAPPES

Latitude: 48,5°

Longitude: 2°

Altitude: 167 mètres

0 CLIMATOLOGIE GENERALE

C₀: Données numériques climatologiques

I TEMPERATURES

T0: Fréquence horaire cumulée des températures extérieures

T1: Variations annuelles et moyennes mensuelles des températures mini, moyennes et maxi, et des amplitudes quotidiennes

T2: Fréquence relative annuelle et nombre moyen, mini et maxi où les températures moyennes, mini et maxi dépassent certains seuils

T3: Variation diurne de la température (moyennes)

II RAYONNEMENT

R0: Méthode de calcul et d'estimation des différentes composantes du rayonnement

R1: Variation annuelle de l'irradiation solaire globale: moyennes quotidiennes reçues sur une surface plane orientée au sud suivant certaines inclinaisons

R2: Variation annuelle de l'irradiation solaire globale: moyennes quotidiennes reçues sur une surface plane verticale suivant certaines orientations

R3: Durée et fraction d'insolation: moyennes quotidiennes;
Irradiation solaire globale: moyennes quotidiennes sur différents plans

R4 à R9 : Irradiation solaire globale: moyennes quotidiennes sur une surface plane suivant son orientation et son inclinaison

R10 à R13: Eclairement solaire direct moyen sur une surface verticale plane selon son orientation: variation diurne

R14 - R15: Distribution des valeurs quotidiennes du rayonnement global reçu sur une surface horizontale au cours de jours consécutifs

R16: Déphasage entre l'éclairement direct moyen reçu par des surfaces verticales et la température

II bis: GEOMETRIE SOLAIRE

G1: Diagramme solaire; durée du jour par décade

G2: Correction du temps à appliquer au temps universel (TU) pour avoir le temps solaire vrai (TSV)

DONNEES NUMERIQUES CLIMATOLOGIQUES I

III VENTS

V1: Fréquences moyennes annuelles des directions du vent par groupes de vitesses

V2: Fréquences moyennes mensuelles des directions du vent par groupes de vitesses

IV HUMIDITE - PRECIPITATIONS

H1: Fréquence relative annuelle et nombre moyen, mini et maxi au cours desquels

on a observé: grêle, grésil, neige, brouillard, orage, pluie

.Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations, hauteur maxi en 24 heures et nombre moyen mensuel de jours avec précipitations

.Humidité relative: moyennes mensuelles des mini, moyennes et maxi quotidiens

H2: Humidité absolue: tableau de fréquence de dépassement de seuil des tensions de vapeur avec la température de rosée correspondante.

DONNEES NUMERIQUES CLIMATOLOGIQUES

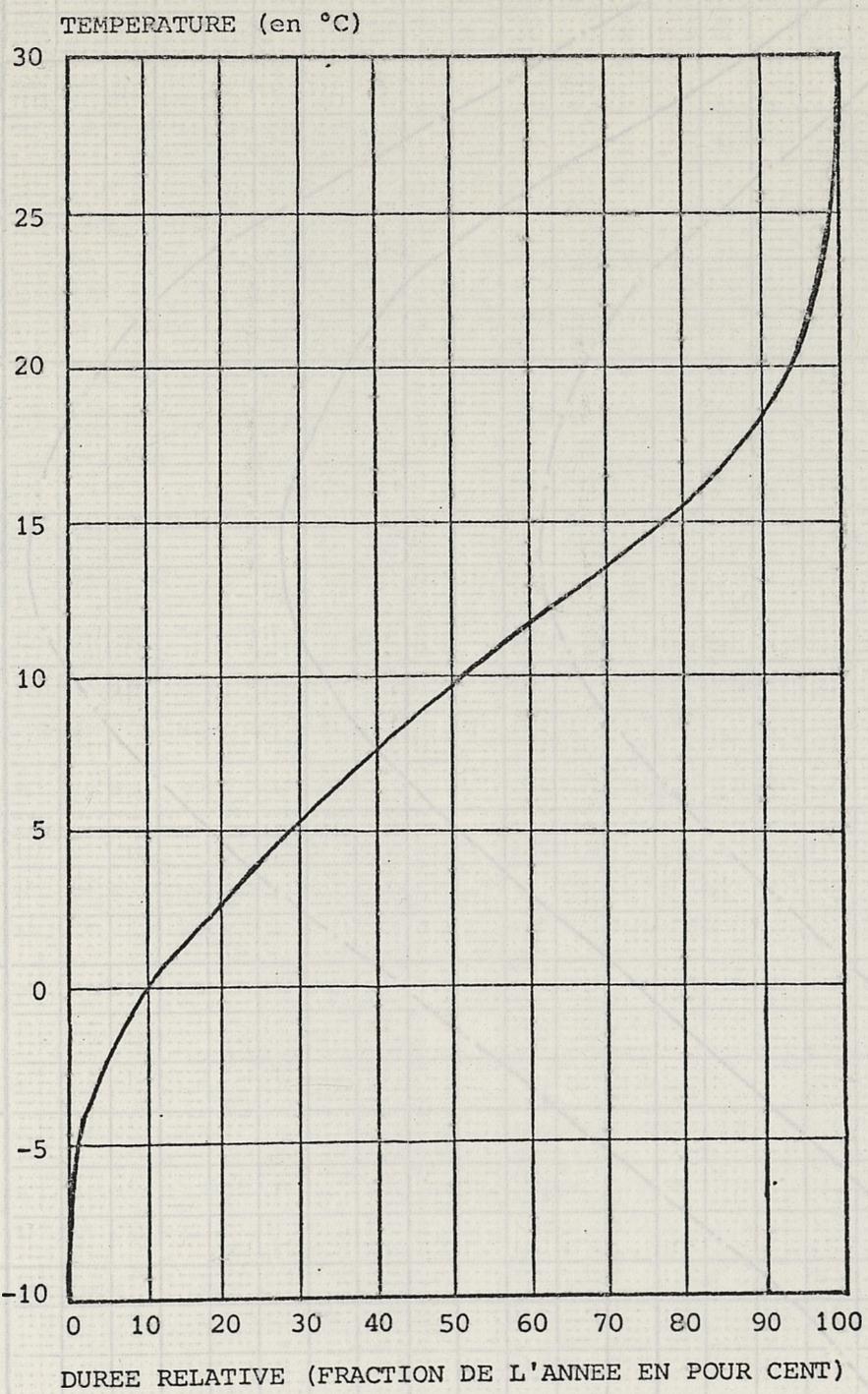
DONNEES NUMERIQUES CLIMATOLOGIQUES

PERIODES JANV.*FEVR.* MARS*AVRIL* MAI* JUIN*JUIL.* AOUT*SEPT.*OCTO.*NOVE.*DECE.* ANNEE

MOYENNES DES TEMPERATURES MAXIMALES QUOTIDIENNES (DEG C)	49/77	5.4	6.8	10.1	13.8	17.4	20.7	22.9	22.4	19.7	14.8	9.0	5.9	14.1
MAXIMUM ABSOLU DE LA TEMPERATURE (DEG C) (ANNEE)	49/77	14.1	19.0	23.0	28.0	29.2	33.7	36.6	34.0	32.7	25.5	19.2	16.1	36.6
MOYENNES DES TEMPERATURES MINIMALES QUOTIDIENNES (DEG C)	49/77	0.5	0.8	2.3	4.5	7.7	10.6	12.5	12.2	10.3	7.0	3.4	1.2	6.1
MINIMUM ABSOLU DE LA TEMPERATURE (DEG C) (ANNEE)	49/77	-15.7	-15.2	-10.5	-3.6	-1.2	1.6	3.3	4.2	-0.5	-4.0	-8.3	-13.9	-15.7
TEMPERATURES MOYENNES (TN+TX)/2 (DEG C)	49/77	2.9	3.8	6.2	9.1	12.5	15.6	17.7	17.3	15.0	10.9	6.2	3.5	10.1
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC GELEE (TNS0) (TMAX<0 DEG C)	49/77	13.7	11.4	9.3	2.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	5.7	12.5	56.3
NOMBRES MOYENS DE JOURS SANS DEGEL	49/77	3.4	1.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	2.9	8.4
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC FORTE GELBE (TMIN<-10 DEG C)	49/77	0.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.7
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC GRAND FROID (TMIN<-15 DEG C)	49/77	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC CHALEUR (TMAX>25 DEG C)	49/77	0.0	0.0	0.0	0.2	1.0	5.0	8.8	7.7	2.8	0.1	0.0	0.0	25.8
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC FORTE CHALEUR (TMAX>30 DEG C)	49/77	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.7	0.9	0.3	0.0	0.0	0.0	3.7
DEGRES/JOURS (SEUIL 18 DEG C) MOYENS	49/77	464	400	363	264	169	82	42	45	96	219	352	446	2948
HAUTEURS MOYENNES DES PRECIPITATIONS (MM)	49/77	54	45	39	43	52	53	55	53	62	50	63	48	61.8
HAUTEUR MAXIMALE DES PRECIPITATIONS EN 24 HEURES (MM)	49/77	23.9	23.3	17.4	23.5	31.2	78.9	67.8	32.0	37.0	41.3	30.5	24.8	78.9
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC PRECIPITATIONS >= 0.1MM	49/77	65	66	52	77	53	70	66	54	55	66	58	52	177/66/70
DUREES MOYENNES DE L'INSOLATION (HEURES)	49/77	16.2	15.3	13.6	13.8	13.5	11.4	11.4	12.6	13.2	13.2	16.4	15.5	166.4
DUREES MOYENNES DE L'INSOLATION (HEURES)	49/77	48	76	132	173	200	215	227	205	162	121	58	41	1657
MOYENNES DE L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR (8 RELEVES/JOUR) (%)	49/77	89	85	79	75	76	76	75	77	82	87	90	90	82
MOYENNES DES VALEURS MAXIMALES QUOTIDIENNES DE L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR (%)	49/77	96	95	94	93	94	94	94	95	96	97	97	97	95
MOYENNES DES VALEURS MINIMALES QUOTIDIENNES DE L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR (%)	49/77	77	68	57	51	52	53	51	52	58	66	75	79	67
VITESSE MAXIMALE INSTANTANEE DU VENT (M/S) DIRECTION (ANNEE)	49/77	45	35	37	30	29	32	27	35	40	30	73	47	73
		SSW	W	WSW	W	WNW	NW	W	SW	S	W	WSW	W	WSW
		56	67	55	62	67	67	61	71	65	55	77	55	01/11/77
VITESSE MOYENNE DU VENT (8 RELEVES/JOUR)	49/77	4.0	4.0	3.7	3.8	3.5	3.0	3.1	2.8	3.1	3.0	3.8	4.3	3.5
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC BROUILLARD	49/77	8.6	6.4	4.4	2.3	1.3	1.2	1.9	2.7	5.0	8.8	7.0	9.5	59.7
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC ORAGE	49/77	0.2	0.2	0.4	1.0	2.8	2.8	2.8	2.7	1.4	0.6	0.3	0.0	15.7
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC NEIGE	49/77	4.0	4.2	3.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	2.4	16.4
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC GRELE	49/77	0.3	0.4	0.6	1.0	0.7	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	4.4

DONNEES NUMERIQUES CLIMATOLOGIQUES

	JANVIER	FEBVIER	MARS	AVRIL	MAI	JUN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	ANNEE
T _{max}	5,1	6,3	10,2	13,8	17,6	20,7	22,6	22,0	19,9	15,0	9,0	6,0	14,1
T _{noy}	2,6	3,3	6,3	9,2	12,6	15,6	17,4	17,0	15,1	11,0	6,2	3,6	10,0
T _{min}	0,1	0,4	2,5	4,6	7,7	10,5	12,2	11,9	10,4	7,1	3,4	1,1	6,0
AMPLITUDE	4,9	5,9	7,7	9,1	9,6	10,0	10,3	10,1	9,5	8,0	5,6	4,8	8,0



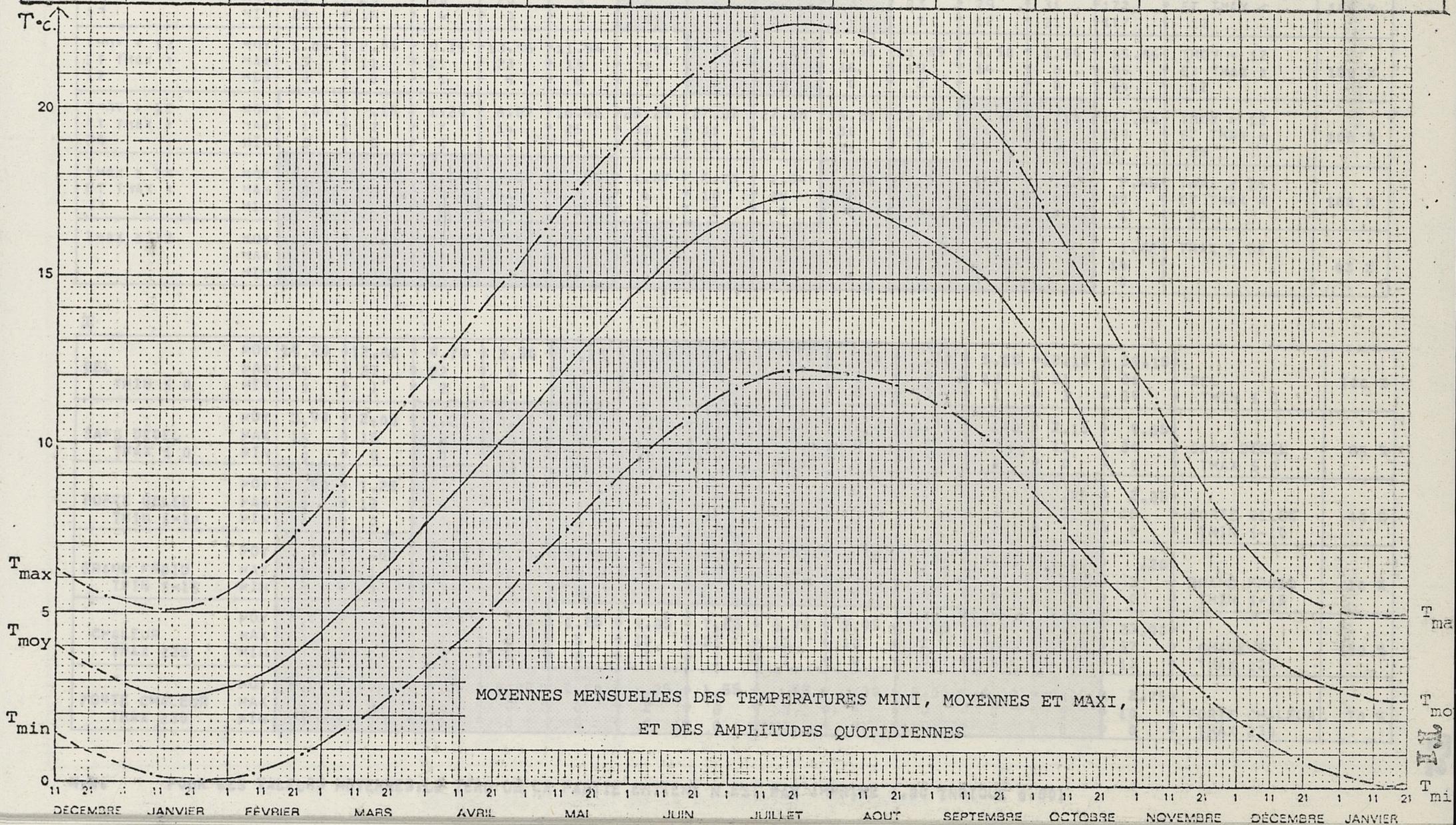
FREQUENCES HORAIRES CUMULEES DES TEMPERATURES EXTERIEURES

(TEMPS PENDANT LEQUEL LA TEMPERATURE EST INFERIEURE A LA VALEUR EN ORDONNEE)

MOYENNES MENSUELLES DES TEMPERATURES MINI, MOYENNES ET MAXI,
ET DES AMPLITUDES QUOTIDIENNES

MOYENNES MENSUELLES DES TEMPERATURES MINI, MOYENNES ET MAXI, ET DES AMPLITUDES QUOTIDIENNES

	JANVIER	FÉVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE	ANNEE
T_{max}	5,1	6,3	10,2	13,8	17,6	20,7	22,6	22,0	19,9	15,0	9,0	6,0	14,1
T_{moy}	2,6	3,3	6,3	9,2	12,6	15,6	17,4	17,0	15,1	11,0	6,2	3,6	10,0
T_{min}	0,1	0,4	2,5	4,6	7,7	10,5	12,2	11,9	10,4	7,1	3,4	1,1	6,0
AMPLITUDE	4,9	5,9	7,7	9,1	9,6	10,0	10,3	10,1	9,5	8,0	5,6	4,8	8,0



JANVIER

OCT

FREQUENCE RELATIVE ANNUELLE (COL. FREQ) ET
NOMBRE MOYEN, MAXIMAL, ET MINIMAL DE JOURS
AU COURS DESQUELS ON A OBSERVE LES PHENOMENES SUIVANTS :

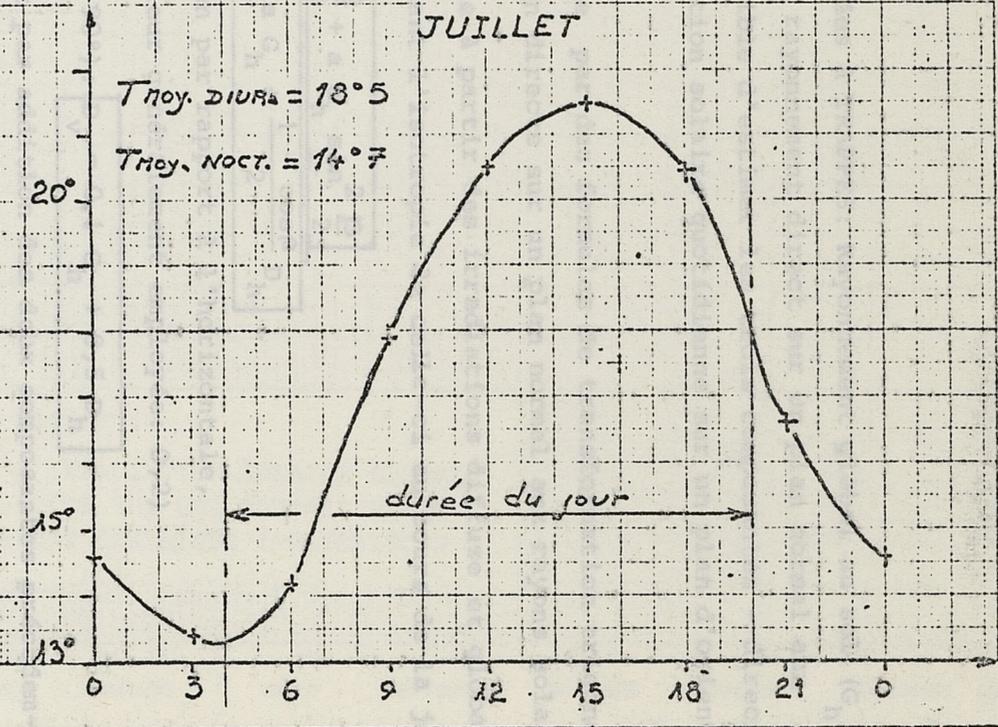
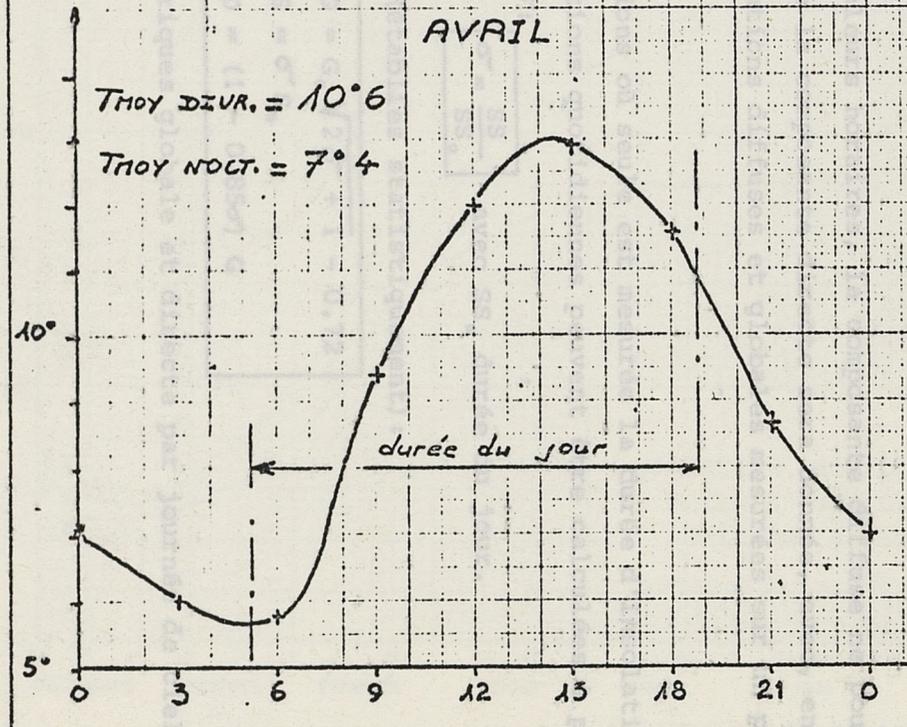
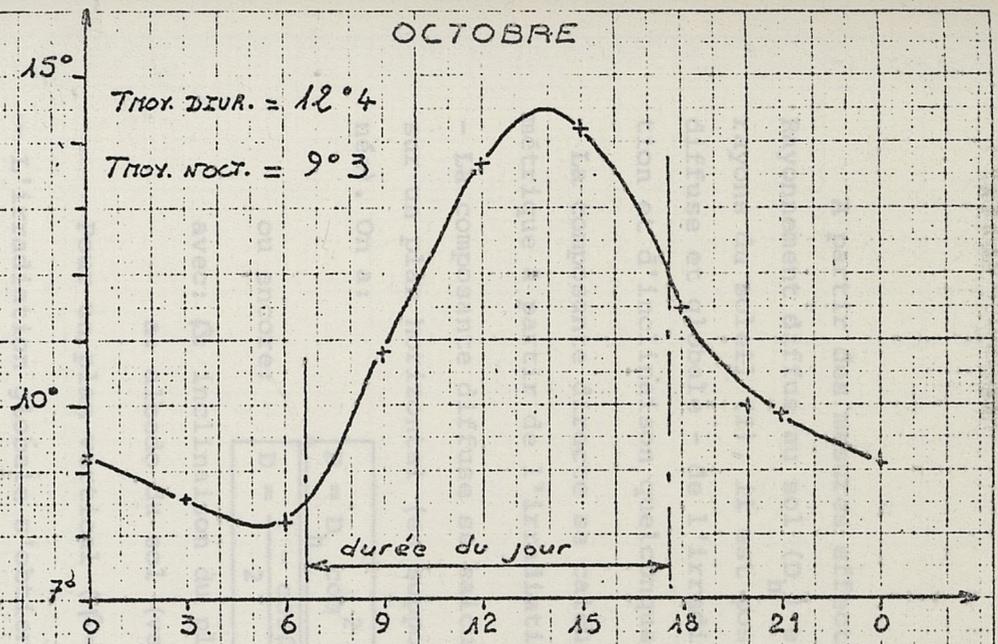
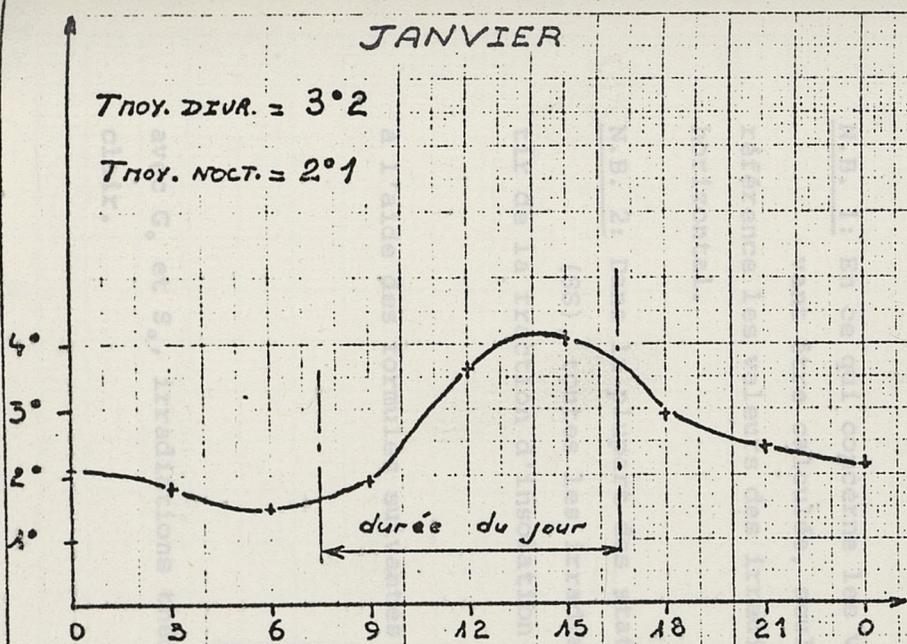
II

		JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCTOB	NOV	DEC	ANNUEL		FREQ
TMOY < 12 ET TMAX < 12	MOY	29.93	25.21	20.36	10.00	2.11	.11	.07	2.00	.25	6.93	23.46	29.29	147.71	TMOY < 12	100 %
	MAX	31	29	30	20	3	2	2	3	5	23	29	31	172	ET TMAX < 12	
	MIN	26	16	4	0	0	0	0	0	0	1	12	21	117	12	
TMOY < 12 ET TMAX > 12	MOY	1.04	2.06	9.35	13.96	11.54	3.21	.18	.29	4.61	11.89	5.50	1.54	65.86	TMOY < 12	100 %
	MAX	5	11	21	23	19	8	2	5	16	19	14	8	95	ET TMAX > 12	
	MIN	0	0	1	5	6	0	0	0	0	0	3	1	0	44	
TMOY > 12 ET TMAX < 20	MOY	.04	.18	1.29	6.07	16.93	25.25	27.07	27.68	24.21	12.00	.38	.15	141.86	TMOY > 12	100 %
	MAX	1	2	7	14	25	30	31	31	30	23	4	3	159	ET TMAX < 20	
	MIN	0	0	0	1	9	15	18	21	11	0	0	0	127	28	
TMAX > 20 ET TMAX < 32	MOY	0.00	0.00	0.04	.04	.25	1.07	2.75	2.54	.42	0.00	0.00	0.00	7.46	TMAX > 20	100 %
	MAX	0	0	0	1	3	6	10	10	6	0	0	0	20	ET TMAX < 32	
	MIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	32	
TMAX > 32	MOY	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.38	.93	.46	.07	0.00	0.00	0.00	1.82	TMAX > 32	43 %
	MAX	0	0	0	0	0	7	7	5	2	1	1	1	14		
	MIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

II

GEL TMIN < 0	MOY	15.20	12.80	9.70	2.50	.25	0.00	0.00	0.00	.05	.70	5.85	12.10	59.15	GEL TMIN < 0	100 %
	MAX	24	27	22	6	2	0	0	0	1	1	13	21	86		
	MIN	7	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	3	39		
SANS DEGEL TMAX < 0	MOY	3.90	2.00	.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.40	3.15	9.65	SANS DEGEL TMAX < 0	85 %
	MAX	15	15	2	0	0	0	0	0	0	0	2	11	34		
	MIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
FORTE GELEE TMIN < -10	MOY	.90	1.25	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.20	2.35	FORTE GELEE TMIN < -10	40 %
	MAX	3	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	15		
	MIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
GRAND FROID TMIN < -15	MOY	.15	.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.20	GRAND FROID TMIN < -15	10 %
	MAX	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3		
	MIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
CHALEUR TMAX > 25	MOY	0.00	0.00	0.00	.15	1.25	4.85	7.85	6.70	2.95	.15	0.00	0.00	23.90	CHALEUR TMAX > 25	100 %
	MAX	0	0	0	3	5	10	21	13	10	2	0	0	57		
	MIN	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	11		
FORTE CHALEUR TMAX > 30	MOY	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.35	1.55	.52	.30	0.00	0.00	0.00	2.75	FORTE CHALEUR TMAX > 30	70 %
	MAX	0	0	0	1	1	2	8	3	4	0	0	0	10		
	MIN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

N.B. POUR LES VALEURS MOYENNES, LE ZERO DE LA PARTIE ENTIERE N EST PAS IMPRIME (.00 INDIQUE 0.00)



VARIATIONS DIURNES DE LA TEMPERATURE (MOYENNES)

A partir des mesures effectuées à TRAPPES: Rayonnement global au sol (G_h), Rayonnement diffus au sol (D_h) et rayonnement direct sur un plan normal aux rayons du soleil (I), il est possible d'estimer les trois composantes - directe, diffuse et globale - de l'irradiation solaire quotidienne sur un plan d'orientation et d'inclinaison quelconque:

- La composante directe se calcule par des formules de transformation trigonométrique à partir de l'irradiation directe sur un plan normal aux rayons solaires.
- La composante diffuse se calcule à partir des irradiances diffuse et globale sur un plan horizontal (en supposant l'isotropie de celle-ci au cours de la journée). On a:

$$D = D_h \cos^2 \frac{\beta}{2} + a G_h \sin^2 \frac{\beta}{2}$$

ou encore:

$$D = \frac{1 - \cos \beta}{2} a G_h + \frac{1 + \cos \beta}{2} D_h$$

avec: β : inclinaison du plan par rapport à l'horizontale,
 a: albedo du sol (valeur généralement employée: 0,2)

Pour un plan vertical ($\beta = 90^\circ$): $D_v = 0,1 G_h + 0,5 D_h$

- L'irradiation globale s'obtient par addition des deux composantes précédemment calculées (directe et diffuse).

N.B. 1: En ce qui concerne les valeurs horaires, la composante diffuse ne pouvant être calculée, seule la composante directe sera donnée, avec, en référence les valeurs des irradiances diffuses et globales mesurées sur un plan horizontal.

N.B. 2: Dans la plupart des stations où seule est mesurée la durée d'insolation (SS), toutes les irradiances quotidiennes peuvent être calculées à partir de la fraction d'insolation σ :

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \quad \text{avec } SS_0 \text{ durée du jour.}$$

à l'aide des formules suivantes (établies statistiquement):

$$\begin{aligned} G &= G_0 \sqrt{2\sigma + 1} - 0,72 \\ S &= \sigma S_0 \\ D &= (1 - 0,85\sigma) G \end{aligned}$$

avec G_0 et S_0 , irradiances théoriques globale et directe par journée de ciel clair.

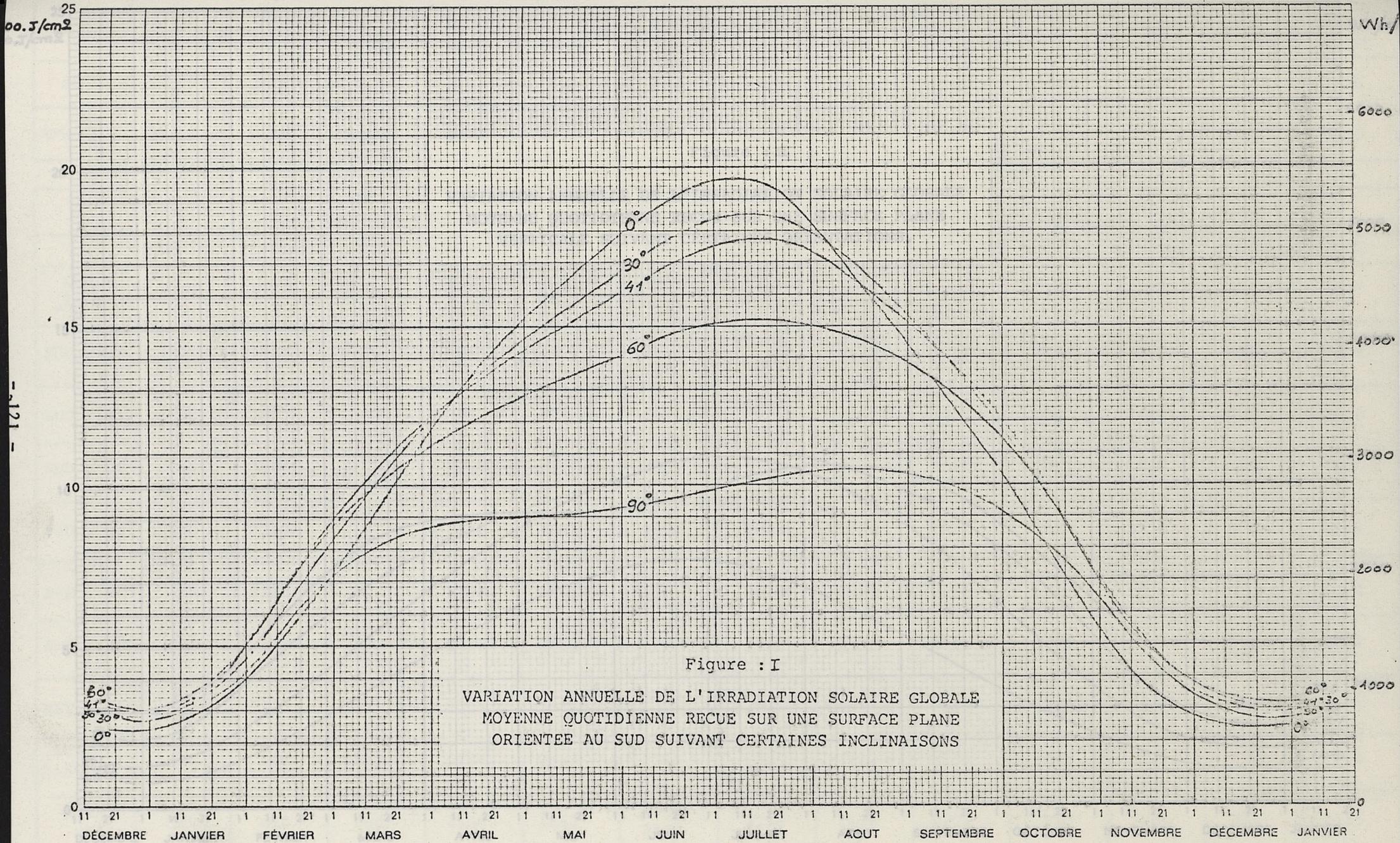


Figure : I
 VARIATION ANNUELLE DE L'IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE
 MOYENNE QUOTIDIENNE RECUE SUR UNE SURFACE PLANE
 ORIENTEE AU SUD SUIVANT CERTAINES INCLINAISONS

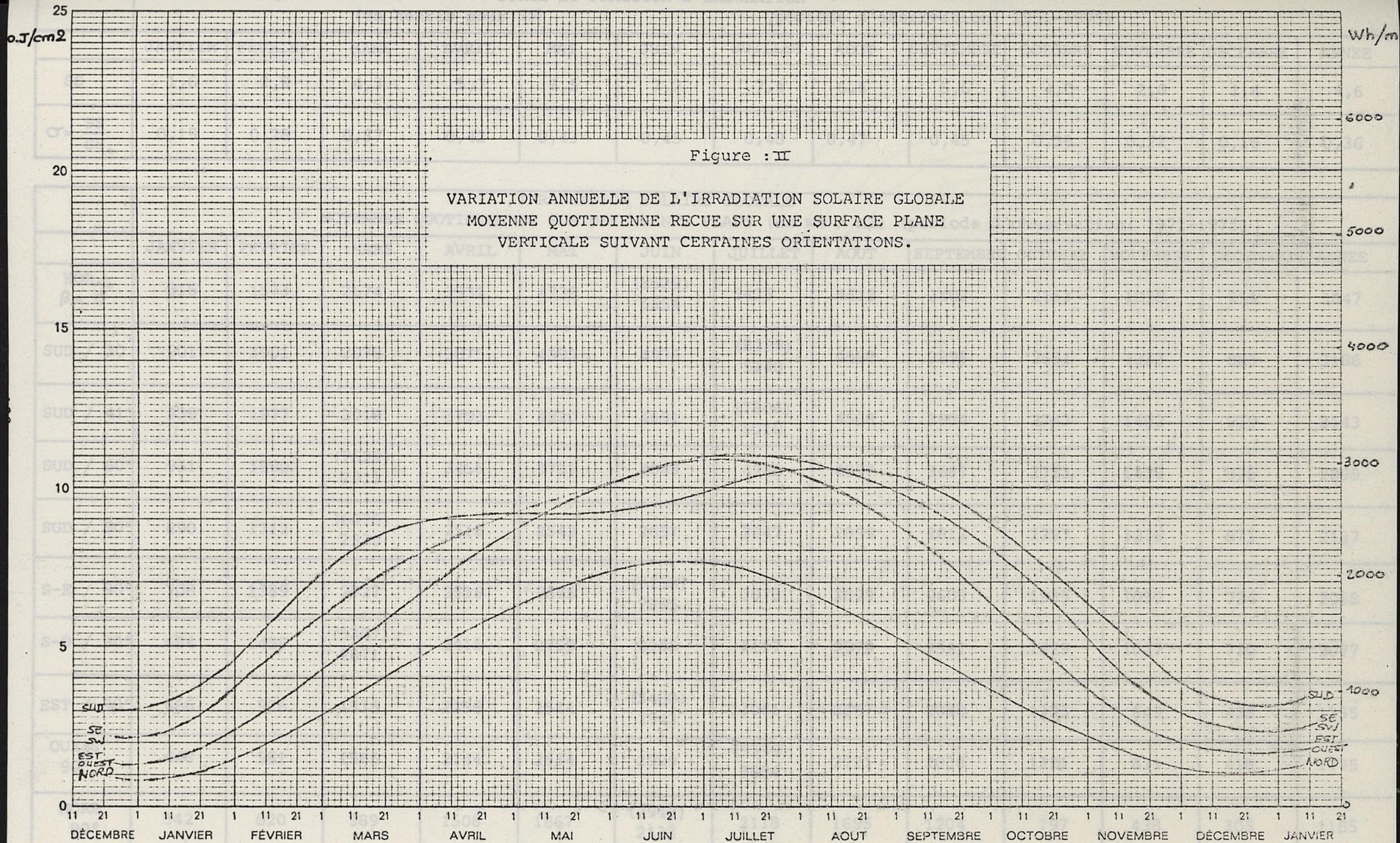


Figure : II
 VARIATION ANNUELLE DE L'IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE
 MOYENNE QUOTIDIENNE RECUE SUR UNE SURFACE PLANE
 VERTICALE SUIVANT CERTAINES ORIENTATIONS.

DUREE ET FRACTION D'INSOLATION (en heures pour SS) (période d'observation: 1951-1975)													
	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	ANNEE
SS	1,6	2,9	4,3	5,7	6,5	7,2	7,4	6,5	5,6	4,0	2,0	1,4	4,6
$\sigma = \frac{SS}{SS_0}$	0,19	0,28	0,37	0,42	0,43	0,45	0,48	0,47	0,45	0,38	0,22	0,16	0,36

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE MOYENNES QUOTIDIENNES SUR DIFFERENTS PLANS (en wh / m2) (période d'observation: 1971-1975)													
	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	ANNEE
HOR. ° $\beta = 0$	816	1573	2674	3931	4738	(8529) 5554	5435	4513	3403	2153	1038	651	3047
SUD / 30°	901	1901	2978	3875	4395	4935	(8229) 5248	4698	3895	2651	1333	885	3186
SUD / 41°	938	1977	3018	3793	4220	4691	(7806) 5010	4568	3904	2743	1402	939	3143
SUD / 60°	951	1990	(7529) 2911	3456	3711	4043	4343	4097	3687	2733	1438	976	2899
SUD / 90°	890	1712	(6076) 2330	2516	2542	2657	2847	2859	2812	2297	1276	871	2137
S-E / 90°	708	1389	2027	2518	2635	(5258) 2895	3073	2829	2603	1935	1050	724	2058
S-O / 90°	684	1459	(5387) 2071	2416	2709	2945	3117	2975	2561	1929	1027	710	2077
EST / 90°	466	926	1535	2238	2544	(5480) 2943	3061	2567	2080	1323	649	428	1755
OUEST 90°	448	981	1565	2144	2634	2999	(5356) 3084	2721	2038	1321	631	418	1775
NORD 90°	342	620	989	1508	1867	(2943) 2133	2118	1695	1204	797	438	305	1185
	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	ANNEE

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE:
 moyenne quotidienne sur une surface plane
 suivant son orientation et son inclinaison.

Description des figures:

Les figures III-1 à III-12 représentent l'irradiation solaire globale reçue en moyenne chaque jour, au cours de chaque mois de l'année, sur une surface plane d'orientation et d'inclinaison quelconque.

La figure III-13, du même type, est relative aux seules journées de ciel clair de juillet (définies ici par une durée d'insolation supérieure à 14 heures).

- les inclinaisons sont représentées par des cercles concentriques cotés de 0° (horizontale) au centre, à 90° (verticale) à la périphérie.
- les orientations, dont on a représenté les quatre points cardinaux, sont les rayons du cercle.
- l'irradiation solaire globale reçue est représentée par des isolignes cotées en joules par cm²; une échelle de conversion permet de traduire ces valeurs en wh/m² (1 j/cm² = 2,8 wh/m²).

- 124 -

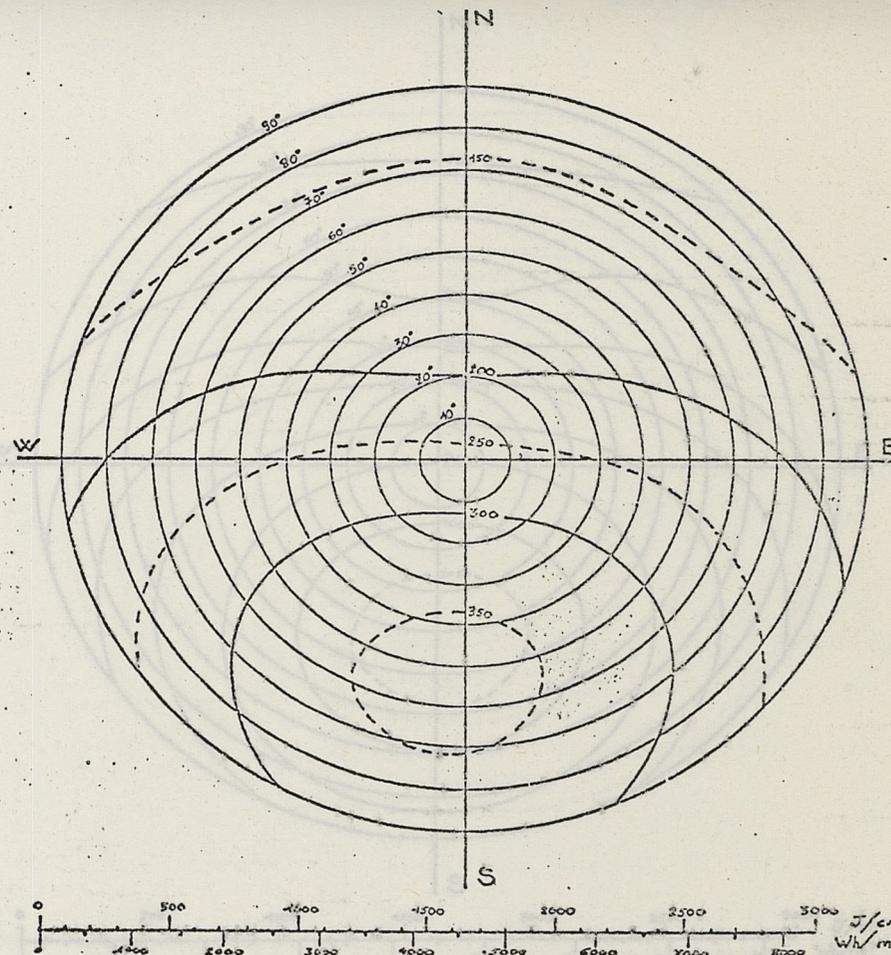


Figure : III-1

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
 MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
 SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
 (EN JOULES/CM²)

RM

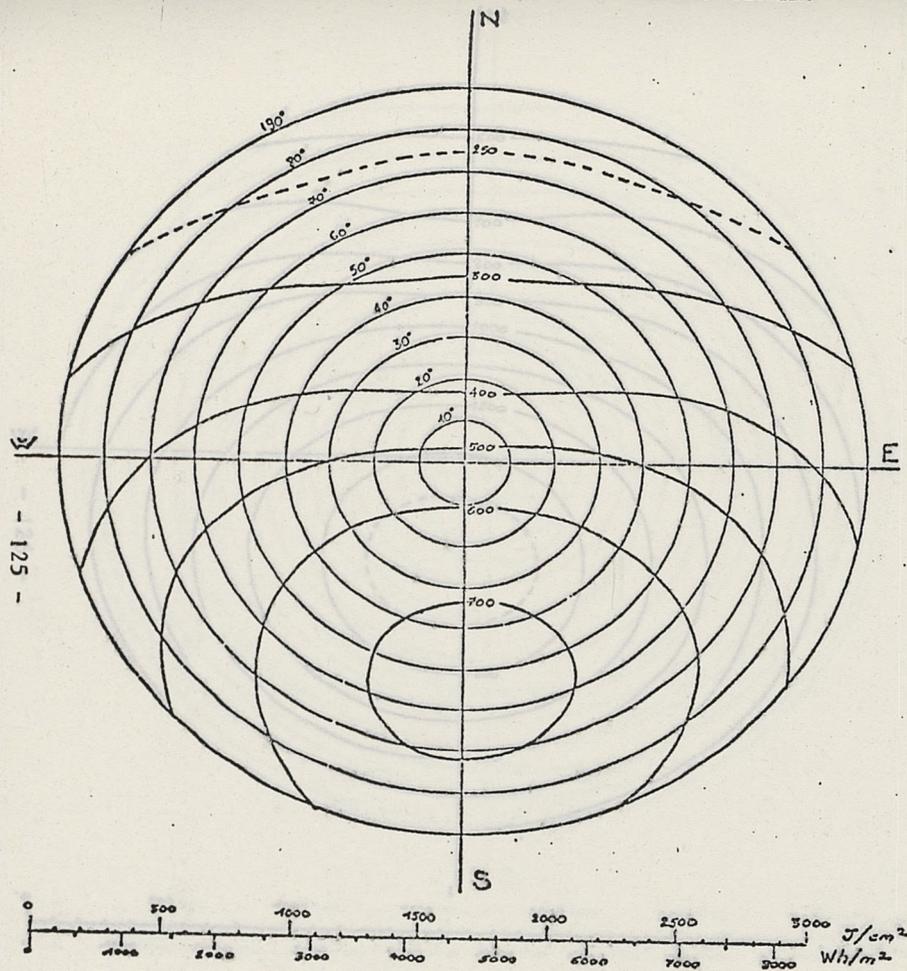


Figure : III-2

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
(EN JOULES/ CM^2)

