UNIVERSITÉ DE GENÈVE

Archive ouverte UNIGE
https://archive-ouverte.unige.ch

Rapport de recherche 1984

Open Access

This version of the publication is provided by the author(s) and made available in accordance with the copyright holder(s).

Mesures d'ensoleillement à Genève : publication No 9 : Indice de clarté

Ineichen, Pierre; Guisan, Olivier; Razafindraibe, Augustin

How to cite

INEICHEN, Pierre, GUISAN, Olivier, RAZAFINDRAIBE, Augustin. Mesures d'ensoleillement à Genève : publication No 9 : Indice de clarté. 1984

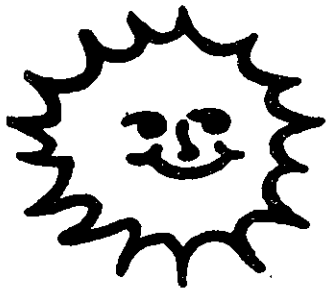
This publication URL: https://archive-ouverte.unige.ch/unige:79700

© This document is protected by copyright. Please refer to copyright holder(s) for terms of use.

GROUPE DE PHYSIQUE APPLIQUEE

SECTION DE PHYSIQUE

CENTRE UNIVERSITAIRE D'ETUDE
DES PROBLEMES DE L'
ENERGIE



MESURES D'ENSOLEILLEMENT A GENEVE

PUBLICATION No 9

Indice de clarté

P. Ineichen

O. Guisan

A. Razafindraibe

UNIVERSITE DE GENEVE

SERIE DE PUBLICATIONS DU CUEPE No 20

MESURES D'ENSOLEILLEMENT A GENEVE

PUBLICATION No 9

Indice de clarté

P. Ineichen

O. Guisan

A. Razafindraibe

Juin 1984

Adresses: CUEPE, 2-4 rue du Lièvre, 1211 Genève 24,
tél. 022/43 92 42

Groupe de physique appliquée, Section de physique
24 quai Ernest Ansermet, 1211 Genève 4
tél. 022/21 93 55

1. Introduction

Sur la base de nos données d'ensoleillement à Genève [1], nous présentons ici quelques caractéristiques de l'indice de clarté défini habituellement par : $K_t = H_h / H_o$ où H_h et H_o désignent le rayonnement solaire global sur plan horizontal au sol et en dehors de l'atmosphère, ces rayonnements étant intégrés sur une même période bien définie (heure, jour, mois, etc...).

Généralisant la méthode de Liu et Jordan [2] nous avons examiné également diverses corrélations entre les rayonnement diffus ou direct au sol et l'indice de clarté . Soient :

$K_h = H_h/H_o$ $(=K_t)$ h = global

$K_d = H_d/H_o$ d = diffus

$K_b = H_b/H_o$ b = direct

les rayonnements H_h, H_d et H_b concernant un plan horizontal au sol. Les corrélations étudiées sont du type :

$K_d/K_h = f(K_h)$

$K_d = f'(K_h)$

$K_b = f''(K_h)$

Analytiquement on a les relations :

$K_d = (K_d/K_h) \cdot K_h$ $\quad f'(K_h) = K_h \cdot f(K_h)$

$H_b = H_h - H_d$ $\quad K_b = K_h - K_d$ $\quad f''(K_h) = K_h - f'(K_h)$

Dans la recherche des corrélations sur la base des données existantes, le jeu de pondérations différentes peut conduire à des résultats ne respectant pas strictement les relations précédentes; nous verrons qu'elles sont néanmoins approximativement bien vérifiées.

Par ailleurs, il nous semble important de pouvoir qualifier une corrélation, une fois obtenue, par rapport aux données mesurées. C'est pourquoi nous utilisons 2 indicateurs : l'écart-moyen (moyenne linéaire algébrique) et l'écart-type (ou écart quadratique moyen) entre données et corrélation; le premier caractérise un écart systématique (pouvant influencer des moyennes à long terme), le deuxième les fluctuations de type quasi-aléatoires (liées à la complexité des phénomènes en cause). L'appendice 1 décrit la démarche et l'interprétation adoptées dans ce contexte.

Les corrélations sont fondamentales car elles permettent, par inversion et pour autant que leur applicabilité soit justifiée, d'estimer la part des rayonnements diffus et direct lorsqu'on ne connait que le rayonnement global sur plan horizontal (réseau Anetz par exemple). Leur importance en énergie solaire et sur le plan Suisse n'est plus à démontrer.

A titre indicatif et non exhaustif, des études semblables sont décrites dans les références [3] à [23]. Pour le calcul des grandeurs faisant appel au mouvement du soleil (H_o, etc...), la référence [1, no 4] explicite les méthodes et formules utilisées.

2. Fréquences mensuelles des valeurs journalières de K_h

Nous présentons sur la Figure 1 la distribution des valeurs journalières de K_h pour chaque mois de l'année, sur la base de 4 ans de données (soit environ 120 valeurs de K_h pour chaque distribution mensuelle).