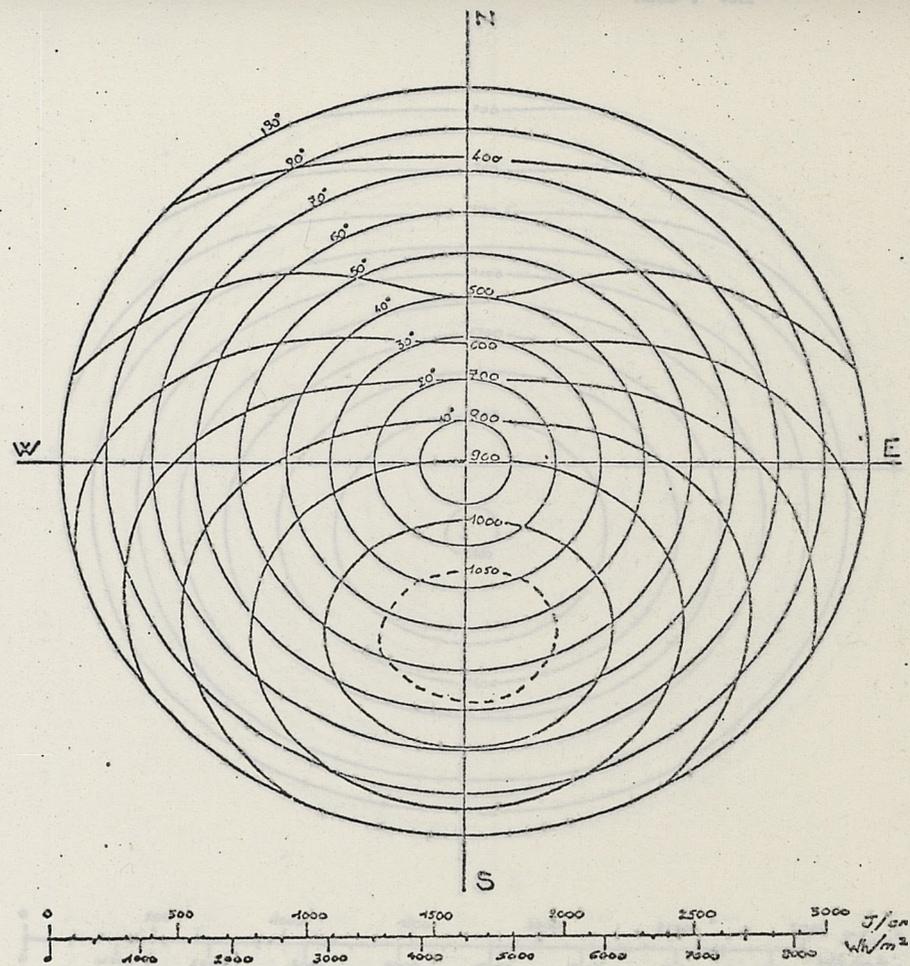


Figure : III-3

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
(EN JOULES/ CM^2)

R4

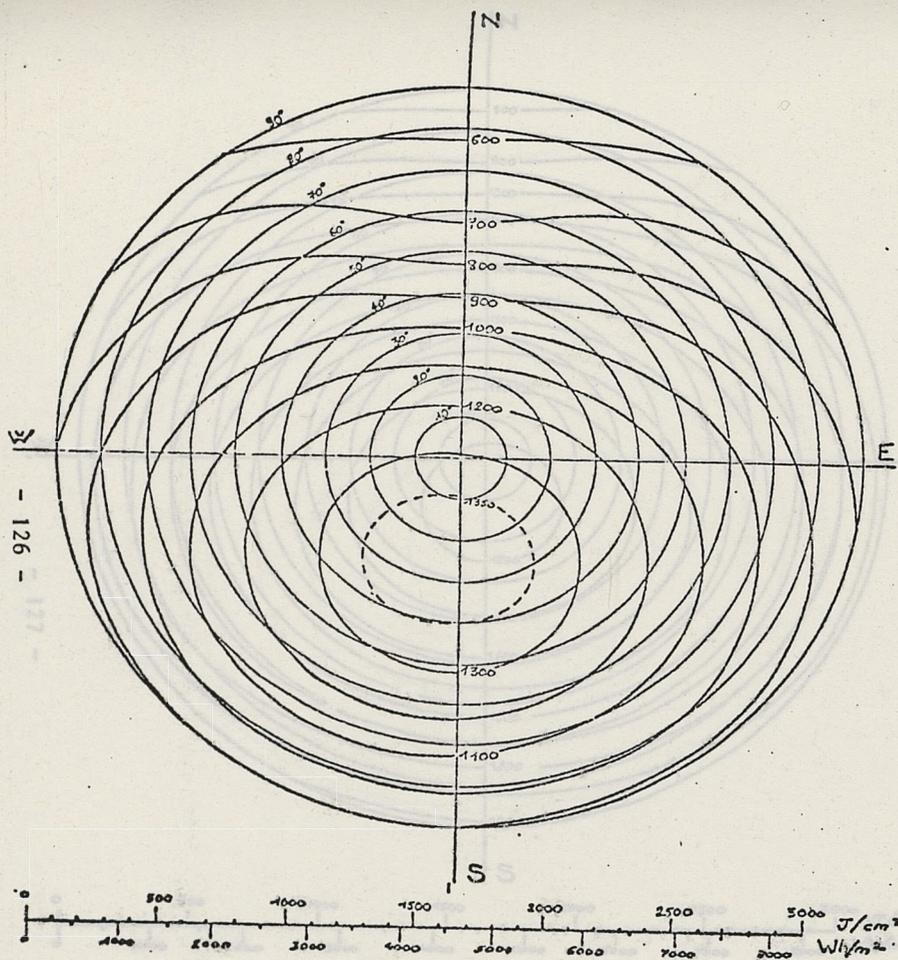


Figure : III-4

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
 MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
 SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
 (EN JOULES/cm²)

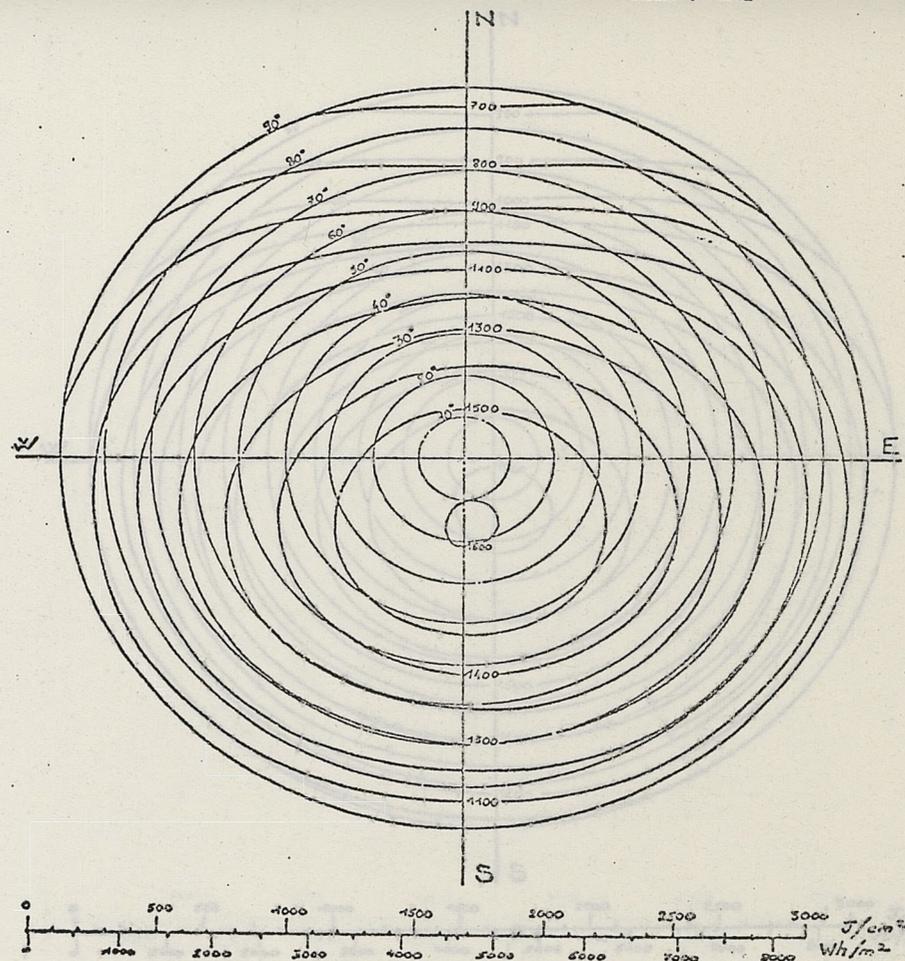
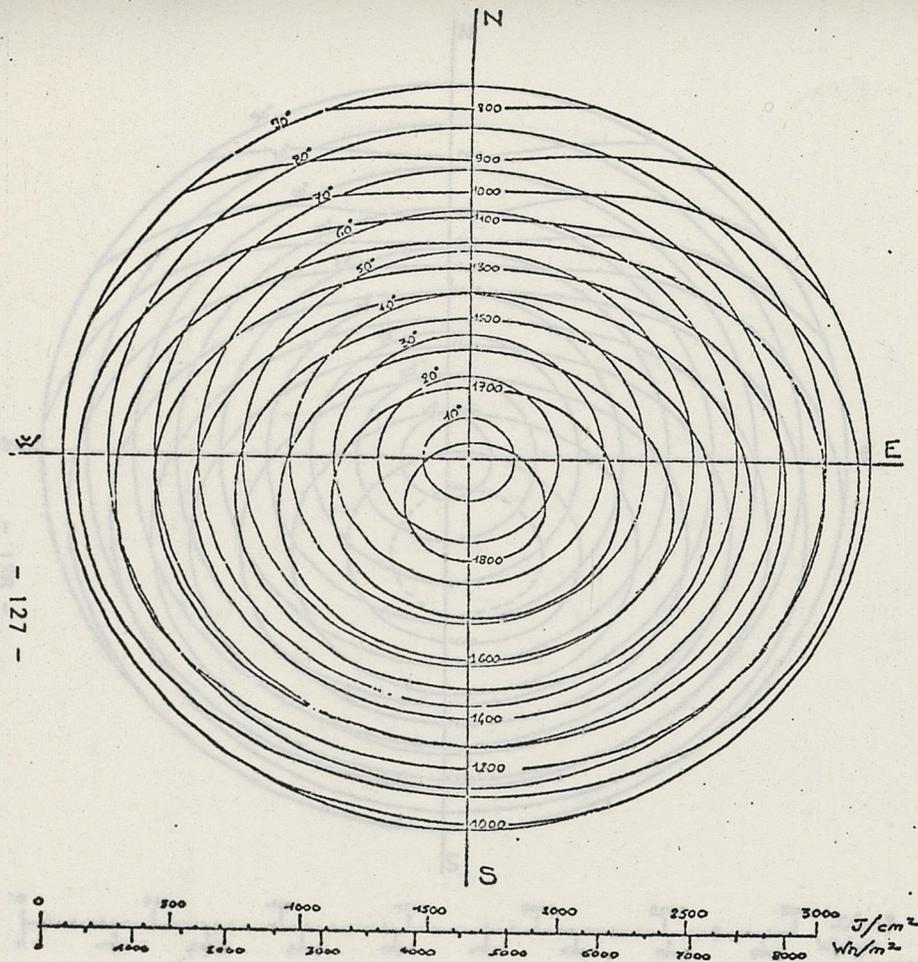


Figure : III-5

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
 MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
 SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
 (EN JOULES/cm²)



- 127 -

Figure : III-6

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
 MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
 SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
 (EN JOULES/CM²)

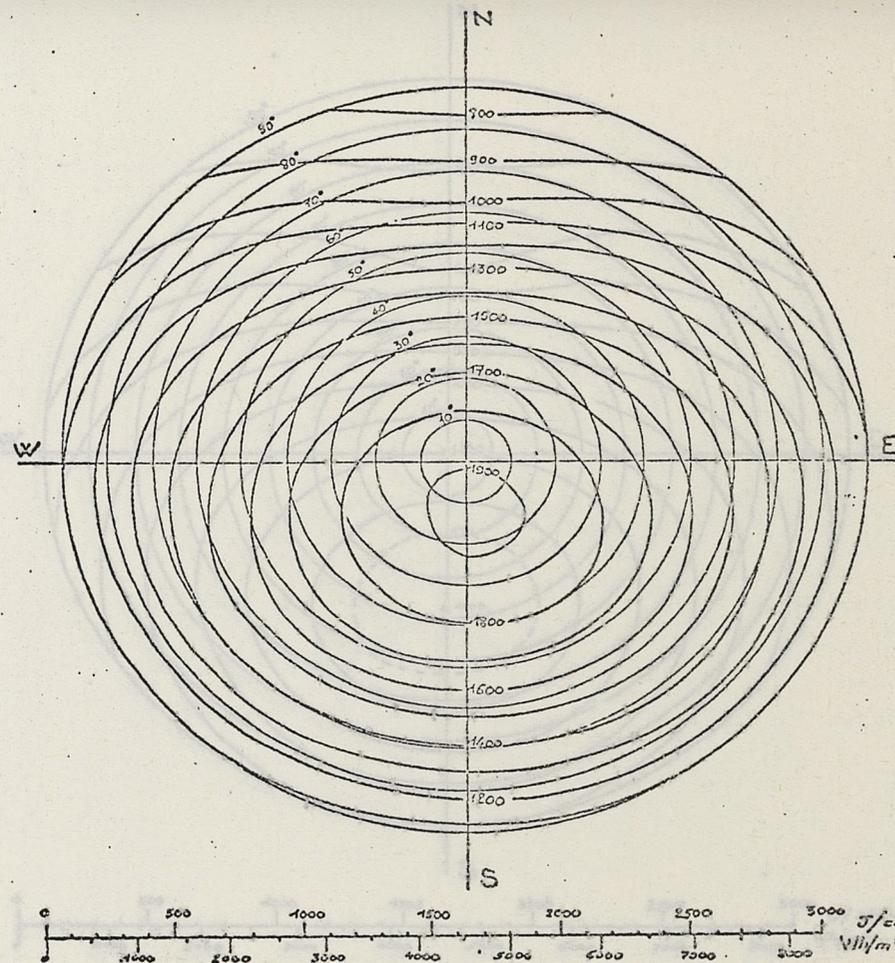


Figure : III-7

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
 MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
 SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
 (EN JOULES/CM²)

R6

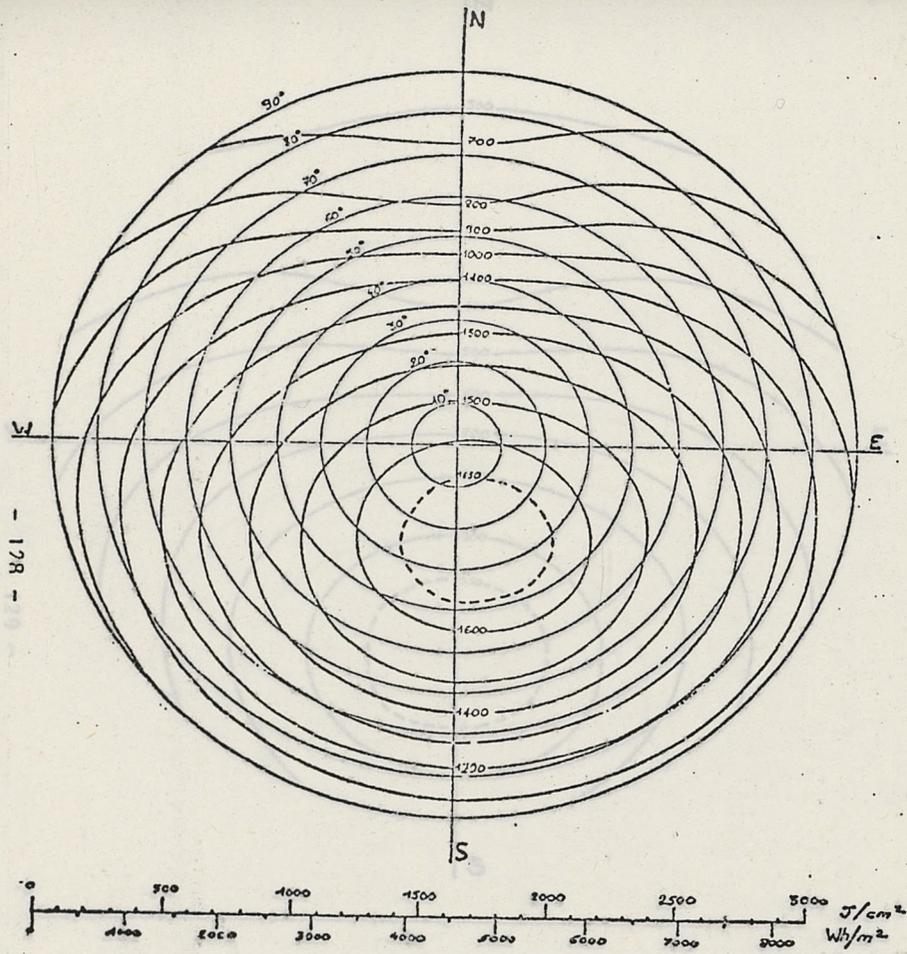


Figure : III-8

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.

(EN JOULES/CM²)

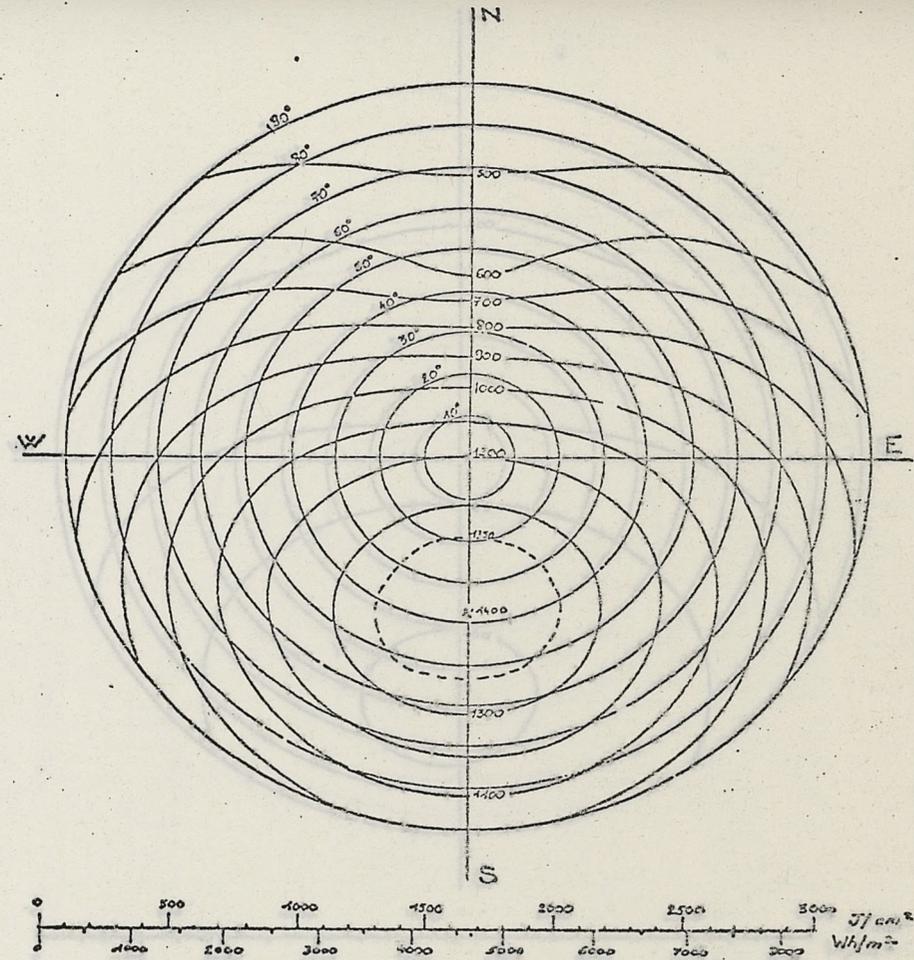


Figure : III-9

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.