Pour ces 12 distributions nous donnons également la valeur moyenne $\overline{K_h}$ et l'écart-standard σ (K_h):

	$\overline{K_h}$	σ (K_h)
Janvier	.30	.19
Février	.36	.19
Mars	.39	.18
Avril	.53	.17
Mai	.49	.19
Juin	.50	.17
Juillet	.53	.19
Aout	.55	.17
Septembre	.52	.17
Octobre	.39	.18
Novembre	.31	.16
Décembre	.26	.14
12 mois	.42	.20

Les gaussiennes correspondantes sont représentées sur la Fig.1, où il apparaît à l'évidence, que les distributions de K_h sont loin d'être des gaussiennes.

Remarquons que $\overline{K_h}$ n'est pas strictement égal à la valeur mensuelle de K_h (question de moyennes); il en est néanmoins très proche (H_o varie peu au cours du mois).

Ces données sont parfois utilisées pour le dimensionnement d'installations solaires (photovoltaïques par exemple), des séquences aléatoires de jours étant générées sur cette base. Il s'agit néanmoins d'être prudent, en utilisant une telle méthode, les distributions n'étant pas gaussiennes.

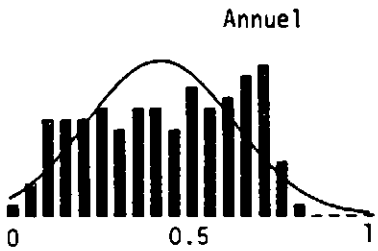
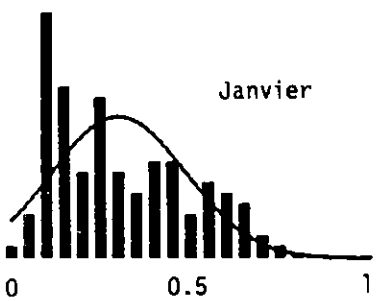
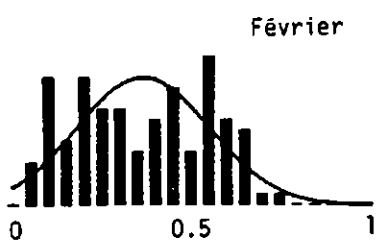
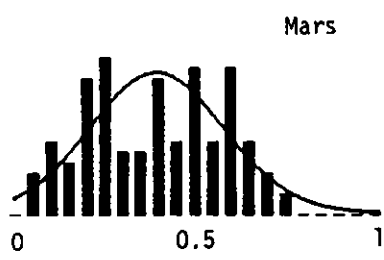
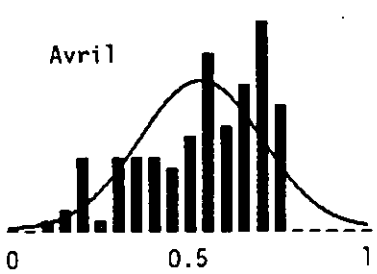


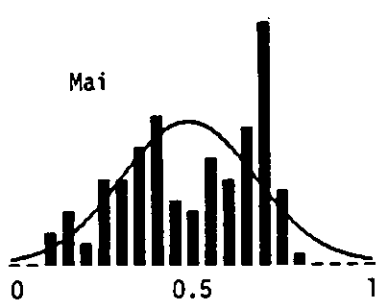
Figure 1 : Histogrammes des valeurs journalières de K_h pour 4 ans (1459 points) et pour chaque mois ($\sim$ 120 points par mois). La courbe tracée représente une distribution gaussienne caractérisée par la moyenne $\overline{K_h}$ et l'écart-type $\sigma(K_h)$ correspondant.

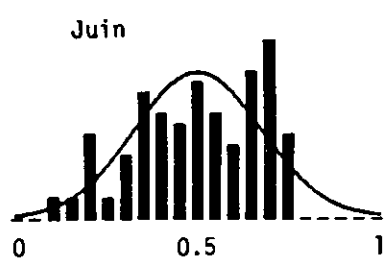


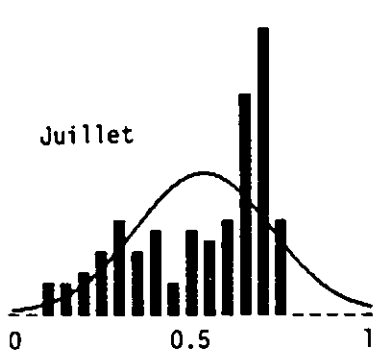


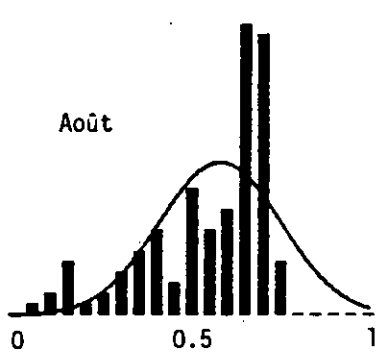


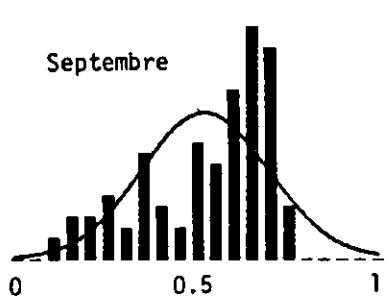


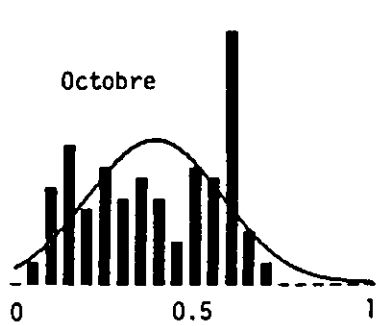


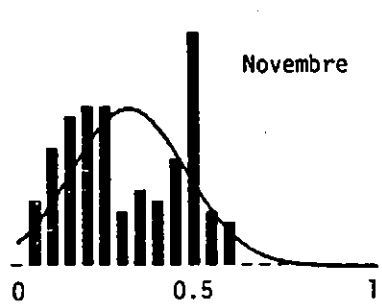


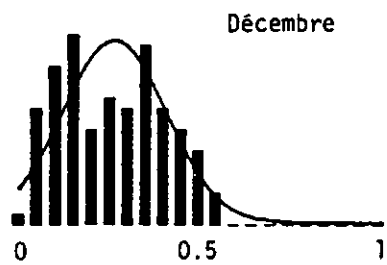








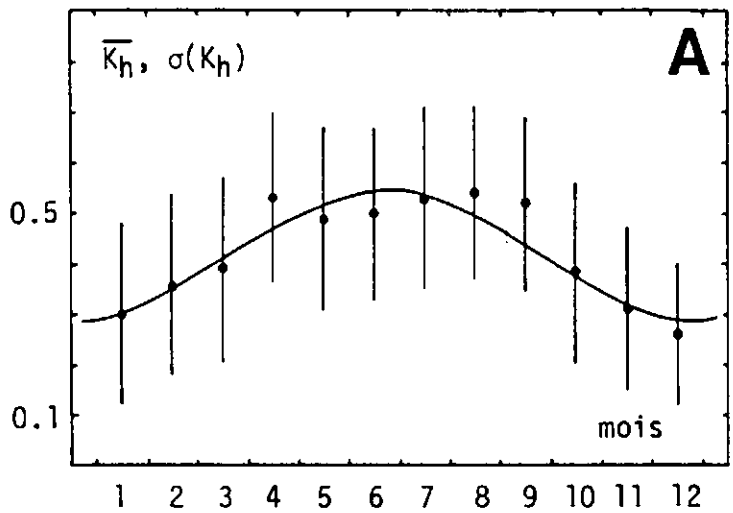




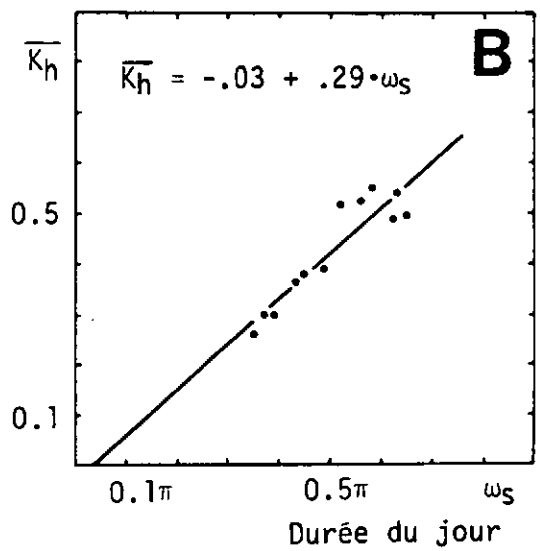
La figure 2A illustre la variation annuelle de $\overline{K_h}$ et $\sigma(K_h)$. Il est possible de dégager une corrélation entre $\overline{K_h}$ et la durée du jour (ou ω_s); déterminée par moindres carrés, elle est explicités sur la Figure 2B. Le décalage de cette corrélation à l'origine ($\overline{K_h} = 0$ pour $\omega_s \simeq 0.1$) peut être attribué à des effets d'horizon ($\sim 6°$ à Genève); néanmoins les erreurs intervenant ne permettent pas de le justifier absolument. La durée du jour varie conjointement avec la masse d'air moyenne traversée ($\overline{m}$) durant le jour. La figure 2C explicite une relation approximative entre ces 2 grandeurs, ce qui permet d'exprimer la corrélation précédente $\overline{K_h}$ (ω_s) en fonction de $\overline{m}$: $\overline{K_h}$ ($\overline{m}$). Cette deuxième corrélation peut être établie directement en remplaçant ω_s par $\overline{m}$ (avec l'approximation définie) ou par moindres carrés sur la grandeur $\overline{K_h} = a + b \cdot 1/\overline{m}$: les résultats sont quasi-identiques. cf. Figure 2 D.

Notons encore que ces calculs sont effectués pour une hauteur moyenne et pour le jour du mois (proche du milieu mais non strictement identique au milieu) représentatif de la moyenne mensuelle (pour un plan horizontal extraatmosphérique).