(EN JOULES/CM²)

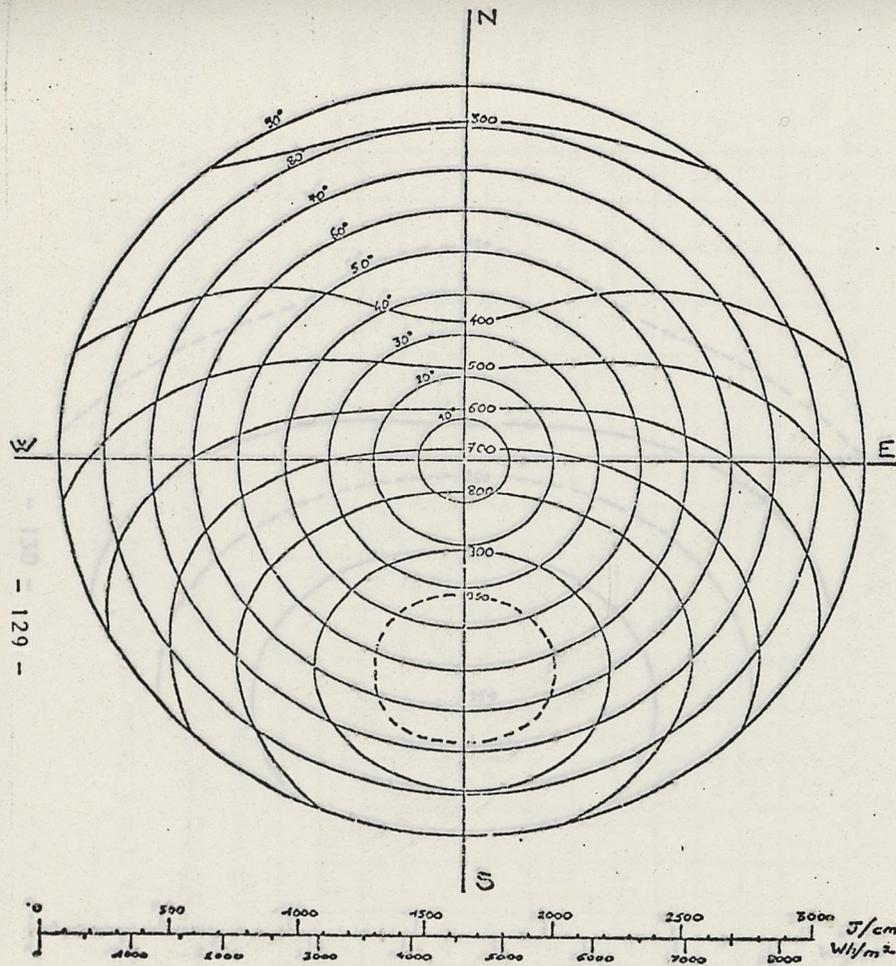


Figure : III-10

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
 MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
 SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
 (EN JOULES/CM²)

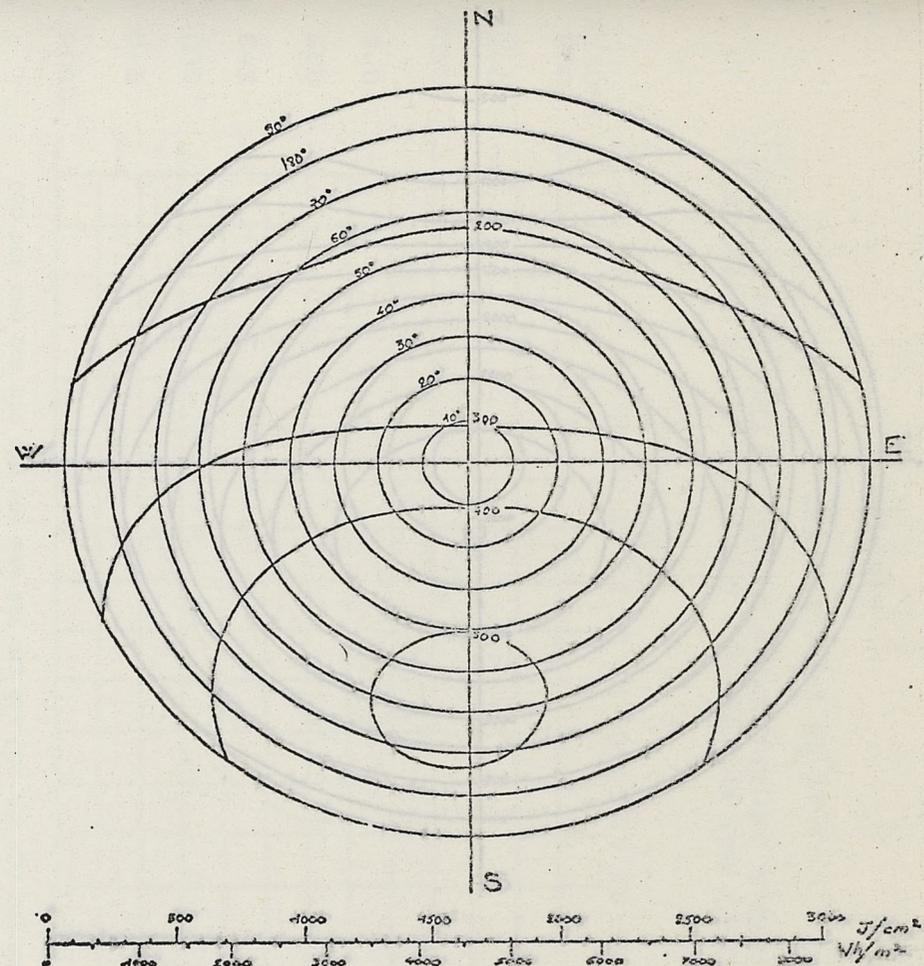


Figure : III-11

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
 MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
 SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
 (EN JOULES/CM²)

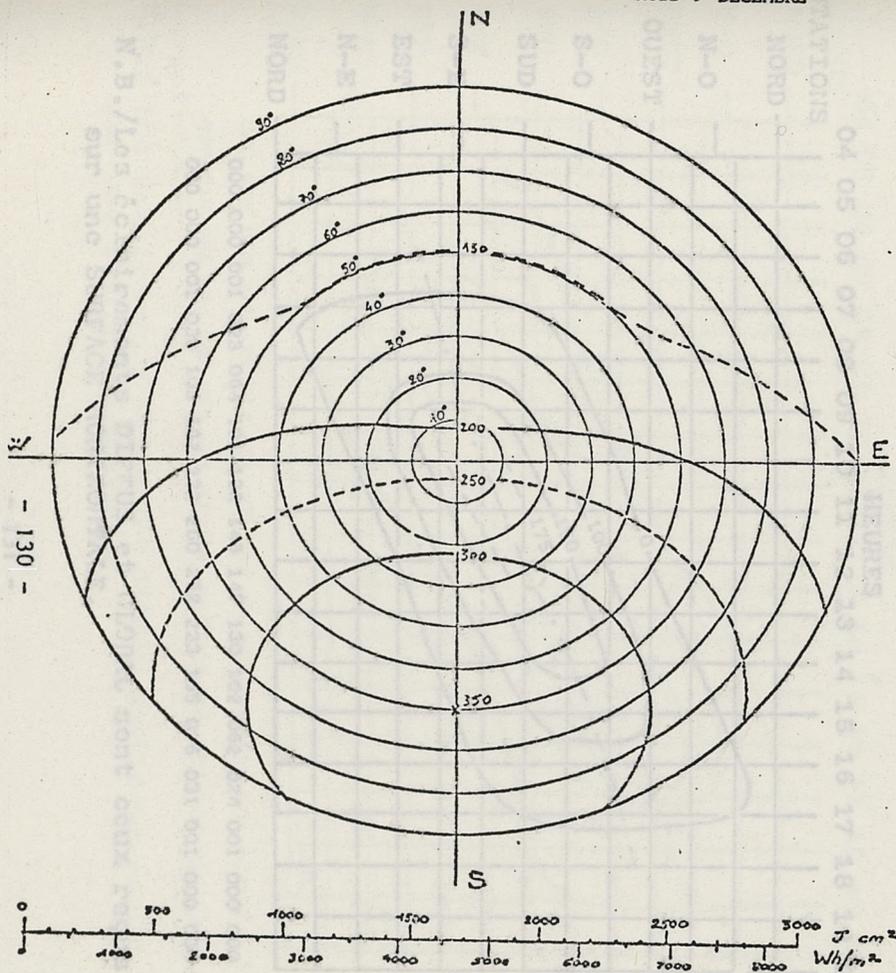


Figure : III-12

IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
 MOYENNE QUOTIDIENNE SUR UNE SURFACE PLANE
 SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
 (EN JOULES/CM²)

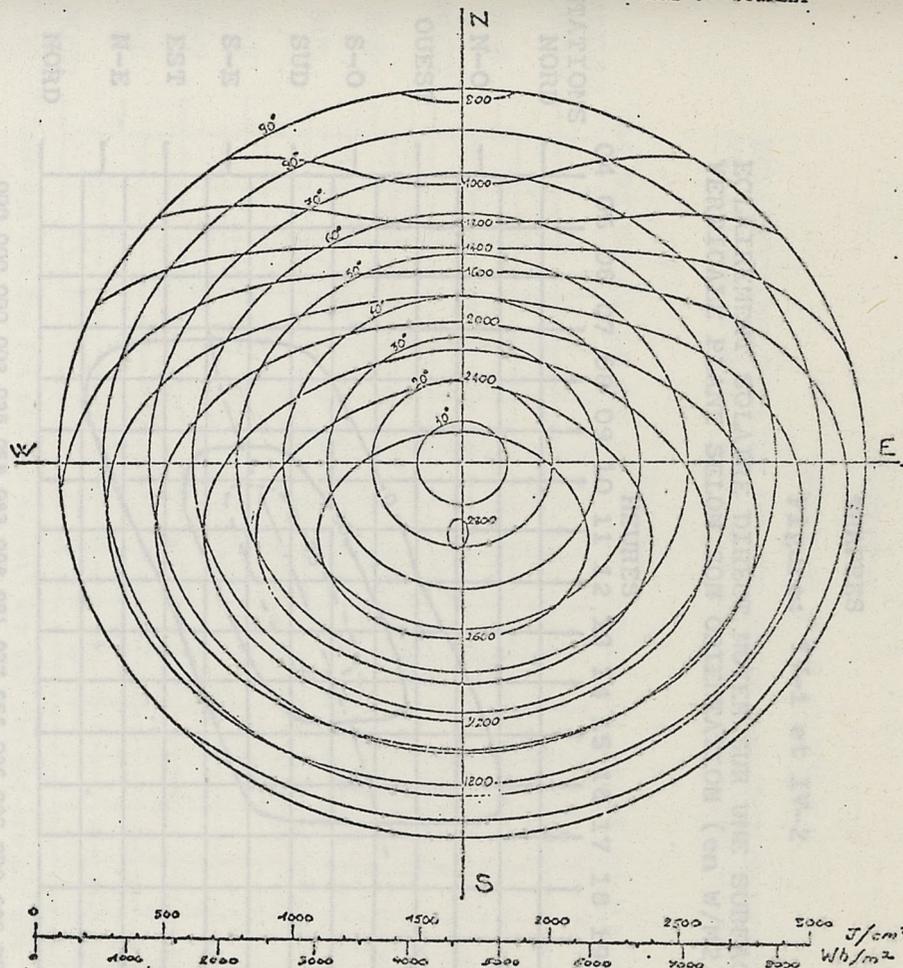


Figure : III-13

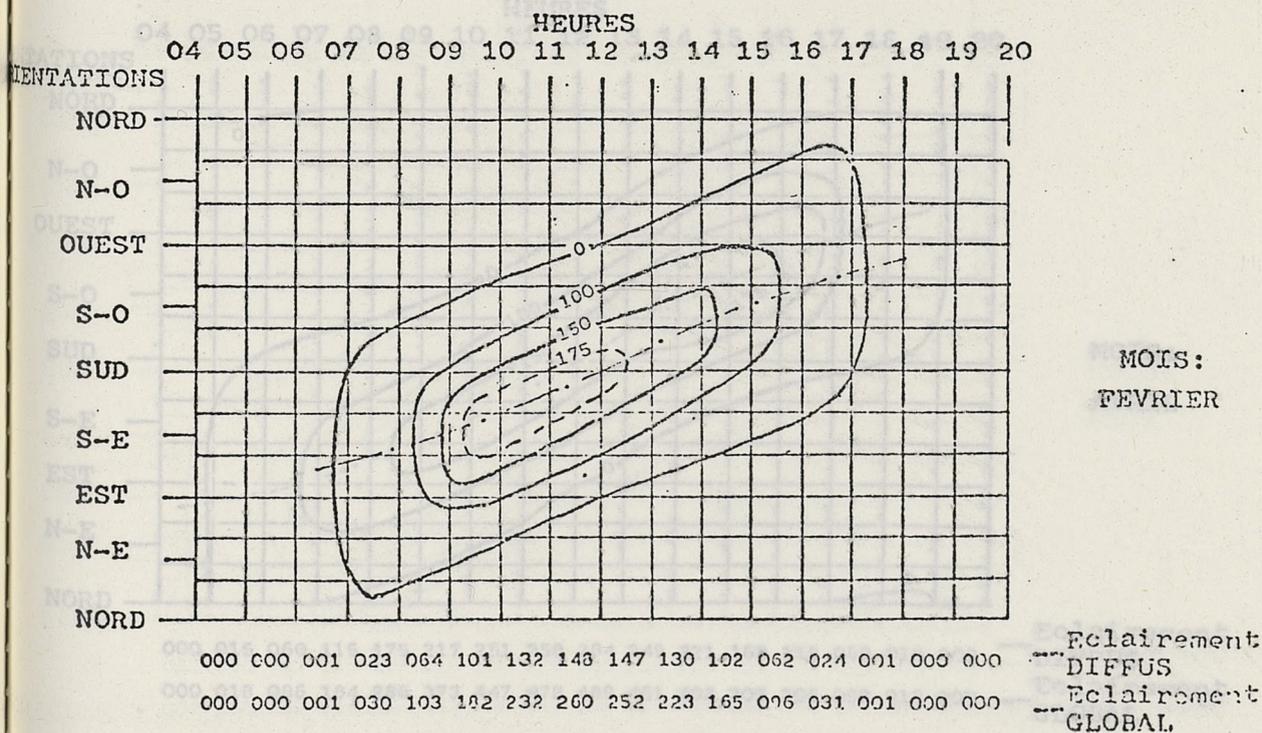
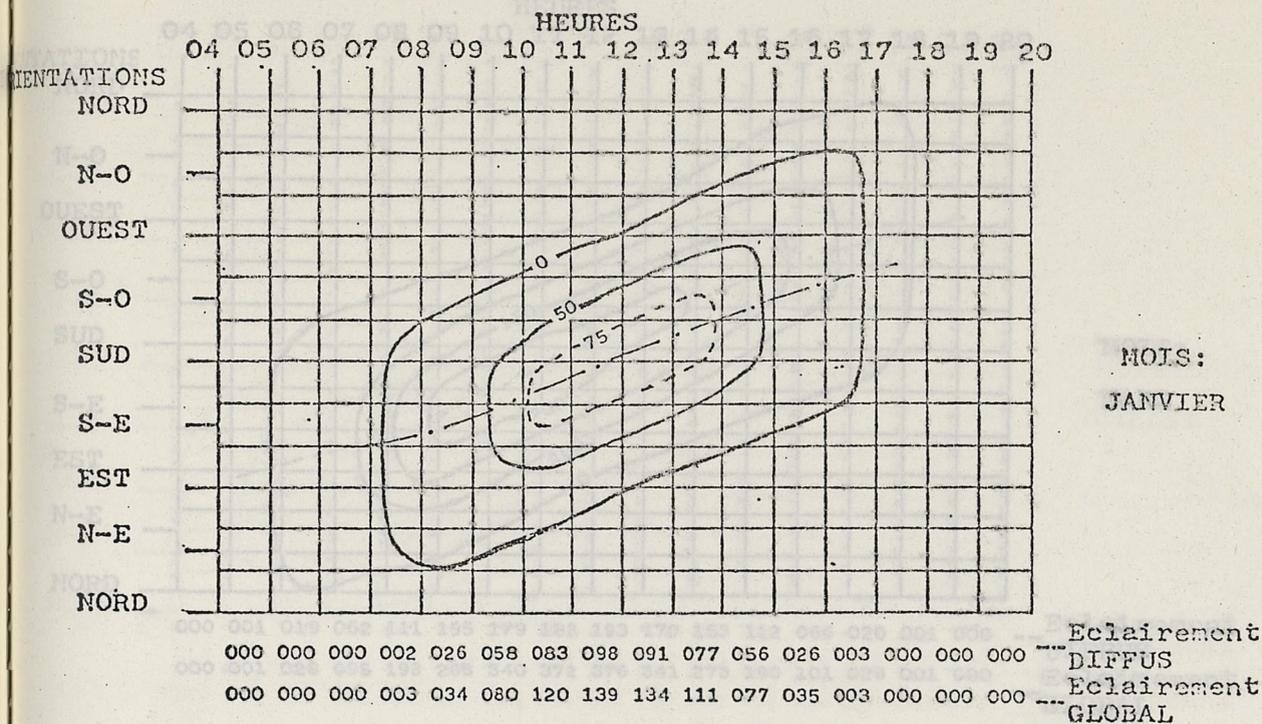
IRRADIATION SOLAIRE GLOBALE :
 MOYENNE QUOTIDIENNE PAR CIEL CLAIR SUR UNE SURFACE PLANE
 SUIVANT SON ORIENTATION ET SON INCLINAISON.
 (EN JOULES/CM²)

TRAPPES

R10

Figure: IV-1 et IV-2

ECLAIREMENT SOLAIRE DIRECT MOYEN SUR UNE SURFACE VERTICALE PLANE SELON SON ORIENTATION (en W/M2)



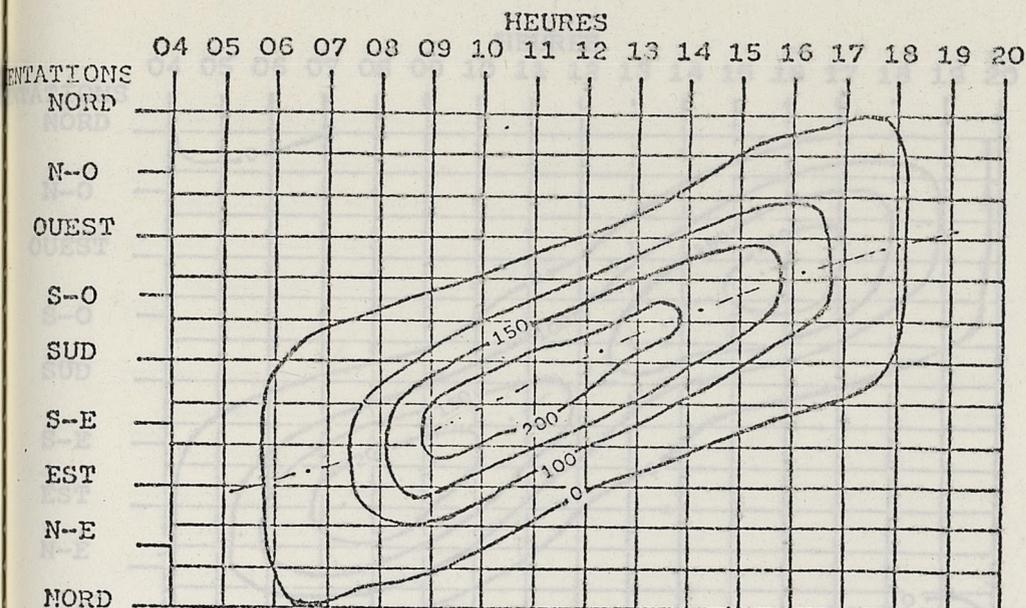
N.B./Les éclaircissements DIFFUS et GLOBAL sont ceux reçus sur une SURFACE HORIZONTALE.

TRAPPES

R11

Figures: IV-3 et IV-4

ECLAIREMENT SOLAIRE DIRECT MOYEN SUR UNE SURFACE VERTICALE PLANE SELON SON ORIENTATION (en W/M2)

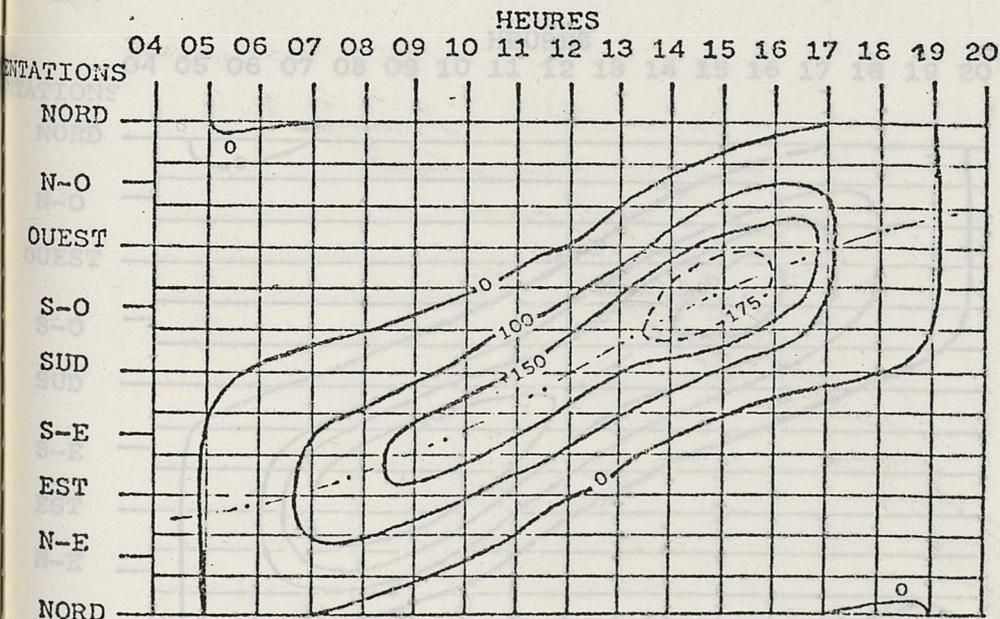


MOIS:

MARS

000 001 019 062 111 155 179 188 193 179 153 112 066 020 001 000
 000 001 023 095 193 288 340 372 376 341 273 190 101 026 001 000

--- Eclairnement
 --- DIFFUS
 --- Eclairnement
 --- GLOBAL



MOIS:

AVRIL

000 015 060 116 175 217 251 258 264 249 221 168 118 063 015 000
 000 018 086 184 286 373 447 478 489 461 408 305 206 093 013 000

--- Eclairnement
 --- DIFFUS
 --- Eclairnement
 --- GLOBAL

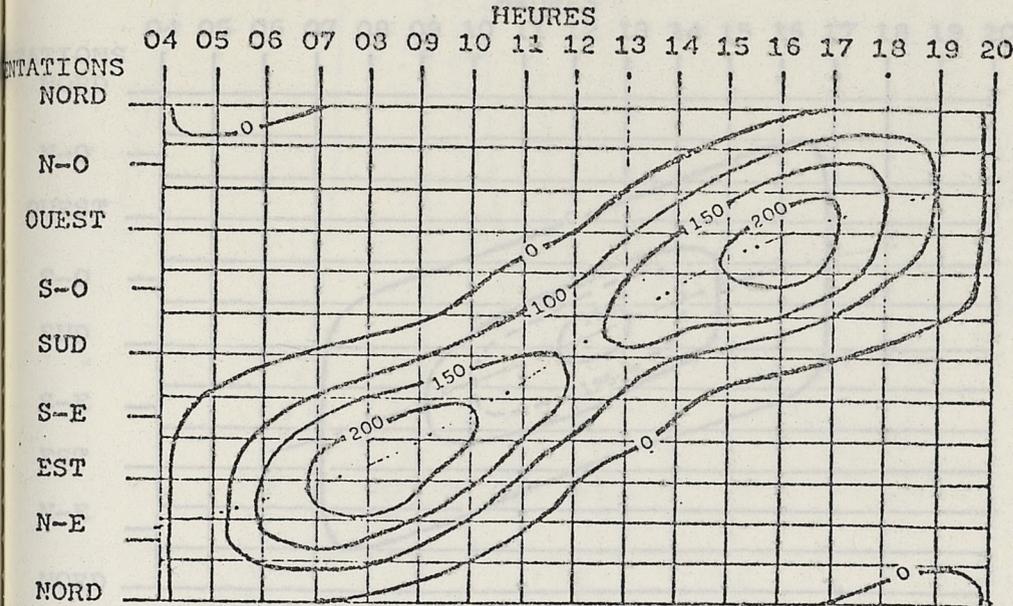
N.B./ Les éclairnements DIFFUS et GLOBAL sont ceux reçus sur une SURFACE HORIZONTALE.