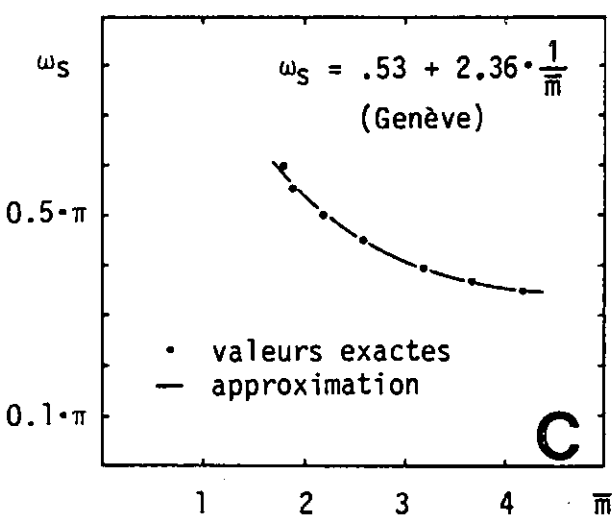
Figure 2 : $\overline{K_h}$, $\sigma(K_h)$, $\overline{K_h}(\omega_s)$, $\overline{K_h}(\overline{m})$



Variation annuelle de $\overline{K_h}$ et $\sigma(K_h)$

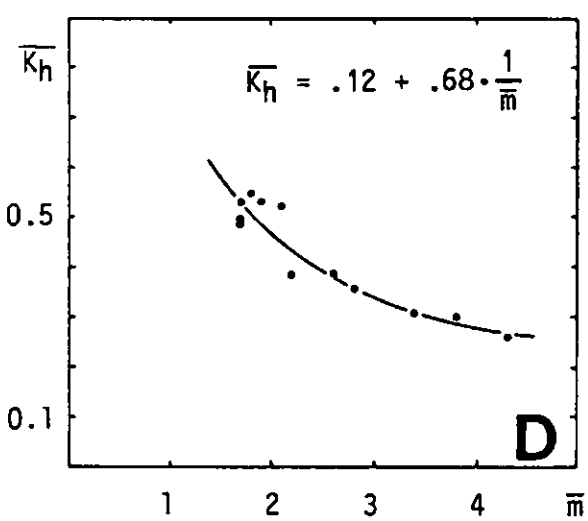


Corrélation entre K_h et ω_s.
ω_s = angle horaire des lever et coucher [rad]
Durée du jour : $2 \cdot 12 \cdot \omega_s / \pi$



Relation approximative entre ω_s et $\overline{m}$:

$$\omega_s = f(1/\overline{m})$$



Corrélation entre $\overline{K_h}$ et $\overline{m}$

$$\overline{m} \simeq \frac{1-.1 \cdot z}{\overline{\sin h}} \simeq \frac{.96}{\overline{\sin h}} \qquad z = .4$$

$$\overline{\sin h} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \cos L \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s)$$

$$\cos \omega_s = - \operatorname{tg} L \cdot \operatorname{tg} \delta$$

z : altitude en km — δ : déclinaison
h : hauteur du soleil — ω : angle horaire [rad]
L : latitude — ω_s : lever/coucher

3. Corrélations des grandeurs K_d/K_h, K_d et K_b avec K_h

a) Présentation des résultats

Les corrélations étudiées concernent diverses grandeurs (K_d/K_h, K_d, K_b), sont de différents types (droites, polynômes avec un nombre variable de termes) et se rapportent à divers intervalles de temps (heures, jour, mois).

Pour faciliter les comparaisons, nous adoptons une présentation unique sous forme d'une figure quadruple (cf.Fig. 3 et suivantes) :

A: présentation des données, chaque point représentant la grandeur concernée en fonction de K_h pour l'intervalle de temps choisi; la ligne continue correspond à l'ajustement obtenu par moindres carrés et explicité au-dessus de cette figure.

B: Erreurs entre les données et la corrélation obtenue; celles-ci sont groupées par intervalle de K_h; les points représentent l'écart moyen μ correspondant, les barres d'erreurs l'écart type σ correspondant. Le signe de μ est celui de "données - corrélation" ($\mu>0$ => la corrélation sous-estime).

C: Pour toutes les données, la valeur absolue du rayonnement diffus est calculée à partir de K_h et de la corrélation obtenue; ce qui permet de représenter la valeur mesurée du diffus par rapport à sa valeur calculée. Les écarts par rapport à la droite à 45° traduisent les erreurs inhérentes à l'utilisation de la corrélation pour la détermination du diffus.

D: Ces erreurs sont explicitées dans la Figure D, par tranche d'abscisse, avec indications des écarts-moyens et des écarts-types (comme sous B) affectant la valeur calculée du diffus. Ces deux dernières figures permettent de juger l'applicabilité de la corrélation obtenue pour la détermination du rayonnement diffus. Le signe de l'écart moyen μ est celui de "mesures - calcul" ($\mu>0$ => la corrélation sous-estime).

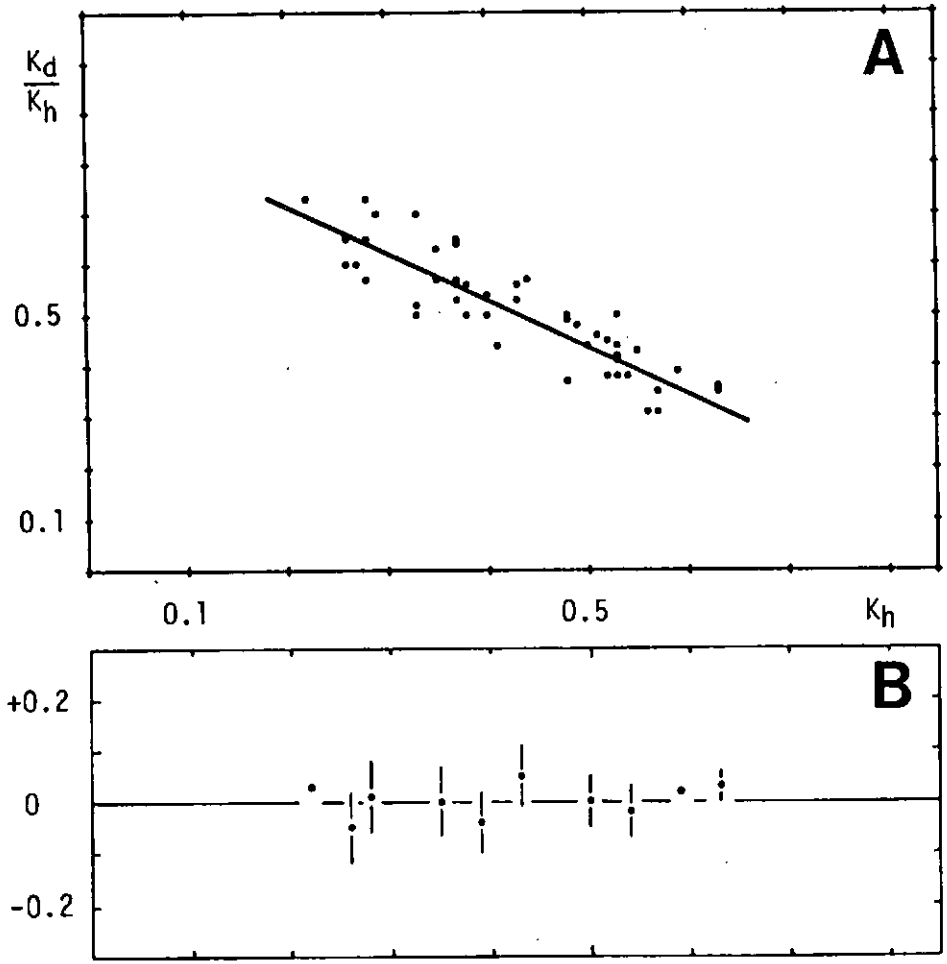
b) Corrélation en valeurs mensuelles

Les corrélations $K_d/K_h = f(K_h)$ et $K_d = f'(K_h)$ sont représentées sur les fig. 3 et 4. La relation : $f'(K_h) = K_h \cdot f(K_h)$ est ici bien vérifiée malgré des pondérations différentes dans l'établissement des corrélations. La corrélation $K_b = f''(K_h)$ peut ici être calculée par : $K_b = K_h - f'(K_h)$.
Les écarts-types représentés dans les Fig. B et D correspondantes ne sont pas justifiés par une statistique suffisante; ils donnent néanmoins une idée des erreurs.
Les 2 corrélations obtenues sont de qualité comparable; dans leur application elles conduisent à une erreur sur la détermination du diffus de l'ordre de 14%.
La décomposition des données par saisons ne permet pas d'améliorer ces corrélations. Autrement dit il n'est pas possible de mettre en évidence de façon significative des effets saisonniers. Cf. Appendice 2.

Figure 3 : $K_d/K_h = f(K_h)$ en valeurs mensuelles.