TRAPPES

R12

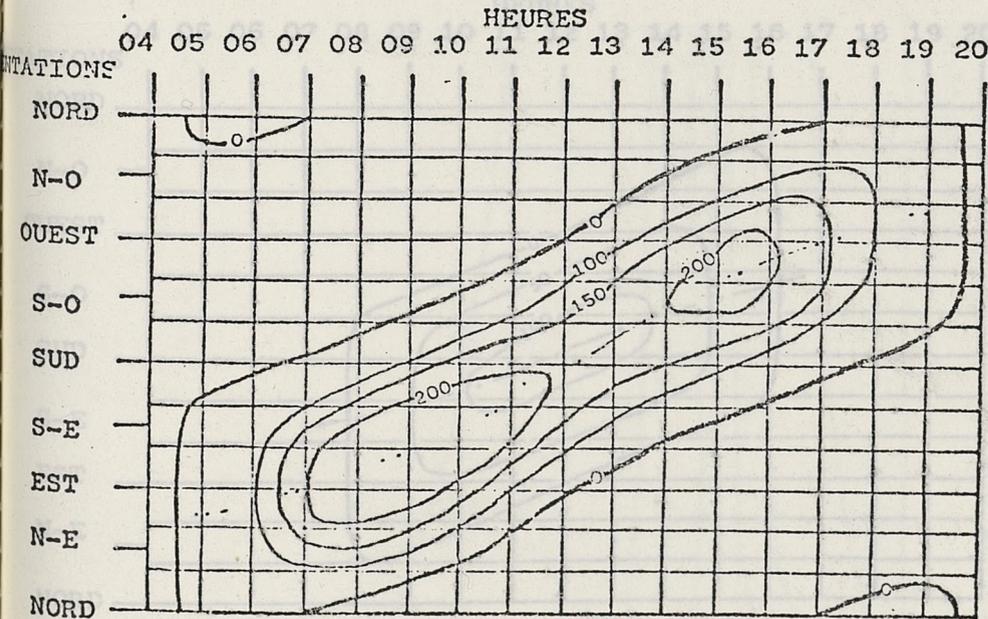
Figures: IV-7 et IV-8

ECLAIREMENT SOLAIRE DIRECT MOYEN SUR UNE SURFACE VERTICALE PLANE SELON SON ORIENTATION (en W/M2)



MOIS:
JUILLET

014	060	115	165	211	246	276	287	304	284	250	209	169	117	060	015	--- Eclaircement DIFFUS
317	090	197	313	423	515	584	598	582	560	488	400	310	200	091	019	--- Eclaircement GLOBAL



MOIS:
AOÛT

002	030	083	136	177	219	250	270	265	258	229	195	136	079	028	002	--- Eclaircement DIFFUS
002	040	137	262	354	463	520	541	532	503	439	347	240	129	038	002	--- Eclaircement GLOBAL

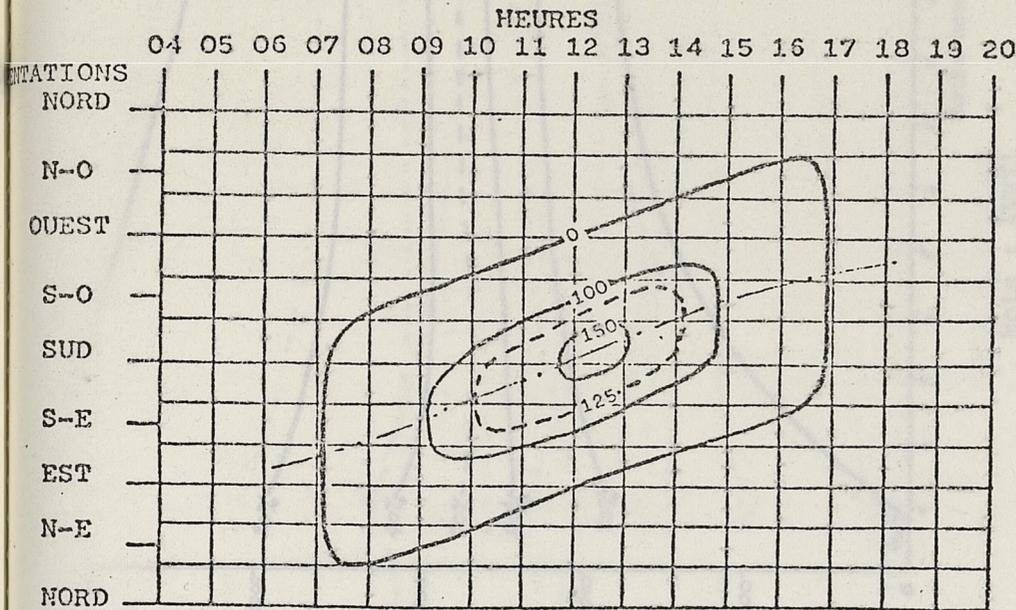
N.B./ Les éclaircissements DIFFUS et GLOBAL sont ceux reçus sur une SURFACE HORIZONTALE.

TRAPPES

R13

Figures: IV-9 et IV-10

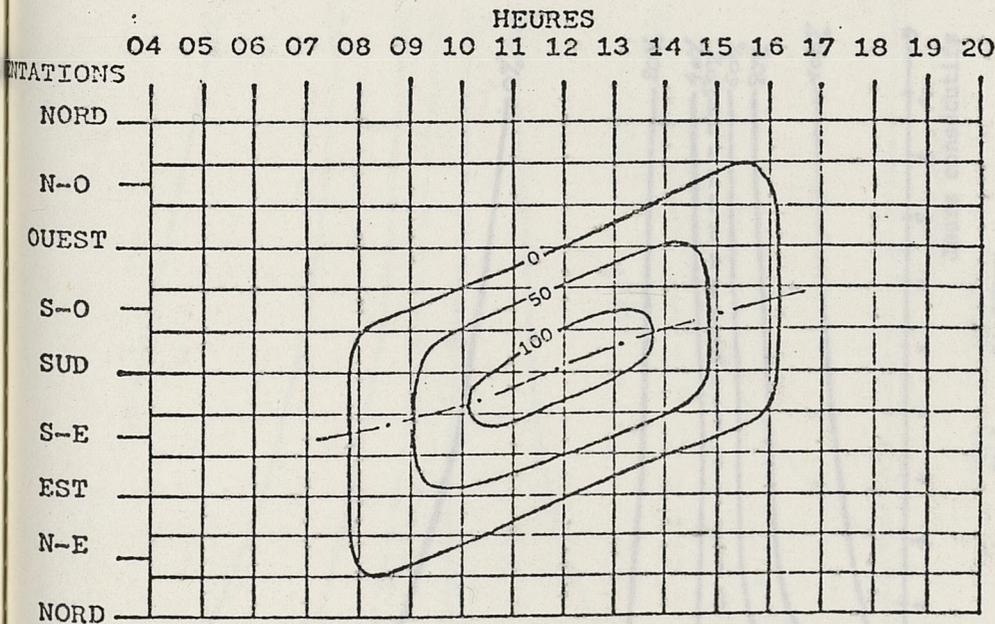
ECLAIREMENT SOLAIRE DIRECT MOYEN SUR UNE SURFACE VERTICALE PLANE SELON SON ORIENTATION (en W/M2)



MOIS:

NOVEMBRE

000 000 000 007 038 078 105 112 108 097 073 037 007 000 000 000 --- Eclaircement
 000 000 000 008 051 113 161 181 181 155 111 052 009 000 000 000 --- DIFFUS
 --- Eclaircement
 --- GLOBAL



MOIS:

DECEMBRE

000 000 000 001 020 051 076 092 089 073 052 019 001 000 000 000 --- Eclaircement
 000 000 000 001 024 070 110 134 131 104 069 024 001 000 000 000 --- DIFFUS
 --- Eclaircement
 --- GLOBAL

N.B./ Les éclaircements DIFFUS et GLOBAL sont ceux reçus sur une SURFACE HORIZONTALE.

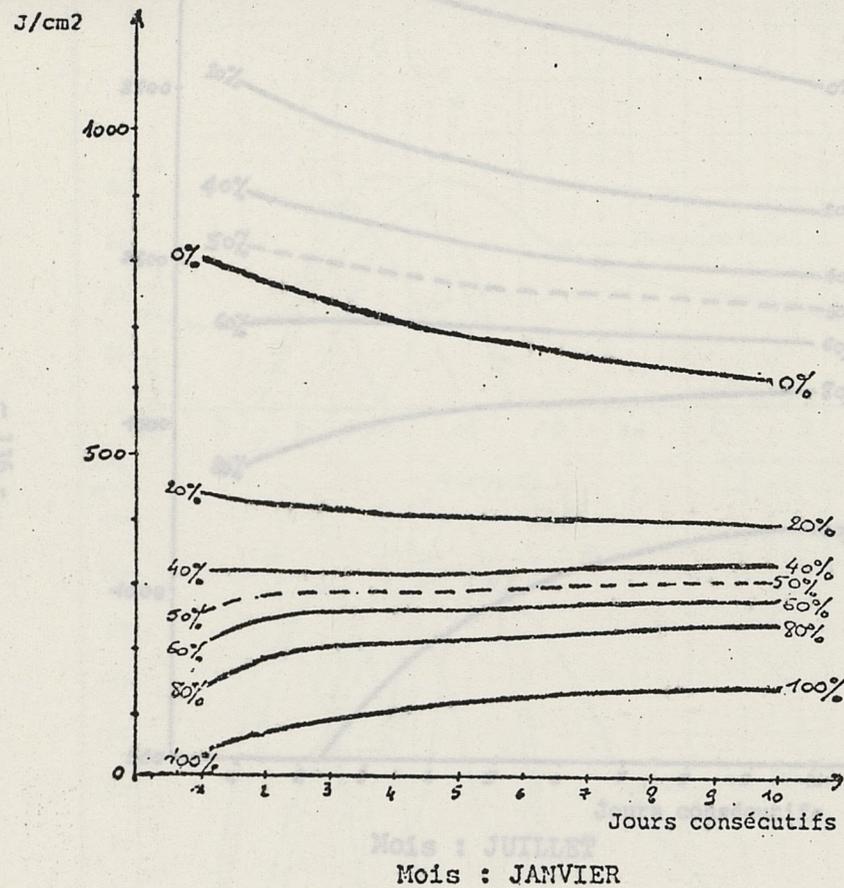


Figure : VI-1

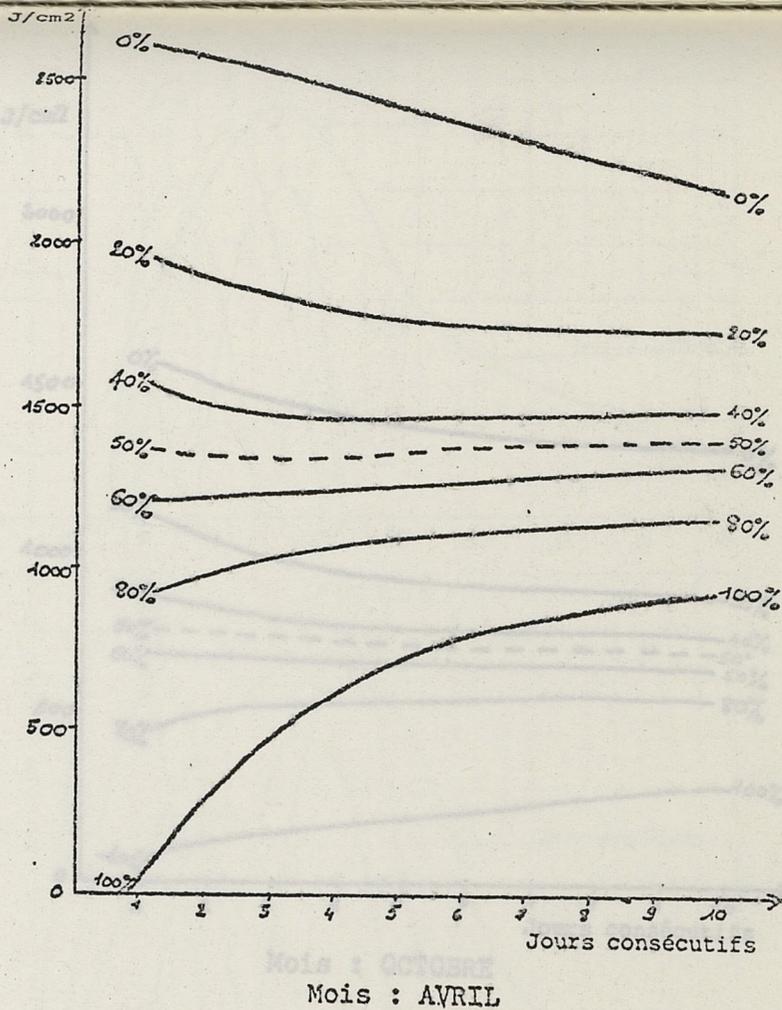


Figure : VI-2

DISTRIBUTION DES VALEURS QUOTIDIENNES DU RAYONNEMENT GLOBAL
RECU SUR UNE SURFACE HORIZONTALE AU COURS DE JOURS CONSECUTIFS.

RII

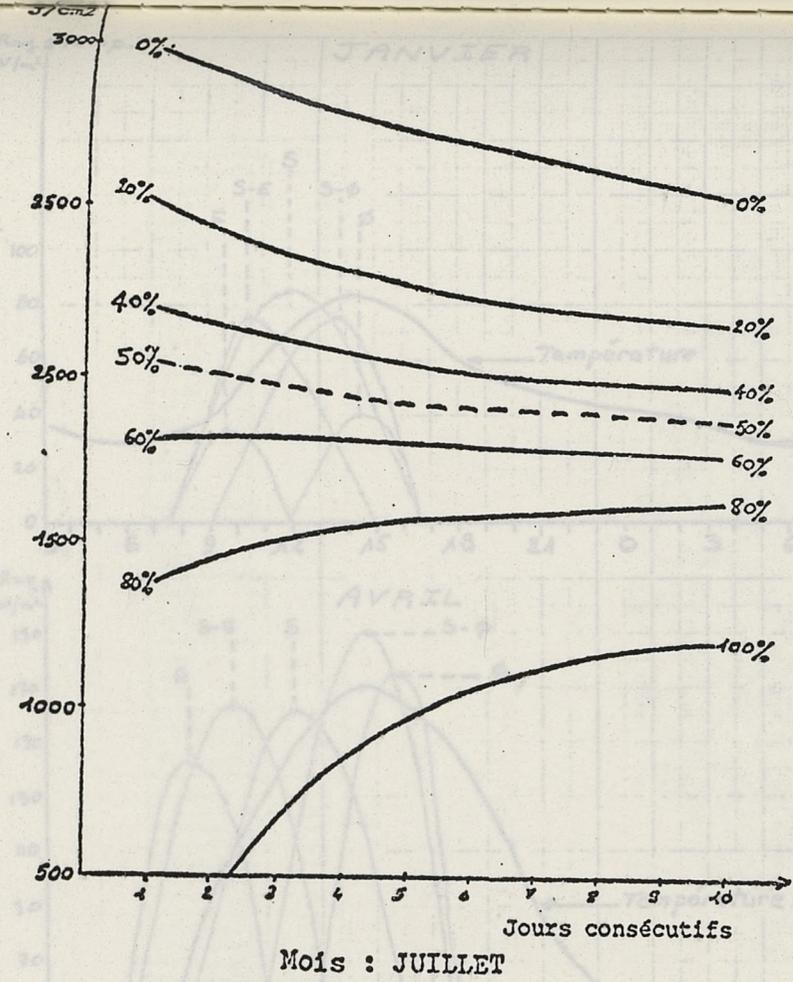


Figure : VI-3

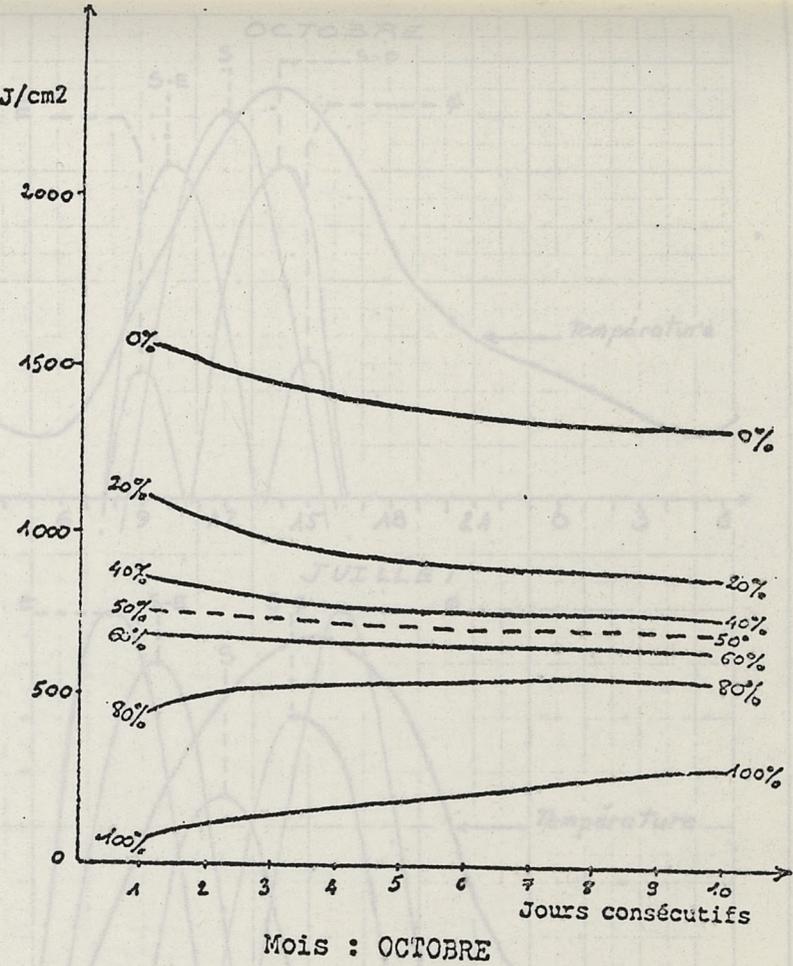
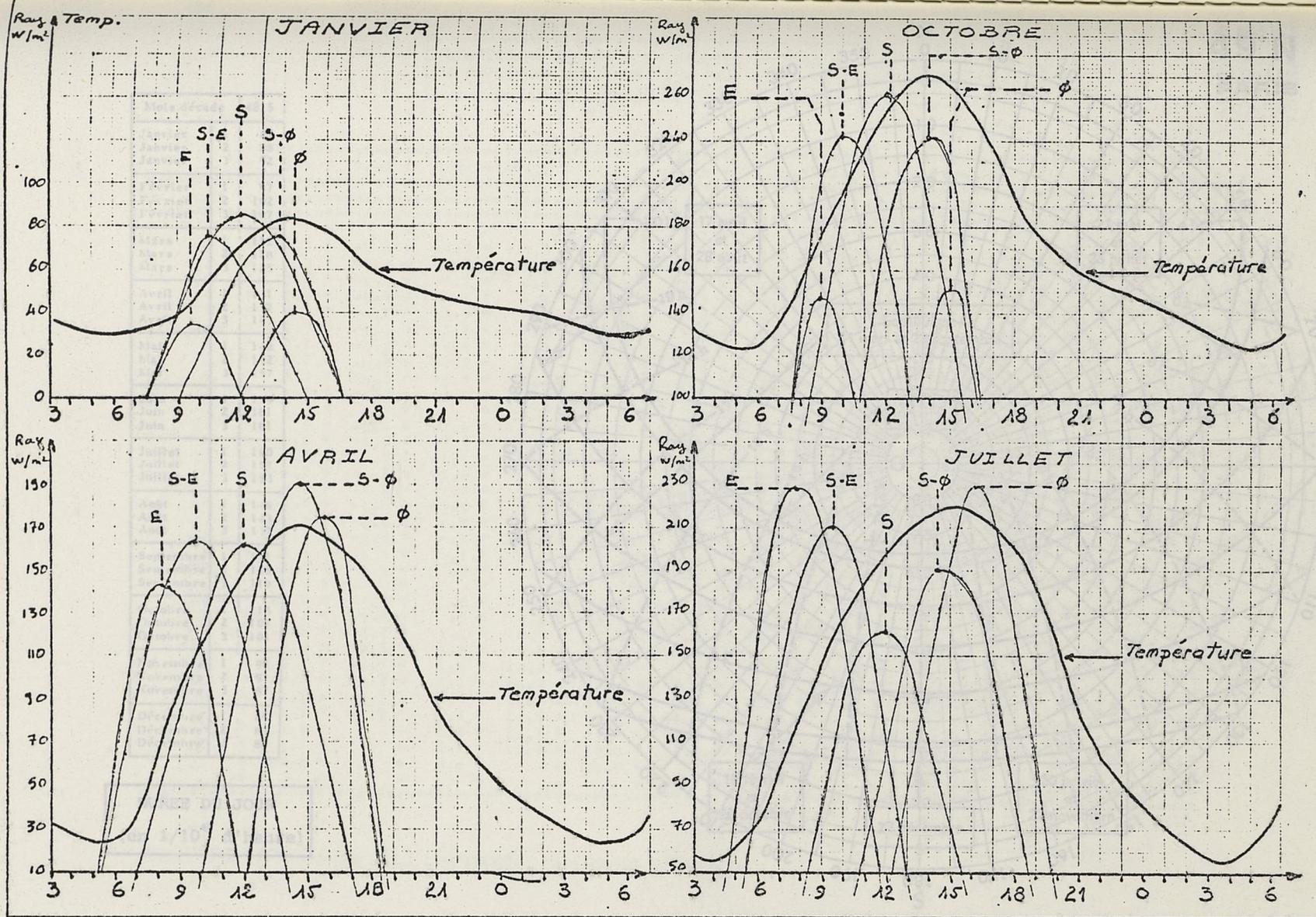


Figure : VI-4

DISTRIBUTION DES VALEURS QUOTIDIENNES DU RAYONNEMENT GLOBAL
RECU SUR UNE SURFACE HORIZONTALE AU COURS DE JOURS CONSECUTIFS.