$K_d/K_h = .90 - .90 \cdot K_h$

Données : 48 points



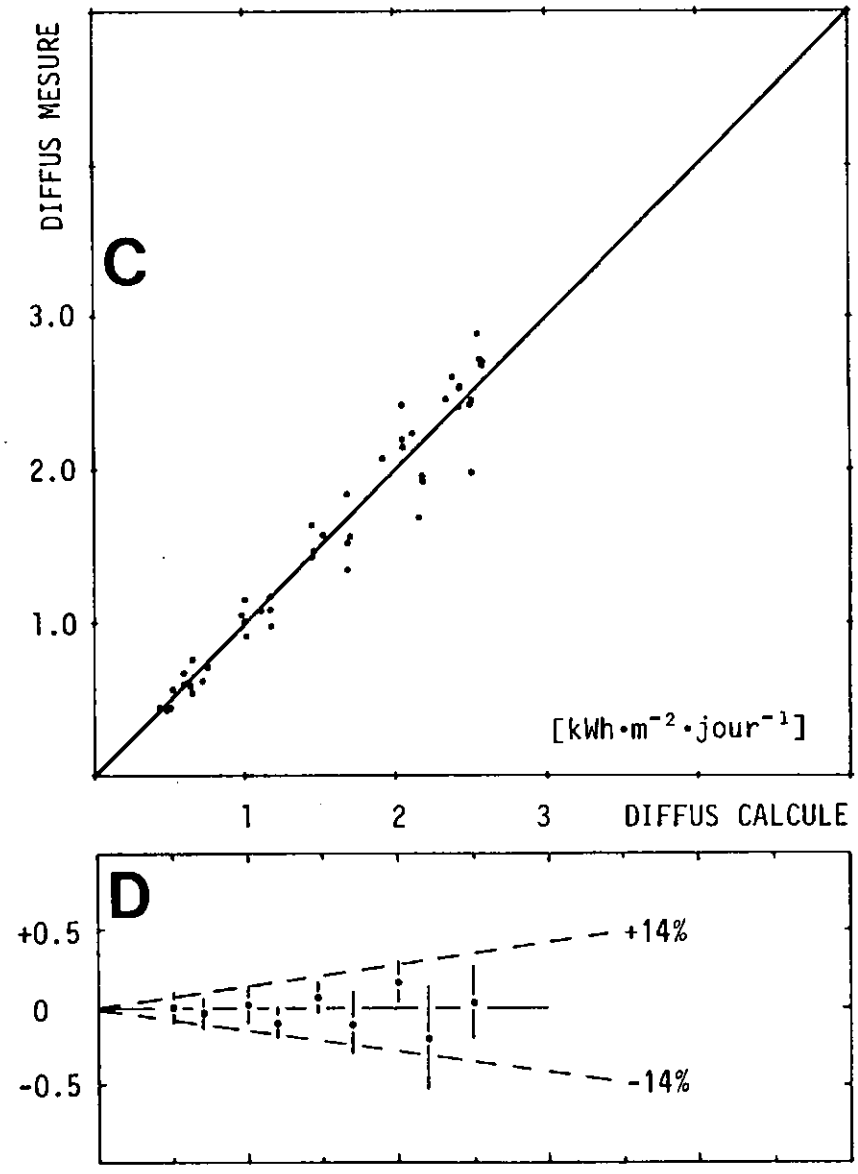
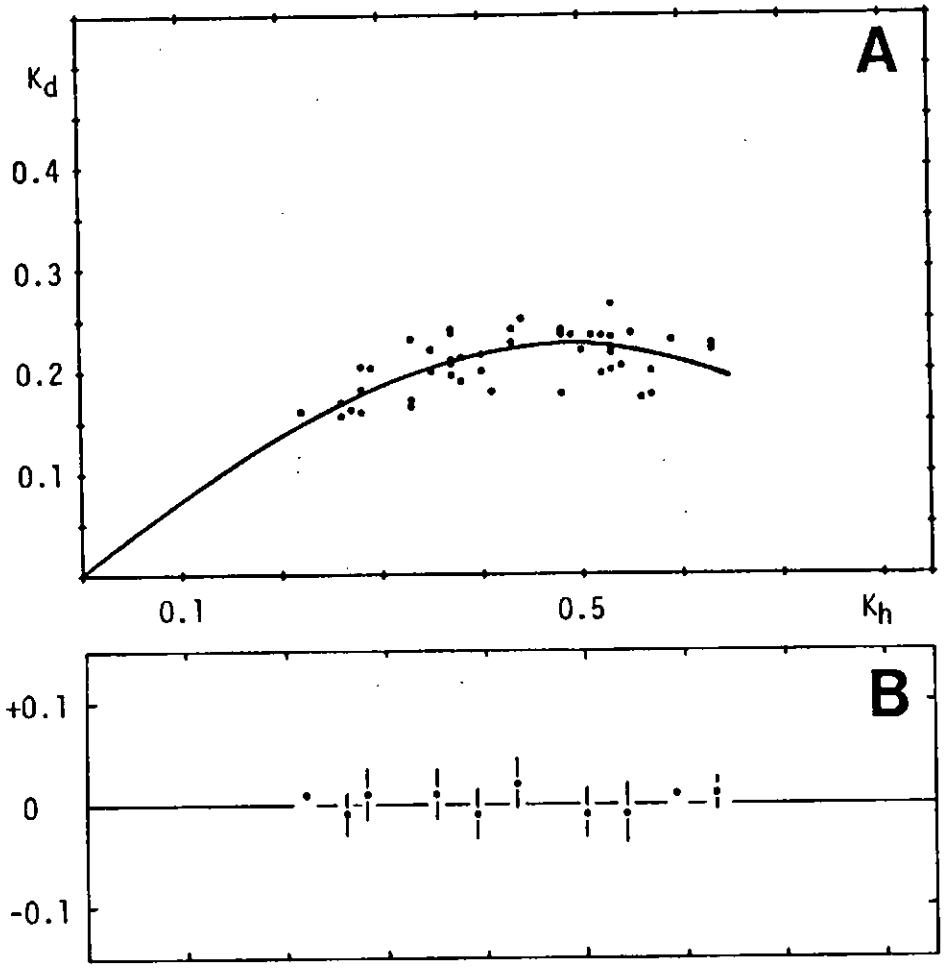
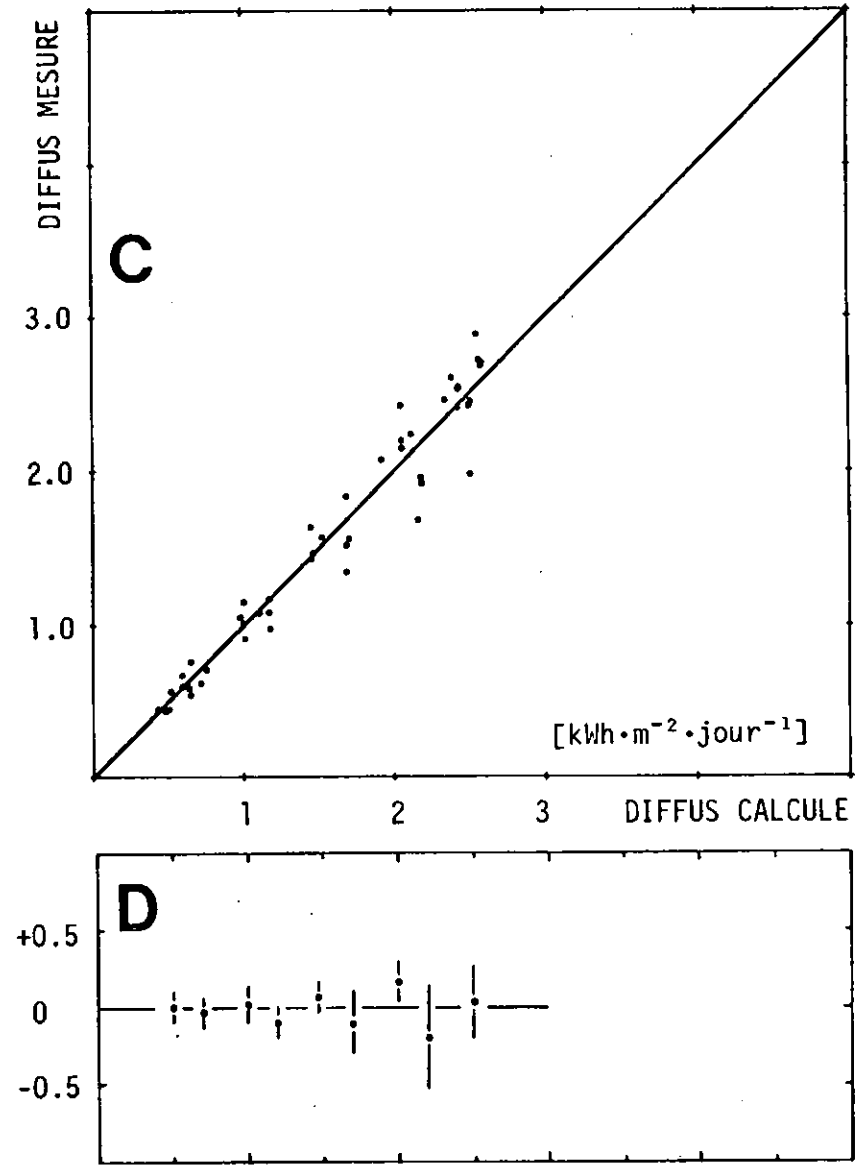


Figure 4 : $K_d = f'(K_h)$ en valeurs mensuelles

$K_d = .90 \cdot K_h - .90 \cdot K_h^2$

Données : 48 points





c) Corrélations en valeurs journalières

Diverses corrélations sont représentées sur les Fig. 5 à 9. Certaines sont reliées entre elles conformément aux relations et remarques mentionnées au Chap.1.
Dans les Fig. 6,8 et 9 et pour K_h<.15 (temps très couvert) un rayonnement direct nul est imposé pour la corrélation. Cette propriété logique physiquement mais non strictement vérifiée par nos données (erreurs de mesures du diffus), est clairement démontrée dans d'autres études où le rayonnement direct est mesuré (et non déduit du diffus). Cette contrainte n'affecte pas de façon significative la qualité des corrélations.

Au vu des résultats, nous constatons que :
- les corrélations faisant appel à des polynômes d'ordre élevé ne sont pas meilleures que celles s'appuyant sur de simples droites, ce qui peut s'expliquer compte tenu des fluctuations complexes et importantes de type quasi-aléatoire.

- Dans la corrélation de la Fig.8, le rajout d'une constante dans la zone K_h>0.15 n'améliore pas de façon significative les résultats (cette constante est du reste très proche de 0).

- Dans l'application des corrélations, celles du type K_d/K_h, K_d et K_b sont toutes très comparables; elles conduisent à une erreur sur la détermination du diffus de l'ordre de 17%.

Des études plus fines, décrites dans l'Appendice 3, ont conduit aux constatations suivantes :

- si l'on réduit les nombreuses données initiales en un nombre limité de points moyens équivalents et si l'on recherche la fonction de corrélation $f(K_h)$ sur cette nouvelle base on obtient des résultats extrêmement proches des précédents. Cette deuxième méthode, bien que non strictement identique, peut être considérée comme équivalente à la première.