RIS



DEPHASAGE ENTRE L'ECLAIREMENT DIRECT MOYEN RECU PAR DES SURFACES VERTICALES ET LA TEMPERATURE

Mois		décade	48.5
Janvier	1		85
	2		98
	3		92
Février	1		97
	2		102
	3		107
Mars	1		112
	2		118
	3		125
Avril	1		131
	2		137
	3		143
Mai	1		148
	2		152
	3		157
Juin	1		159
	2		161
	3		161
Juillet	1		160
	2		157
	3		153
Août	1		148
	2		143
	3		137
Septembre	1		131
	2		125
	3		119
Octobre	1		113
	2		107
	3		101
Novembre	1		96
	2		91
	3		87
Décembre	1		85
	2		83
	3		83

DUREE DU JOUR
(en 1/10^e d'heure)

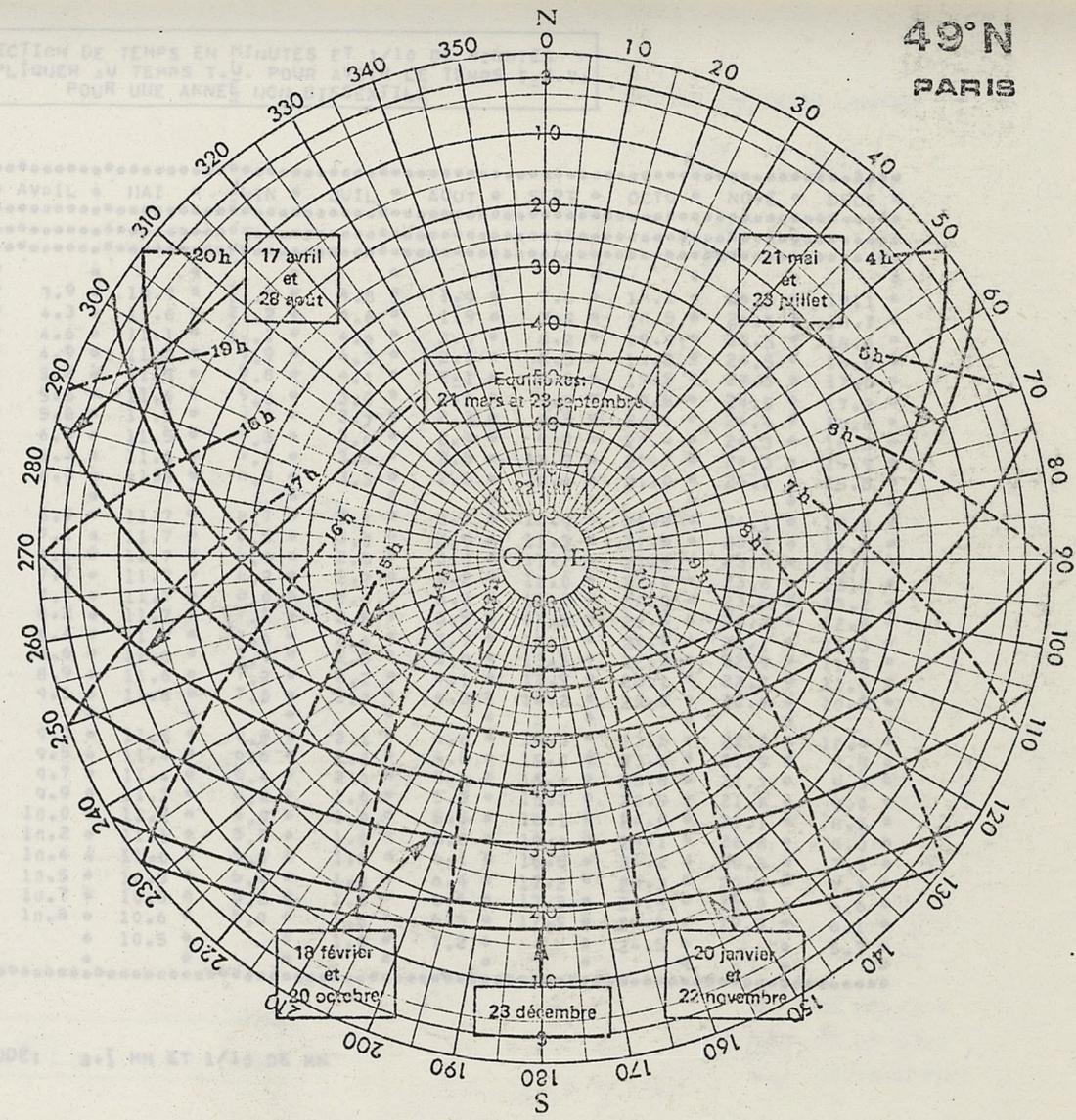


DIAGRAMME SOLAIRE

49°N
PARIS

61

CORRECTION DE TEMPS EN MINUTES ET 1/10 DE MINUTES
 A APPLIQUER AU TEMPS T.U. POUR AVOIR LE TEMPS T.S.V.
 POUR UNE ANNEE NON BISSEXTILE

METEOROLOGIE NATIONALE
 METEOROLOGIE
 METEOROLOGIE

STATION DE PARIS TRAPPEL
 LONG. 2.0

JOURS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCTO	NOVE	DECE
1	4.7	-5.5	-4.7	3.9	10.9	10.4	4.8	1.9	7.6	14.2	24.5	19.1
2	4.3	-5.6	-4.5	4.3	11.0	10.2	4.6	1.9	7.9	14.5	24.5	18.7
3	3.8	-5.7	-4.3	4.6	11.1	10.1	4.4	2.0	8.2	14.9	24.5	18.4
4	3.4	-5.9	-4.1	4.9	11.2	9.9	4.3	2.0	8.5	14.2	24.5	18.0
5	2.9	-6.0	-3.9	5.2	11.3	9.8	4.1	2.1	8.8	14.5	24.5	17.6
6	2.5	-6.1	-3.7	5.5	11.4	9.6	3.9	2.2	9.2	14.8	24.5	17.2
7	2.1	-6.1	-3.4	5.8	11.5	9.4	3.7	2.3	9.5	15.1	24.4	16.8
8	1.7	-6.2	-3.2	6.0	11.5	9.3	3.6	2.4	9.9	15.4	24.3	16.3
9	1.3	-6.3	-2.9	6.3	11.6	9.1	3.4	2.5	10.2	15.7	24.3	15.9
10	.8	-6.3	-2.7	6.6	11.6	8.9	3.3	2.6	10.6	16.0	24.2	15.5
11	.5	-6.3	-2.4	6.9	11.7	8.7	3.1	2.7	10.9	16.3	24.1	15.0
12	.1	-6.3	-2.1	7.1	11.7	8.5	3.0	2.9	11.3	16.6	23.9	14.6
13	-.3	-6.3	-1.9	7.4	11.7	8.4	2.9	3.0	11.7	16.9	23.8	14.1
14	-.7	-6.3	-1.6	7.7	11.7	8.2	2.7	3.2	12.0	17.2	23.6	13.7
15	-1.0	-6.3	-1.3	7.9	11.7	8.0	2.6	3.3	12.4	17.5	23.5	13.2
16	-1.4	-6.3	-1.0	8.2	11.7	7.8	2.5	3.5	12.8	17.8	23.3	12.8
17	-1.7	-6.2	-.7	8.4	11.7	7.6	2.4	3.7	13.1	18.1	23.1	12.3
18	-2.1	-6.2	-.4	8.6	11.6	7.4	2.3	3.9	13.5	18.4	22.9	11.8
19	-2.4	-6.1	-.1	8.9	11.6	7.2	2.2	4.1	13.9	18.7	22.7	11.4
20	-2.7	-6.0	.2	9.1	11.6	7.0	2.2	4.3	14.2	19.0	22.4	10.9
21	-3.0	-5.9	.5	9.3	11.5	6.8	2.1	4.6	14.6	19.3	22.2	10.4
22	-3.3	-5.8	.8	9.5	11.4	6.6	2.0	4.8	15.0	19.6	21.9	9.9
23	-3.5	-5.7	1.1	9.7	11.4	6.4	2.0	5.0	15.4	19.9	21.7	9.5
24	-3.8	-5.5	1.4	9.9	11.3	6.2	1.9	5.3	15.7	20.2	21.4	9.0
25	-4.1	-5.4	1.8	10.0	11.2	6.0	1.9	5.5	16.1	20.5	21.1	8.5
26	-4.3	-5.2	2.1	10.2	11.1	5.8	1.9	5.8	16.4	20.8	20.8	8.0
27	-4.5	-5.1	2.4	10.4	11.0	5.6	1.8	6.1	16.8	21.1	20.5	7.5
28	-4.7	-4.9	2.7	10.5	10.9	5.4	1.8	6.4	17.2	21.4	20.2	7.1
29	-4.9		3.0	10.7	10.8	5.2	1.8	6.6	17.5	21.7	19.8	6.6
30	-5.1		3.3	10.8	10.6	5.0	1.8	6.9	17.9	22.0	19.5	6.1
31	-5.3		3.6		10.5		1.9	7.2		22.3		5.7

- 139 -

CORRECTION DE TEMPS DUE A LA LONGITUDE: 3.1 MN ET 1/10 DE MN

62

METÉOROLOGIE NATIONALE
SVM/CLIM/CALCUL

STATION DE PARIS TRAPPES

LONG. : 2.01
LAT. : 48.45

U D	2/4 M/S	5/9 M/S	≥10 M/S	TOTAL
02	3.02	2.00	+	5.97
04	3.17	2.02	+	5.23
06	1.98	1.05	+	3.05
08	1.82	.59	+	2.42
10	1.71	.48	.	2.19
12	1.33	.32	+	1.66
14	1.47	.49	+	1.98
16	1.94	.83	+	2.85
18	2.20	1.64	.10	3.84
20	2.69	2.21	.26	5.76
22	3.31	3.81	.32	7.44
24	3.66	4.29	.49	8.34
26	3.41	2.93	.22	6.56
28	3.00	2.05	.16	5.21
30	3.34	1.20	.07	4.70
32	3.14	1.00	+	4.17
34	2.69	.76	+	3.47
36	3.20	1.22	+	4.52

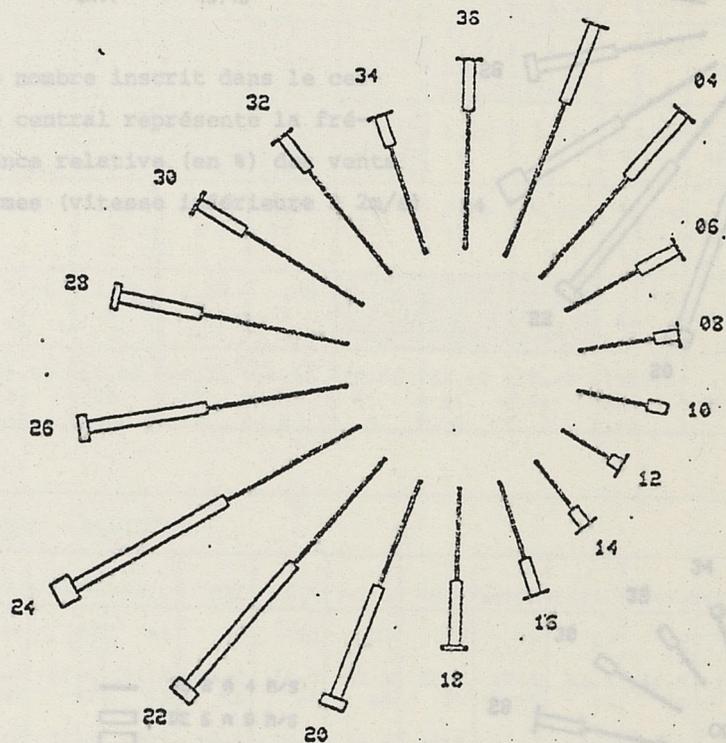
LE SIGNE + INDIQUE UNE FREQUENCE
NON NULLE MAIS INFÉRIEURE A 0.05%

FREQUENCES MOYENNES DES DIRECTIONS DU VENT
PAR GROUPES DE VITESSES : 2-4 M/S, 5-9 M/S ET 10 M/S ET PLUS.

PERIODE : 1962-1975

STATION DE PARIS TRAPPES

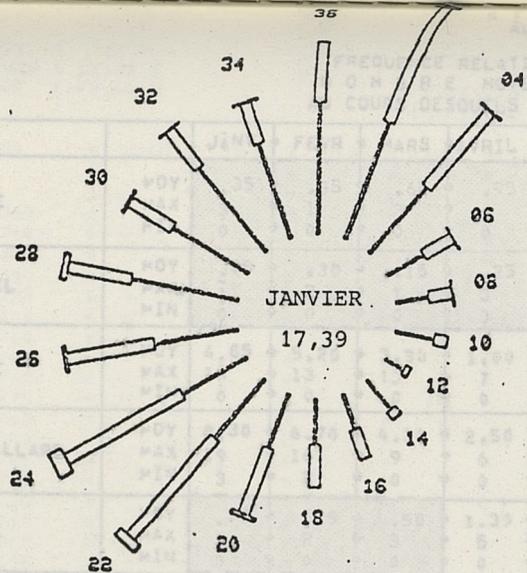
LONG. : 2.01
LAT. : 48.45



— DE 2 A 4 M/S
▨ DE 5 A 9 M/S
▣ 10 M/S ET PLUS

10.0%

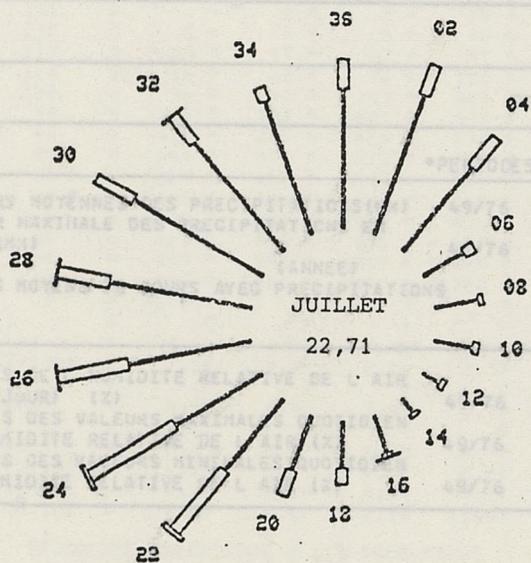
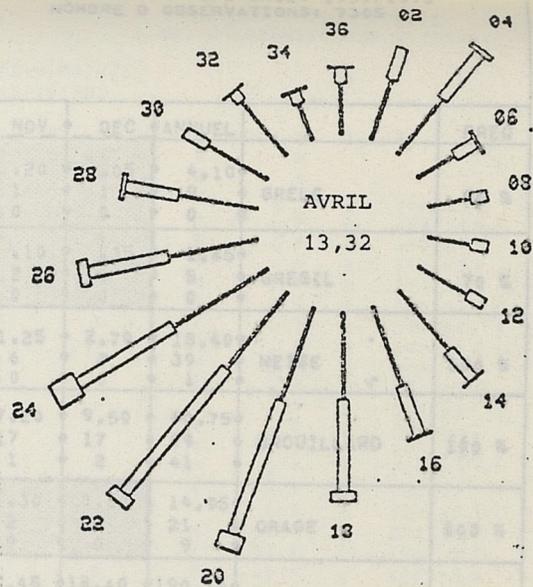
FREQUENCES MOYENNES DES DIRECTIONS DU VENT PAR COUPLES DE VITESSES



STATION DE PARIS TRAPPES

LONG. : 2.01
LAT. : 48.46

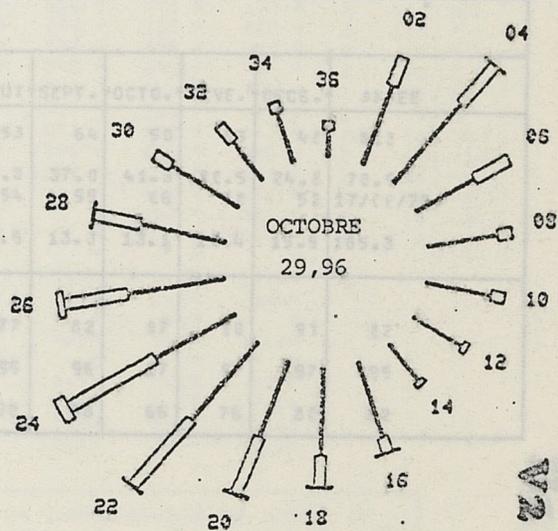
(Le nombre inscrit dans le cercle central représente la fréquence relative (en %) des vents calmes (vitesse inférieure à 2m/s)



— DE 2 A 4 M/S
▬ DE 5 A 9 M/S
□ 10 M/S ET PLUS

0 19,0%

FREQUENCES MOYENNES DES DIRECTIONS DU VENT PAR COUPLES DE VITESSE



V2

FREQUENCE RELATIVE ANNUELLE (COL. FREQ) ET
 NOMBRE MOYEN, MAXIMAL, ET MINIMAL DE JOURS
 AU COURS DESQUELS ON A OBSERVE LES PHENOMENES SUIVANTS :

		JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCTO9	NOV	DEC	ANNUEL	FREQ
GRELE	MOY MAX MIN	.35 3 0	.35 1 0	.65 3 0	.25 4 0	.65 3 0	.20 2 0	.40 2 0	.15 1 0	.05 1 0	.10 1 0	.20 1 0	.05 1 0	4.10 9 0	GRELE 95 %
GRESIL	MOY MAX MIN	.15 1 0	.30 2 0	.15 1 0	.25 3 0	0.00 0 0	0.00 0 0	.05 1 0	0.00 0 0	0.00 0 0	.10 1 0	.10 2 0	.35 7 0	1.45 5 0	GRESIL 70 %
NEIGE	MOY MAX MIN	4.85 10 0	5.20 13 0	3.30 10 0	1.00 7 0	.05 1 0	0.00 0 0	.05 1 0	0.00 0 0	0.00 0 0	0.00 0 0	1.25 6 0	2.70 7 0	18.40 39 1	NEIGE 100 %
BROUILLARD	MOY MAX MIN	8.30 19 3	6.70 16 2	4.30 9 0	2.50 5 0	.95 5 0	1.15 4 0	2.05 7 0	3.15 6 0	5.45 16 0	9.55 18 2	7.20 17 1	9.50 17 2	60.75 69 41	BROUILLARD 100 %
ORAGE	MOY MAX MIN	.30 2 0	.25 2 0	.50 3 0	1.30 5 0	2.65 7 0	3.05 6 0	2.75 6 0	2.35 6 0	.95 4 0	.55 3 0	.30 2 0	0.00 0 0	14.95 21 9	ORAGE 100 %
PLUIE	MOY MAX MIN	18.15 23 9	17.00 27 1	16.90 23 5	15.70 24 5	14.65 25 7	13.90 21 6	13.90 22 3	15.15 25 6	14.05 24 2	14.85 21 6	17.45 24 3	18.40 28 8	190.10 218 143	PLUIE 100 %

- 142 -

PRECIPITATIONS - HUMIDITE

	*PERIODES	JANV.	FEVR.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCTO.	NOVE.	DECE.	ANNEE
HAUTEURS MOYENNES DES PRECIPITATIONS(MM)	49/76	53	44	39	42	51	53	53	53	64	50	63	42	613
HAUTEUR MAXIMALE DES PRECIPITATIONS EN 24 HEURES (MM)	49/76	23.9	23.3	17.4	22.3	31.2	78.9	67.8	32.3	37.0	41.3	30.5	24.2	72.9
(ANNEE)		65	66	52	63	53	70	66	54	55	66	52	52	17/06/70
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC PRECIPITATIONS ≥ 0.1MM		16.1	15.0	13.3	13.6	13.4	11.2	11.3	12.5	13.3	13.1	16.4	15.5	165.3
MOYENNES DE L HUMIDITE RELATIVE DE L AIR (3 RELEVES/JOUR) (%)	49/76	89	85	79	75	76	76	75	77	82	87	90	91	82
MOYENNES DES VALEURS MAXIMALES QUOTIDIEN NES DE L HUMIDITE RELATIVE DE L AIR (%)	49/76	96	95	94	93	94	94	94	95	96	97	97	97	95
MOYENNES DES VALEURS MINIMALES QUOTIDIEN NES DE L HUMIDITE RELATIVE DE L AIR (%)	49/76	77	68	58	51	52	53	51	52	58	66	76	80	62

FREQUENCE INFÉRIEURE À 0.5 POUR MILLE
 * 999 FREQUENCE COMPRISE ENTRE 999.4 ET 999.9 POUR MILLE
 0 AUCUN CAS CORRESPONDANT AU SEUIL

HUMIDITE ABSOLUE (T) et TEMPERATURES DE ROSEE (T_r)

MM

ALTITUDE : 167 M
LONGITUDE : 02.01 E
LATITUDE : 48.46 N

FREQUENCES MOYENNES POUR MILLE DES TENSIONS DE VAPEUR TRI-HORAIRE
EGALES OU SUPERIEURES AUX SEUILS INDIQUES EN ORDONNEE (1/10 MB)

T.VAP	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE	T _{vap}	T _{ar}
360														360	27,1
350														350	26,7
340														340	26,2
330							0							330	25,7
320														320	25,2
310						0		0						310	24,7
300														300	24,1
290														290	23,5
280							1							280	23
270							1							270	22,3
260														260	21,7
250						1	2	1	0					250	21,1
240						1	3	1						240	20,4
230					0	1	6	2	1				1	230	19,7
220						1	9	4	1				1	220	19
210						4	18	10	4				3	210	18,3
200			0			8	34	19	10	0			6	200	17,5
190						1	16	8	4				12	190	16,7
180						3	32	100	86	1			23	180	15,9
170					0	6	67	155	87	5			39	170	15
160					1	15	119	232	144	15	0		64	160	14
150		0			1	36	196	342	343	219	1	0	99	150	13
140					6	77	294	481	484	316	89		148	140	12
130		2	8		15	134	411	611	624	421	150	14	201	130	10,8
120	15	17	27		40	225	556	750	767	564	266	35	272	120	9,7
110	45	42	76		91	328	679	844	865	642	387	72	338	110	8,4
100	94	100	163		180	476	806	928	941	813	502	158	423	100	7
90	179	182	281		305	645	910	981	981	915	647	284	517	90	5,5
80	313	305	428		598	900	989	999	999	963	779	427	609	80	3,8
70	468	473	572		756	961	998	999	1000	998	958	763	795	70	1,3
60	664	668	737		893	993	1000	999	999	999	992	901	883	60	0
50	830	826	885		968	999	999	999	1000	998	973	873	947	50	-2,6
40	925	918	973		995	1000	999	999	999	999	996	951	980	40	-5,5
30	969	962	995		999	999	999	999	999	999	996	951	980	30	-3,4
20	998	992	999		999	999	999	999	999	999	996	951	980	20	-14,5
10	999	1000	1000		1000	999	999	999	999	999	996	951	980	10	-22,5
0	1000	1000	1000		1000	999	999	999	999	999	996	951	980	0	
MOYENNE	7.0*	6.9*	7.6*	8.7*	11.0*	13.5*	15.0*	15.0*	13.6*	11.2*	8.7*	7.5*	10.5*		
ECART-TYPE	2.2*	2.2*	2.2*	2.3*	2.5*	2.8*	3.0*	2.7*	2.9*	2.6*	2.2*	2.2*	3.9*		
MEDIANE	6.8*	6.9*	7.5*	8.7*	10.9*	13.4*	14.9*	14.9*	13.4*	11.0*	8.6*	7.4*	10.2*		
1 QUINTILE	5.2*	5.2*	5.6*	6.7*	9.0*	11.0*	12.5*	12.7*	11.1*	8.8*	6.7*	5.5*	6.9*		
2 QUINTILE	6.3*	6.4*	6.2*	8.0*	10.3*	12.6*	14.1*	14.2*	12.7*	10.3*	8.0*	6.8*	9.1*		
3 QUINTILE	7.4*	7.4*	8.2*	9.3*	11.5*	14.1*	15.6*	15.6*	14.2*	11.8*	9.2*	8.0*	11.3*		
4 QUINTILE	8.8*	8.9*	9.7*	10.8*	13.3*	16.0*	17.4*	17.4*	16.3*	13.6*	10.7*	9.4*	14.0*		

* FREQUENCE INFÉRIEURE A 0,5 POUR MILLE
 * 999 FREQUENCE COMPRISE ENTRE 999.6 ET 999.9 POUR MILLE
 0 AUCUN CAS CORRESPONDANT AU SEUIL

HUMIDITE ABSOLUE (T_{vap}) et TEMPERATURES DE ROSEE (T_{ar})

LECTURE DES DONNEES

C0: cf. Présentation du climat

T0: Le graphe indique le temps pendant lequel la température est inférieure à la valeur en ordonnée (en fraction de l'année en %); exemple: 10% de l'année, les températures sont inférieures à 0°C.

T1: Le graphe des variations annuelles montre la division de l'année en saisons; On remarque: - Le déphasage entre le solstice d'été (22 juin) et le maximum des températures autour du 21 juillet, déphasage qu'on retrouve entre le solstice d'hiver (22 décembre) et le minimum des températures autour du 21 janvier,
- La pente plus forte de la courbe en automne qu'au printemps, indiquant la brièveté de celui-ci,
- L'augmentation des amplitudes avec la température (de 5°C en hiver à 10°C en été).

T2: Le tableau I nous montre:

- la quasi absence des jours de grands froids ($T_{\min} \leq -15^{\circ}\text{C}$) et de fortes chaleurs ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$),
- la localisation des jours sans dégel ($T_{\max} \leq 0^{\circ}\text{C}$) et de fortes gelées ($T_{\min} \leq -10^{\circ}\text{C}$) dans les trois mois d'hiver
- la localisation des jours de chaleur ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) dans les quatre mois d'été
- le fort nombre de jours avec gelée ($T_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$) (≈ 59)

Le tableau II exprime ces mêmes phénomènes par rapport aux problèmes du bâtiment et donne ainsi le nombre de jours dans l'année où se pose les problèmes de confort.

T3: Les variations diurnes moyennes pour un mois caractéristique de chaque saison permettent de situer les minimums (entre 3 et 6 heures) et les maximums (vers 14 h) de température. Les valeurs moyennes diurnes et nocturnes permettent de faire un bilan thermique en tenant compte des variations du coefficient de déperdition volumique (G) entre le jour et la nuit (cas des isolations mobiles de type volets, ...)

R1: Les différentes courbes suivent la progression de la durée du jour, avec un minimum proche du solstice d'hiver et un maximum proche du solstice d'été; les variations sur les différentes inclinaisons montrent que les différences pour la période d'hiver sont très faibles, et ne se font sentir qu'à partir des mi-saisons, en étant d'autant plus sensibles qu'on se rapproche de la verticale.

R2: Les variations annuelles du rayonnement global sur différents plans verticaux montrent pour l'hiver la décroissance régulière de l'énergie reçue à mesure qu'on s'éloigne du sud, tandis qu'un renversement s'opère en été, le soleil ayant un mauvais angle d'incidence sur un plan vertical sud (il est à son point culminant en face de celui-ci). On peut également noter que l'éclairement de la façade nord n'est pas négligeable, surtout en été.

R3: La fraction et la durée d'insolation croient et décroient simultanément, et ce en relation avec la durée du jour: maximum en juillet, minimum en décembre; le rayonnement, fonction de la fraction d'insolation, varie donc dans le même sens. Enfin, on peut noter que σ ne dépasse jamais 0,5 (en moyenne).

Les valeurs numériques des irradiations globales reçues par différents plans permettent d'effectuer des calculs sommaires; les valeurs entre parenthèses sont les maximums calculés pendant la période de mesure. Enfin, la légère différence entre les valeurs relatives aux plans S-E et S-O d'une part, EST et OUEST d'autre part laisse apparaître une légère dissymétrie du rayonnement entre le matin et l'après-midi; mais la faible période de mesures ne permet pas encore d'en tirer des conclusions formelles.

R4 à R10: Ces figures permettent de déterminer pour chaque mois:

- l'énergie moyenne reçue par un plan quelconque,
- l'inclinaison et l'orientation optimum (lieu du maximum)
- le déplacement du maximum en fonction du mois
- les orientations limites pour capter en fonction du mois, lisibles à partir de la forme des isolignes.

La figure III-13, indiquant l'énergie théorique maximum reçue par un plan quelconque le mois le plus chaud de l'année permet de cerner les problèmes de surchauffe.

R11 à R14: Ces figures permettent de situer dans le temps et dans l'espace au cours de la journée les lieux des maximums (trait interrompu court-moyen);

- les orientations sont représentées en ordonnée,
- les heures solaires en abscisse,
- l'éclairement solaire direct moyen reçu est représenté par des isolignes cotées en w/m^2 .

- R15 - R16: Ces figures permettent de déterminer l'énergie moyenne sur laquelle on peut compter sur une période de plusieurs jours consécutifs;
- le nombre de jours consécutifs est porté en abscisses,
 - les valeurs de l'irradiation solaire globale en ordonnées
 - les fréquences de dépassement sont représentées par des isolignes cotées en pourcentages (0% pour le maxi, 20%, 40%, 60% et 80% pour les quintiles, 50% pour les médianes et 100% pour le mini).

Exemple: en janvier, l'énergie moyenne minimum reçue sur 5 jours consécutifs sera de 120 J/cm², tandis qu'on aura 80 chances pour cent de recevoir en moyenne plus de 220 J/cm²; sur 10 jours consécutifs, on aura 60% de chances de recevoir plus de 250 J/cm², tandis qu'on sera sûr de recevoir plus de 150 J/cm², etc... (1 J/cm² = 2,8 wh/m²)

R17: La superposition des courbes de température et d'ensoleillement permet d'optimiser la gestion des apports solaires en fonction de l'heure et de l'orientation, et donc éventuellement de calculer le déphasage optimum pour la retransmission des apports.

G1: Le diagramme solaire permet de connaître à toute heure et tous les jours de l'année la position exacte du soleil (hauteur et azimut), les heures de lever et de coucher du soleil avec l'azimut correspondant. On peut y tracer les masques dus à l'environnement.

G2: Ce tableau permet de calculer à quelle heure légale correspond une heure solaire; il faut pour cela rajouter en hiver une heure, en été deux heures à l'heure universelle (heure du méridien de Greenwich).

V1 - V2: La rose annuelle montre la dominante OUEST - S-O des vents, tandis que les roses mensuelles montrent une relative régularité de ceux-ci au cours de l'année. Les vitesses maximums se situent en général entre 12 et 15 h, les minimums vers 3 h, suivant ainsi les variations de température.

H1: - grêle: il ne grêle en moyenne jamais plus d'un jour par mois (ce qui représente en moyenne 1% des jours de l'année), mais tous les mois de l'année sont touchés, avec un maximum en avril/mai, et un minimum entre septembre et octobre.

- grésil: il n'y a jamais en moyenne plus de 0,35 jour de grésil par mois, et on peut considérer ce phénomène comme négligeable.

- neige: les jours avec neige représentent en moyenne 5% des jours de l'année (18,40 jours), avec un maximum en février (5,2 jours en moyenne, 13 jours au maximum).

VARIATIONS MICROCLIMATIQUES

- brouillards: les brouillards touchent en moyenne 60,75 jours de l'année (soit 16,6% des jours), avec un maximum en octobre et décembre (19,5 jours) et un minimum en mai (0,95 jours).
 - orage: 4% des jours de l'année sont touchés par les orages, soit 14,95 jours en moyenne, avec un maximum autour de juin; décembre n'est jamais touché par les orages.
 - pluies: il pleut plus d'un jour sur deux (190 jours = 52% des jours), et ce de manière quasi régulière tout au long de l'année.
 - précipitations: les hauteurs maximales de précipitations sont enregistrées en septembre pour un nombre moyen de jours avec précipitations pourtant inférieur à la moyenne; il tombe la même quantité d'eau en janvier et en juin (53 mm), alors qu'il y a respectivement en moyenne 16,1 et 11,2 jours concernés: les pluies paraissent donc beaucoup plus fortes et concentrées en été qu'en hiver (cela est confirmé par la présence d'orages fréquents à cette époque); sur la période 1949-1976, la hauteur maximum de précipitations enregistrée en 24 heures est de 78,9 mm (en juin).
 - humidité relative: l'humidité relative varie peu au cours de l'année et de la journée; la moyenne de maxi quotidiens oscille autour de 95%, celle des mini entre 50% en été et 80% en hiver.
- H2: Le tableau de fréquence des tensions de vapeur d'eau permet de cerner les problèmes de condensation sur les parois froides par la détermination de la température de rosée; elle est minimum entre 3 et 6 h, maximum entre 12 et 18 h, suivant les variations de température, à l'inverse de l'humidité relative, minimum vers 15 h et maximum entre 3 et 6 h, ce qui prouve qu'elle croît et décroît moins brusquement que les températures.

L'étude de données relatives à deux stations météorologiques et remontant pour certaines à plus de deux siècles, Montsouris et Saint Maur, comparées aux données relatives à des stations rurales, a permis de déterminer le sens des variations et d'en quantifier certaines:

1) Températures:

- a) Moyennes: Les réchauffements observés depuis un siècle dans différentes stations laissent apparaître un réchauffement global de la planète de l'ordre de 0,15°C (cas de Besançon), contre un réchauffement de 1,16°C à St Maur et 1,05°C à Montsouris; le réchauffement dû à l'urbanisation serait donc de l'ordre de 1°C.

VARIATIONS MICROCLIMATIQUES

I LIMITE DE VALIDITE DES DONNEES DE TRAPPES

1) Environnement de la station de TRAPPES:

La station météorologique de TRAPPES fait partie de l'observatoire météorologique Teisserece de Buc.

Le site est très dégagé, situé sur un plateau au sud de la localité de Trappes, et à plusieurs centaines de mètres de l'agglomération.

L'abri et les instruments sont installés sur une aire gazonnée (albedo $\approx 0,2$) à 1,60 m du sol; les mesures du vent sont effectuées à 13 m au dessus du sol.

2) Comparaison avec d'autres stations:

La comparaison des données numériques relatives à Trappes avec celles de trois autres stations situées également en banlieue: Le Bourget, Orly et Villacoublay, ne font pas apparaître de différences notables.

Ainsi, ces données représentent les valeurs des paramètres pour la moyenne banlieue parisienne, encore rurale il y a quelques années, et maintenant en cours d'urbanisation (présence de la ville nouvelle de Saint Quentin les Yvelines pour Trappes). La question posée est alors de savoir quelles variations subissent ces valeurs avec l'urbanisation, et comment considérer le cas particulier de Paris.

II INFLUENCE DE L'URBANISATION: CAS PARTICULIER DE PARIS

L'étude de données relatives à deux stations météorologiques et remontant pour certaines à plus de deux siècles, Montsouris et Saint Maur, comparées aux données relatives à des stations rurales, a permis de déterminer le sens des variations et d'en quantifier certaines:

1) Températures:

a) Moyennes: Les réchauffements observés depuis un siècle dans différentes stations laissent apparaître un réchauffement global de la planète de l'ordre de $0,15^{\circ}\text{C}$ (cas de Besançon), contre un réchauffement de $1,16^{\circ}\text{C}$ à St Maur et $1,06^{\circ}\text{C}$ à Montsouris; le réchauffement dû à l'urbanisation serait donc de l'ordre de 1°C .

Actuellement, il y a une différence d'environ $1,6^{\circ}\text{C}$ entre les températures moyennes annuelles parisiennes et celles de la campagne environnante ($1,5^{\circ}\text{C}$ pour Trappes), en faveur de Paris. Ramenées à une altitude de 50 m, ces températures marquent bien la différence de 1°C notée précédemment et due à l'urbanisation (cf. fig. I page suivante)

b) Maximums, minimums et amplitudes (cf. fig. II et III page suivante)

Les températures maximums ont subies un accroissement de $1,1^{\circ}\text{C}$ en 100 ans, les minimums de $1,9^{\circ}\text{C}$, amenant une diminution de l'amplitude de $0,8^{\circ}\text{C}$.

Actuellement, la moyenne des températures maximums à Paris dépasse de 1°C celle de Trappes, tandis que la moyenne des minimums dépasse celle de Trappes de 2°C .

- c) Gelées: Le nombre de jours de gelées a baissé de 45 à 35 jours par an (soit 35%) en 70 ans, amenant un retard des premières gelées et une précocité des dernières; actuellement, on note plus de 50 jours de gelées en banlieue contre 30 à Paris (cf. § IV page suivante).

Ainsi, d'une manière générale, la ville apparaît comme un "îlot de chaleur".

2) Rayonnement solaire et durée d'insolation:

- a) L'augmentation de la pollution atmosphérique: industrielle (poussière, SO_2), domestique (par les habitants, CO_2), et des véhicules (CO) a entraîné une diminution de l'irradiation globale reçue au sol de 10% à St Maur, 20% au centre de Paris, entre 1881 et 1950.
- b) La durée d'insolation par contre ne semble pas tellement affectée par l'urbanisation; on peut pourtant noter une différence entre les durées d'insolation à Monsouris (1865 h/an) et les différentes stations de banlieue (1631 h/an au Bourget, 1657 à Trappes, 1725 à Villacoublay). Ceci pourrait être dû au fait que les effets de "l'îlot de chaleur urbain" qui contribue à diminuer sensiblement la fréquence des brouillards épais et des stratus bas l'emporte sur le léger accroissement de la nébulosité dû à la présence de noyaux de condensation.

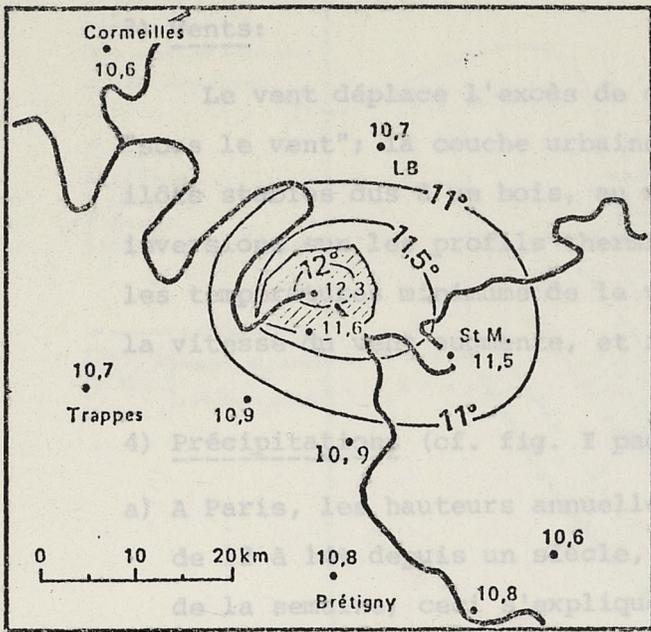


FIG. I. — Région parisienne.

Températures moyennes annuelles $\left(\frac{T_x + T_n}{2}\right)$
 « réduites à l'altitude de 50 mètres » (0,45 °C pour 100 m)
 (période 1951-1960)

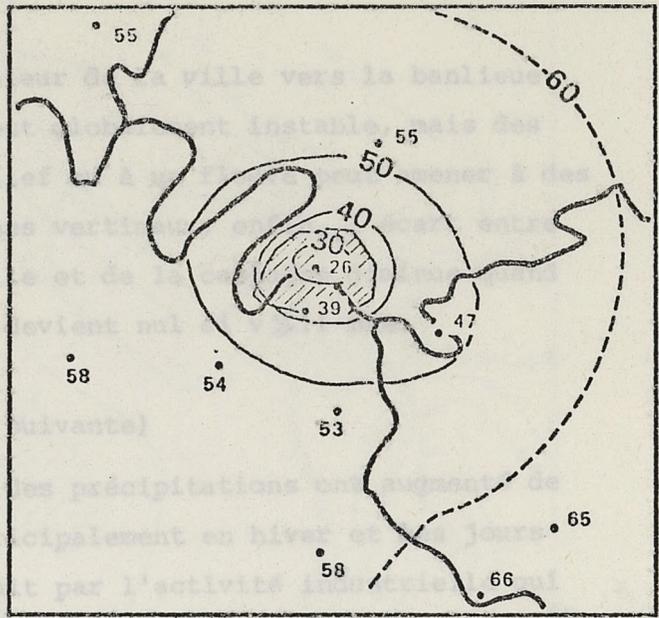


FIG. IX. — Région parisienne.

Nombre moyen de jours de gelées, durant la décennie 1951-1960
 (jour de gelée = $T_n \leq 0^\circ\text{C}$)

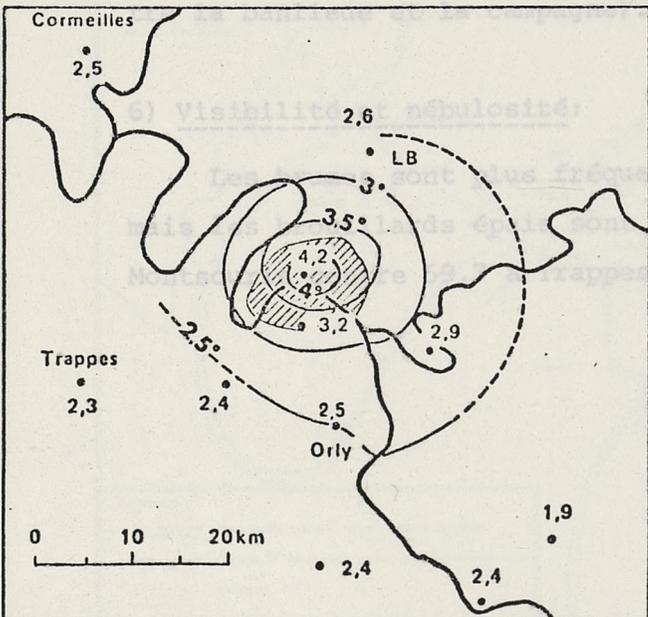


FIG. II. — Région parisienne.

Températures minimales moyennes, durant décembre (1951-1960)

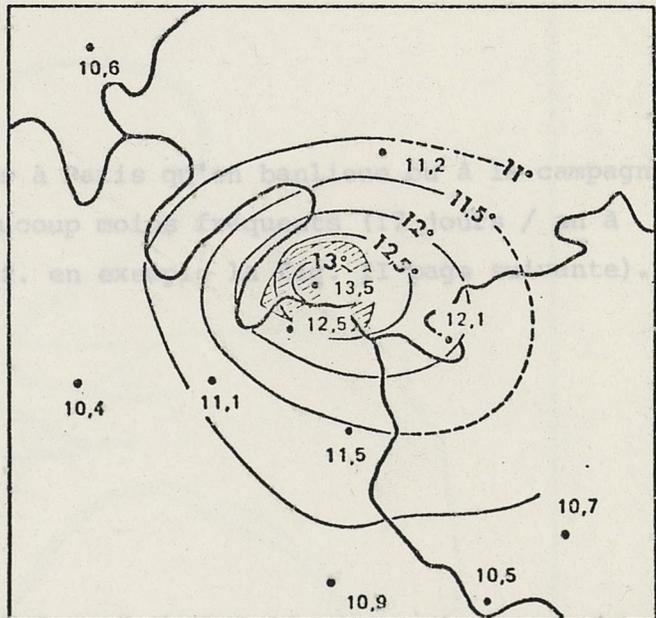


FIG. III. — Région parisienne.

Températures minimales moyennes, durant juin (1951-1960)

3) Vents:

Le vent déplace l'excès de chaleur de la ville vers la banlieue "sous le vent"; la couche urbaine est globalement instable, mais des îlots stables dus à un bois, au relief ou à un fleuve peut amener à des inversions sur les profils thermiques verticaux; enfin, l'écart entre les températures minimums de la ville et de la campagne diminue quand la vitesse du vent augmente, et il devient nul si $v \geq 11$ m/s.

4) Précipitations (cf. fig. I page suivante)

a) A Paris, les hauteurs annuelles des précipitations ont augmenté de 12 à 14% depuis un siècle, principalement en hiver et les jours de la semaine; ceci s'expliquerait par l'activité industrielle qui a tendance à accroître les fortes pluies par augmentation des noyaux de condensation.

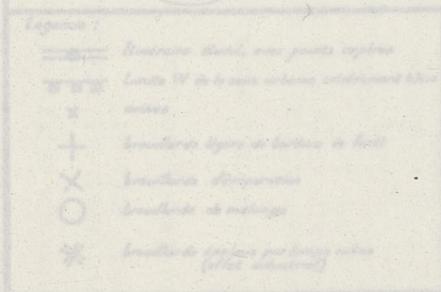
b) Les contrastes de surfaces (minéral/végétal) favorisent la convection et les mouvements d'air verticaux entraînant des averses locales, d'où la création de trajectoires préférencielles et de zones grêlées.

5) Humidité relative:

L'humidité relative à Paris est plus faible d'environ 15% que l'humidité relative de la campagne environnante (cette différence est de 3 à 5% entre la banlieue et la campagne).

6) Visibilité et nébulosité:

Les brumes sont plus fréquentes à Paris qu'en banlieue ou à la campagne, mais les brouillards épais sont beaucoup moins fréquents (17 jours / an à Montsouris contre 59,7 à Trappes) (cf. en exemple la fig. II page suivante).

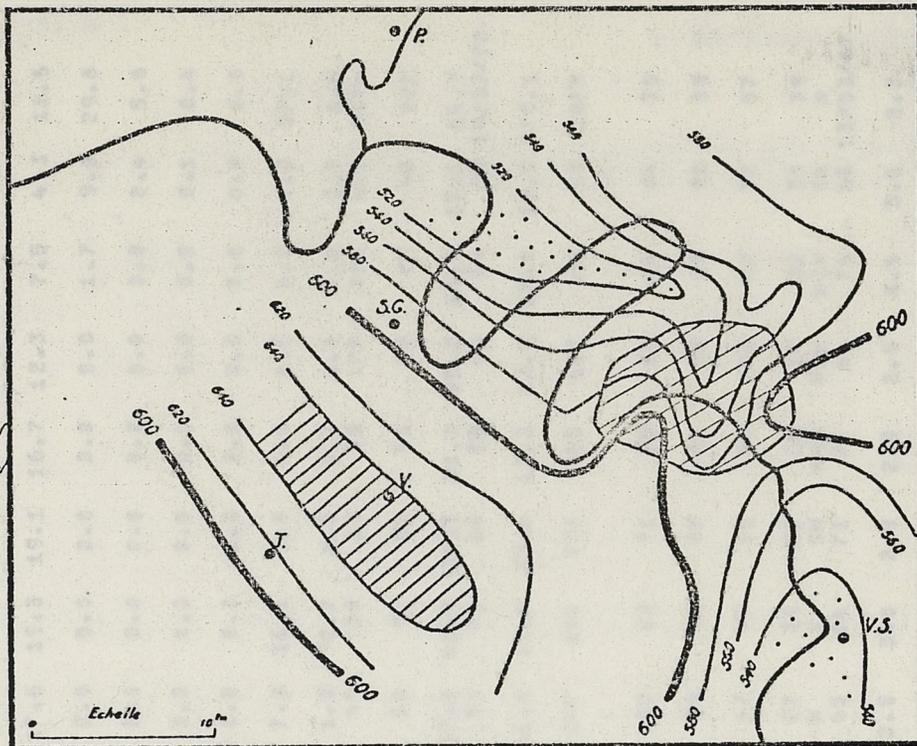


1 Répartition géographique moyenne des pluies aux environs de Paris.

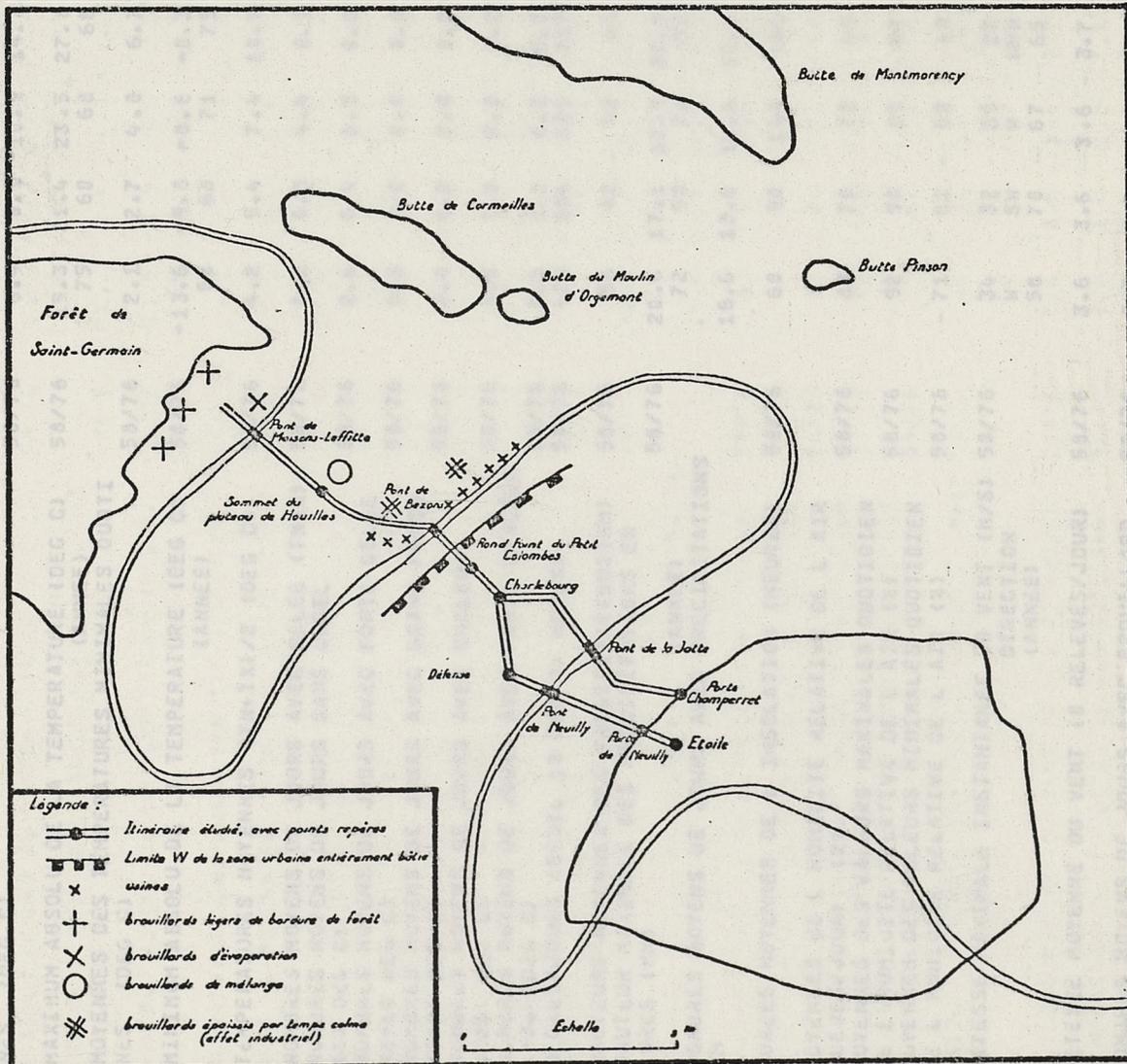
Observations des années 1823-1824
dans 50 stations de Paris et de
banlieue
Carte dressée par l'Observatoire
de la Tour Saint Jacques.

P.: Fontaine
S.G.: S' Germain
V.: Versailles
T.: Trappes
V.S.: Villeneuve S' Georges

— isohyète en mm
▨ maximum pluvial
⋯ minimum pluvial



2 Carte explicative des variations d'intensité du brouillard entre la Forêt de Saint-Germain et Paris



DONNEES NUMERIQUES CLIMATOLOGIQUES

PERIODES JANV.* FEVR.* MARS* AVRIL* MAI* JUIN* JUIL.* AOUT* SEPT.* OCTO.* NOVE.* DECE.* ANNEE

	58/76	6.4	8.1	10.9	14.7	18.6	22.1	23.8	21.5	20.9	15.8	9.9	6.4	15.1
MOYENNES DES TEMPERATURES MAXIMALES QUOTIDIENNES (DEG C)	58/76	6.4	8.1	10.9	14.7	18.6	22.1	23.8	21.5	20.9	15.8	9.9	6.4	15.1
MAXIMUM ABSOLU DE LA TEMPERATURE (DEG C) (ANNEE)	58/76	15.3	21.4	23.5	27.8	30.2	34.1	36.4	35.7	32.7	27.5	19.3	16.7	36.4
MOYENNES DES TEMPERATURES MINIMALES QUOTIDIENNES (DEG C)	58/76	2.1	2.7	4.0	6.7	10.1	13.1	14.9	14.7	12.5	9.0	5.1	2.3	8.1
MINIMUM ABSOLU DE LA TEMPERATURE (DEG C) (ANNEE)	58/76	-13.6	-9.8	-8.6	-0.3	2.8	4.2	9.0	8.2	5.8	1.2	-3.5	-10.8	-13.6
TEMPERATURES MOYENNES (TN+TX)/2 (DEG C)	58/76	4.2	5.4	7.4	10.7	14.3	17.6	19.3	19.1	16.7	12.3	7.5	4.3	11.6
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC GELEE (TNS0)	58/76	8.2	6.3	4.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	9.0	29.8
NOMBRES MOYENS DE JOURS SANS DEGEL (TMAX>0 DEG C)	58/76	2.6	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	5.8
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC FORTE GELEE (TMIN<-10 DEG C)	58/76	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC GRAND FROID (TMIN<-15 DEG C)	58/76	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC CHALEUR (TMAX>25 DEG C)	58/76	0.0	0.0	0.0	0.2	2.5	7.8	11.1	9.8	4.9	0.5	0.0	0.0	37.1
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC FORTE CHALEUR (TMAX>30 DEG C)	58/76	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.7	2.0	0.7	0.0	0.0	0.0	6.6
DEGRES/JOURS (SEUIL 18 DEG C) MOYENS	58/76	424	354	325	217	119	44	18	19	58	175	314	421	2494
HAUTEURS MOYENNES DES PRECIPITATIONS (MM)	58/76	56	42	42	48	59	50	57	52	56	50	65	48	625
HAUTEUR MAXIMALE DES PRECIPITATIONS EN 24 HEURES (MM)	58/76	20.6	17.1	13.9	22.8	29.9	57.5	65.8	38.8	33.3	55.2	38.7	25.0	65.8
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC PRECIPITATIONS >0.1MM	58/76	16.6	13.6	14.4	15.1	15.0	11.8	11.6	12.6	12.3	13.5	17.0	16.0	170.1
DUREES MOYENNES DE L'INSOLATION (HEURES)	58/76	60	90	146	180	217	247	254	228	190	137	66	53	1865
MOYENNES DE L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR (8 RELEVES/JOUR) (%)	58/76	83	78	72	69	69	68	60	71	76	82	84	84	75
MOYENNES DES VALEURS MAXIMALES QUOTIDIENNES DE L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR (%)	58/76	92	90	88	87	87	86	86	88	91	93	93	92	89
MOYENNES DES VALEURS MINIMALES QUOTIDIENNES DE L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR (%)	58/76	71	62	52	48	49	47	47	50	54	63	70	72	57
VITESSE MAXIMALE INSTANTANEE DU VENT (M/S) DIRECTION (ANNEE)	58/76	34	32	39	27	33	27	29	23	23	30	32	33	39
		W	SW	W	NNW	W	W	S	SW	WNW	WSW	WSW	SW	W
		50	70	67	65	58	65	64	71	75	64	76	65	13/03/67
VITESSE MOYENNE DU VENT (8 RELEVES/JOUR)	58/76	3.6	3.6	3.6	3.7	3.3	3.2	3.0	2.9	2.9	2.9	3.5	3.6	3.3
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC BROUILLARD	58/76	3.0	2.8	1.0	0.4	0.0	0.2	0.1	1.1	1.2	2.5	2.8	2.5	17.0
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC ORAGE	58/76	0.2	0.2	0.4	1.8	3.1	3.0	3.3	4.0	1.7	0.8	0.3	0.1	19.5
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC NEIGE	58/76	4.5	3.3	3.3	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.4	3.2	16.8
NOMBRES MOYENS DE JOURS AVEC GRELE	58/76	0.2	0.2	0.4	0.7	0.4	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	2.7

1) Le climat tempéré moyen de la région parisienne n'offre pas de période de grandes chaleurs; aussi le confort d'été devrait-il être obtenu uniquement par des dispositions architecturales, en particulier: utilisation de l'inertie et occultations solaires.

2) Le confort d'hiver par contre est relativement plus difficile à obtenir (conditions plus rigoureuses), et il paraît impossible de se passer d'équipements de chauffage. Cependant, la présence du rayonnement solaire pendant cette même période devrait permettre un apport notable de chaleurs gratuites. Limitation des déperditions et optimisation de ces chaleurs gratuites seront pendant cette période de chauffe les objectifs à viser.

3) Les demi-saisons (printemps et automne), par les variations rapides des conditions climatiques, posent le problème d'une bonne régulation pour éviter l'inconfort. L'inertie peut jouer un rôle déterminant. De plus, l'accroissement notable de l'ensoleillement au printemps rend son utilisation plus que souhaitable.

4) Ni le vent, ni l'humidité, ni les précipitations ne posent de graves problèmes. Simplement faudra-t-il en tenir compte dans tous les cas pour s'en protéger ou les utiliser au mieux.

II LE CONFORT D'HIVER

Le confort d'hiver étant le problème dominant à résoudre, l'enveloppe tentera d'abord d'y satisfaire, et ce par minoration de la balance D - C (D = déperditions, C = chaleurs gratuites), c'est à dire par une limitation de D et une optimisation de C.

1) Limitation des déperditions:

Les déperditions sont égales à: $D = 24 GV \sum_{T_1} D_{T_1}$

avec G: coefficient de déperdition volumique (en w/m³.h.°K)

V: volume

$\sum_{T_1} D_{T_1}$: somme des degrés jours sur la période considérée (~~voir page suivante~~)

I INTERPRETATION GENERALE

1) Le climat tempéré moyen de la région parisienne n'offre pas de période de grandes chaleurs, aussi le confort d'été devrait-il être obtenu uniquement par des dispositions architecturales, en particulier: utilisation de l'inertie et occultations solaires.

2) Le confort d'hiver par contre est relativement plus difficile à obtenir (conditions plus rigoureuses), et il paraît impossible de se passer d'équipements de chauffage. Cependant, la présence du rayonnement solaire pendant cette même période devrait permettre un apport notable de chaleurs gratuites. Limitation des déperditions et optimisation de ces chaleurs gratuites seront pendant cette période de chauffe les objectifs à viser.

3) Les demi-saisons (printemps et automne), par les variations rapides des conditions climatiques, posent le problème d'une bonne régulation pour éviter l'inconfort. L'inertie peut jouer un rôle déterminant. De plus, l'accroissement notable de l'ensoleillement au printemps rend son utilisation plus que souhaitable.

4) Ni le vent, ni l'humidité, ni les précipitations ne posent de graves problèmes. Simplement faudra-t-il en tenir compte dans tous les cas pour s'en protéger ou les utiliser au mieux.

II LE CONFORT D'HIVER

Le confort d'hiver étant le problème dominant à résoudre, l'enveloppe tentera d'abord d'y satisfaire, et ce par minoration de la balance $D - C$ (D = déperditions, C = chaleurs gratuites), c'est à dire par une limitation de D et une optimisation de C .

1) Limitation des déperditions:

Les déperditions sont égales à: $D = 24 GV \sum_{i} D_{j_i}$

avec G : coefficient de déperdition volumique (en $w/m^3.h.^{\circ}K$)

V : volume

$\sum_{i} D_{j_i}$: somme des degrés jours sur la période considérée (cf page suivante)

La limitation des déperditions pour $\sum D_{ji}$ donné passe donc par une minoration de G; la décomposition de G laisse apparaître les points sensibles:

$$G = G_t + G_r$$

avec G_t : coefficient de déperdition volumique par transmission,

G_r : " " " " renouvellement d'air.

a) Pertes par transmission:

- limitation maximum des surfaces exposées à l'extérieure, c'est à dire compacité des plans et des volumes,
- limitation des ponts thermiques par une isolation judicieuse,
- utilisation éventuelle de double-vitrages et d'isolations nocturnes.

b) Pertes par infiltration:

- protection des vents dominants: ceux-ci venant des secteurs OUEST - S-O, l'orientation des bâtiments, l'emplacement des ouvertures et le traitement des façades correspondantes devront en tenir compte; dans le cas de vents locaux différents, prendre ces derniers en considération),
- utilisation de menuiseries étanches,
- dissociation éventuelle des éclairages et des ouvrants.

c) Pertes par renouvellement d'air:

- conception rationnelle de la ventilation dans le cas d'une ventilation contrôlée,
- création de sas et/ou espaces tampons.

2) Optimisation des chaleurs gratuites:

a) Chaleurs gratuites intérieures:

Pour mémoire, rappelons que celles-ci sont dues aux occupants, aux engins et à l'éclairage. Elles sont fonction du niveau d'activité des occupants (cf. ch. CONFORT) et des puissances installées.

b) Chaleurs gratuites extérieures:

On appelle chaleurs gratuites extérieures les apports directs à travers les vitrages. Pour mémoire, rappelons que, conventionnellement, les

apports déphasés à travers les parois opaques sont considérés comme des déperditions (négatives). On en tient compte en remplaçant dans le calcul des déperditions la température extérieure par la température équivalente (cf. p.79)

En hiver, dans la région parisienne, les faibles températures maximums et moyennes, ainsi que la faible quantité d'énergie reçue, impliquent une optimisation de ces apports instantanés; le stockage est caduque, et seule l'inertie propre du bâtiment peut être utilisée pour un écrêtement des températures (en effet, la température dans une serre sans inertie atteint 35°C un jour type de décembre et 40°C un jour type de février!).

Ainsi, il faut rechercher une transparence maximum sur tous les plans exposés au soleil, c'est à dire compte tenu de la géométrie solaire, les parois verticales (ou proches) orientées du S-E au S-O, avec une préférence pour le S-E et le Sud, ces parois étant éclairées alors que la température est encore très faible (ceci s'harmonise avec le problème posé par le vent, puisqu'il a tendance à venir des secteurs Ouest - S-O).

Enfin, le soleil étant bas sur l'horizon, les ombres portées sont importantes et le problème des masques se pose (cf. p.87).

III LE CONFORT D'ETE

Les grandes chaleurs étant extrêmement rares, le confort d'été est à obtenir pour des températures inférieures à 30°C. L'amplitude des températures étant à cette époque d'environ 10°C, si on écrète assez celles-ci par une forte inertie, on doit retomber dans des températures intérieures maximums de l'ordre de 25°C, ce qui est acceptable. Mais pour cela, deux précautions doivent être prises, qui concernent la protection contre les chaleurs gratuites:

a) Les chaleurs gratuites intérieures doivent être évacuées, soit au moyen d'une ventilation forcée, soit, ce qui est mieux, au moyen d'une ventilation naturelle (utilisation éventuelle des vents dominants locaux ou création de "cheminées thermiques"

b) Les chaleurs gratuites extérieures dues à l'ensoleillement à tra-

vers les parois vitrées, très importantes en été, doivent être refusées. Pour cela, des dispositifs de protection solaire, mobiles (rideaux, volets,...) ou fixes (pare soleil) doivent être installés; le choix de la protection et son dimensionnement doit de faire en fonction de l'orientation (cf. p.88).

Le soleil étant haut sur l'horizon à cette époque, les toitures sont particulièrement soumises au rayonnement. Ainsi, il faut prévoir, soit de bien les isoler, soit de les concevoir assez lourdes pour amortir les chocs thermiques, soit enfin d'aménager des combles "tampons" inhabités.

IV LE CONFORT DES DEMI-SAISONS (PRINTEMPS - AUTOMNE)

La principale caractéristique des demi-saisons étant les grandes variations des paramètres climatiques d'un jour sur l'autre, le bâtiment doit encaisser celles-ci au mieux pour éviter les inconforts et une consommation inutile d'énergie.

1) Les dispositions concernant la limitation des pertes sont les mêmes que pour l'hiver.

2) Les dispositions concernant l'optimisation et la gestion des apports dues aux chaleurs gratuites extérieures sont par contre sensiblement différentes:

Les températures maximales et moyennes plus élevées diminuent les besoins en apports instantanés. Ceux-ci demeurent toutefois le matin. Le soleil se le vant à cette période plein Est (le 21 mars), les façades intéressées vont de l'Est au Sud. Par contre, les nuits fraîches succédant aux après-midi chaudes induisent un déphasage des apports sur l'Ouest et le S-O de l'après-midi à la nuit. Ce déphasage qui s'ajoute à l'écrêtement nécessaire des températures induit à son tour une forte inertie de la construction sur les façades correspondantes (Ouest et S-O).

BIBLIOGRAPHIE

Les numéros entre parenthèse servent de référence au cours du texte.

CONCLUSION

(1) Le climat du Bassin Parisien, F. FEDELABOIDE, ed. H. M. Oudin, 1957.

(2) Expérimentation d'un prototype d'habitation économique conçu en fonction

D'aucuns doivent être forts dépités de voir un si grand décalage entre l'aspect très théorique et/ou scientifique de la première partie, le grand nombre de données climatologiques présentées (pourtant déjà sélectionnées), et le peu de conclusions qui paraît en être tiré.

(3) Éléments de climatologie, G. VIERS, Paris, 1957.
Effectivement, après être passés de l'approche à l'étude analytique, et de l'étude analytique à la méthodologie de conception, nous restait-il une étape à franchir. Mais celle-ci ne constitue-t-elle pas le travail même de l'architecte?

(4) Les principes fondamentaux de l'architecture, J. L. IZARD, CERA, 1977.
(5) Architecture fondamentale, 1977.
(6) Manuel des industries thermiques, Dunod.
(8) Nous avons essayé dans une première partie d'établir ce qu'on pourrait appeler une sorte de "règle du jeu", et dans une deuxième partie de donner les éléments du jeu. Peut être reste-t-il encore à préciser l'ensemble, mais c'est bien à l'architecte de jouer.

(11) Architecture et approche bioclimatique, J.L. IZARD, CERA, 1977.

(12) Les ressources énergétiques solaires, CH. FERRIN DE BRICHAMBAUT.

(13) Un mode simple de calcul des flux à travers un vitrage, R. CADIERGUES, Promoclim

(14) Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes, Eyrolles.

(15) Solar control and shading devices, V. et A. OLGAY, Princeton.

(16) Le rayonnement solaire et l'insolation en France, Météo. Nat.

(17) Estimation du rayonnement solaire, CH. FERRIN DE BRICHAMBAUT, Météo. Nat.

(18) Le rayonnement solaire à TRAPPES, BEDEL et CERON, Météo. Nat.

et "MAN, CLIMATE and ARCHITECTURE" de W. GIVONI, Elsevier, 1969.

BIBLIOGRAPHIE

Les numéros entre parenthèse servent de référence au cours du texte.

- (1) Le climat du Bassin Parisien, P. PEDELABORDE, ed. M.th.Génin, 1957.
 - (2) Expérimentation d'un prototype d'habitation économique conçu en fonction du rayonnement solaire, Groupe ABC, CORDA, 1973.
 - (3) Climats et habitations, A.FOURNOL, cahier du CSTB n° 26, 1954.
 - (4) L'hygrothermique du bâtiment, M.CROISET, Eyrolles.
 - (5) Eléments de climatologie, G.VIERS, Nathan.
 - (6) Atlas climatique de France, Météorologie Nationale.
 - (7) Evolution séculaire du climat de Paris; influences de l'urbanisation, J.DETTWILLER, Météo. Nat.
 - (8) Design with climate, V.OLGYAY, Princeton, 1967.
 - (9) ASHRAE fundamentals, 1977.
 - (10) Manuel des industries thermiques, Dunod.
 - (11) Architecture et approche bioclimatique, J.L.IZARD, CERA, 1977.
 - (12) Les ressources énergétiques solaires, CH.PERRIN DE BRICHAMBAUT.
 - (13) Un mode simple de calcul des flux à travers un vitrage, R.CADIERGUES, Promoclim
 - (14) Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes, Eyrolles.
 - (15) Solar control and shading devices, V. et A.OLGYAY, Princeton.
 - (16) Le rayonnement solaire et l'insolation en France, Météo. Nat.
 - (17) Estimation du rayonnement solaire, CH.PERRIN DE BRICHAMBAUT, Météo. Nat.
 - (18) Le rayonnement solaire à TRAPPES, BEDEL et CERON, Météo. Nat.
- et "MAN, CLIMATE and ARCHITECTURE" de B.GIVONI, Elsevier, 1969.