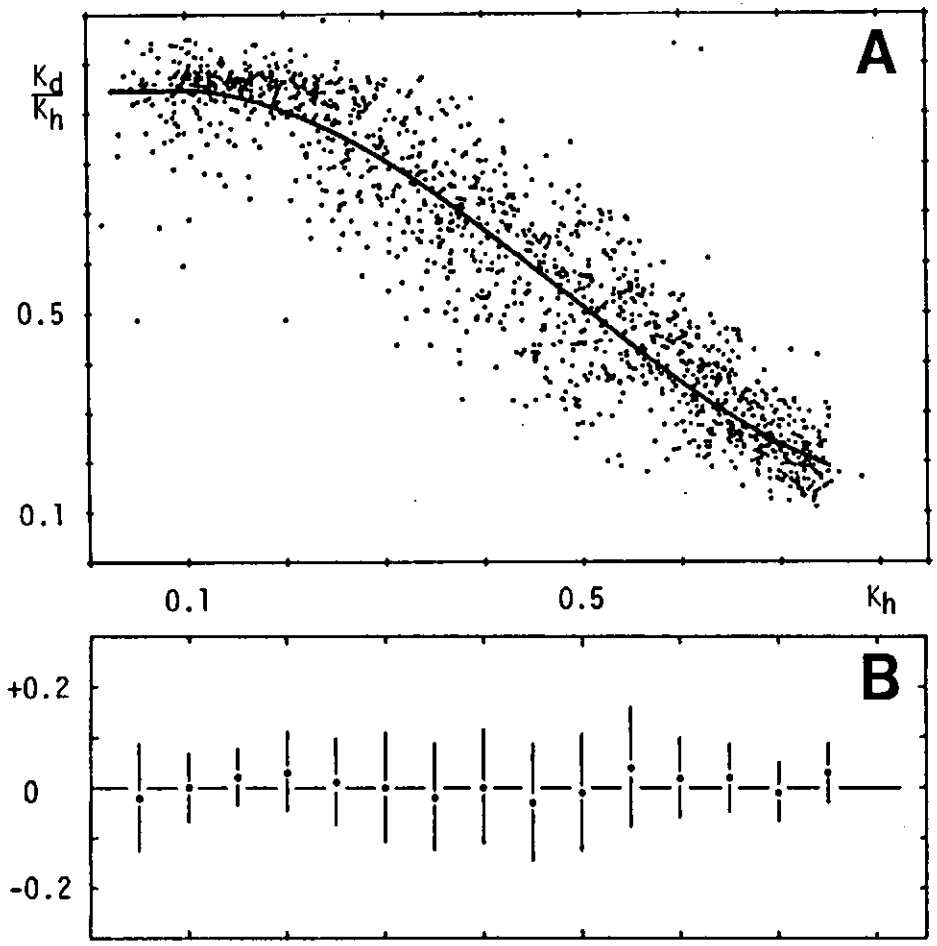
- en séparant les données initiales par saison, nous avons pu mettre en évidence et de façon significative des effets saisonniers et définir des corrélations appropriées; néanmoins les effets observés restent faibles vis-à-vis des fluctuations quasi-aléatoires telles qu'elles sont caractérisées par la dispersion intrinsèque des points sur les Figures 5A-9A; dans ces conditions, il ne semble pas justifié d'introduire des corrélations plus complexes : c'est une perte de simplicité pour un gain dérisoire et discutable.

Figure 5 : $K_d/K_h = f(K_h)$ en valeurs journalières.

$K_h \geq .10 \quad K_d/K_h = .92 + .68 \cdot K_h - 4.47 \cdot K_h^2 + 3.02 \cdot K_h^3$

$K_h < .10 \quad K_d/K_h = .95$

Données : 1459 points



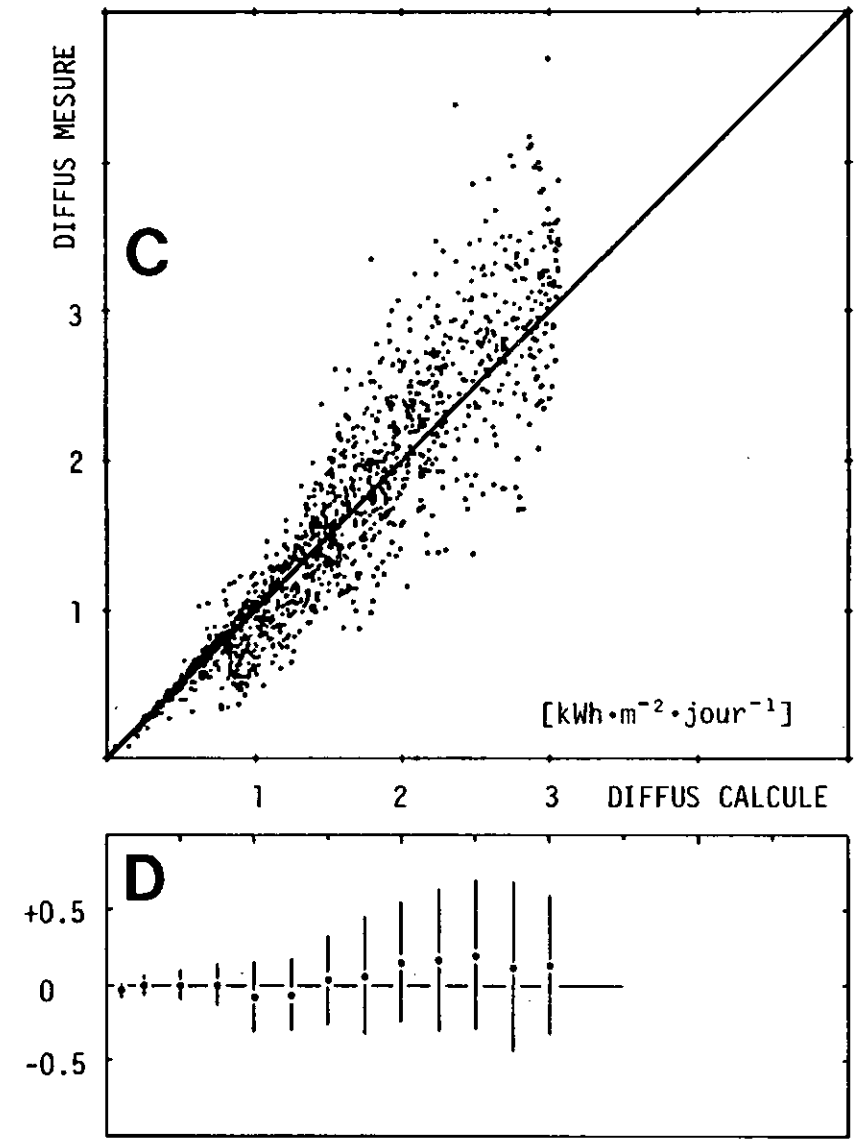


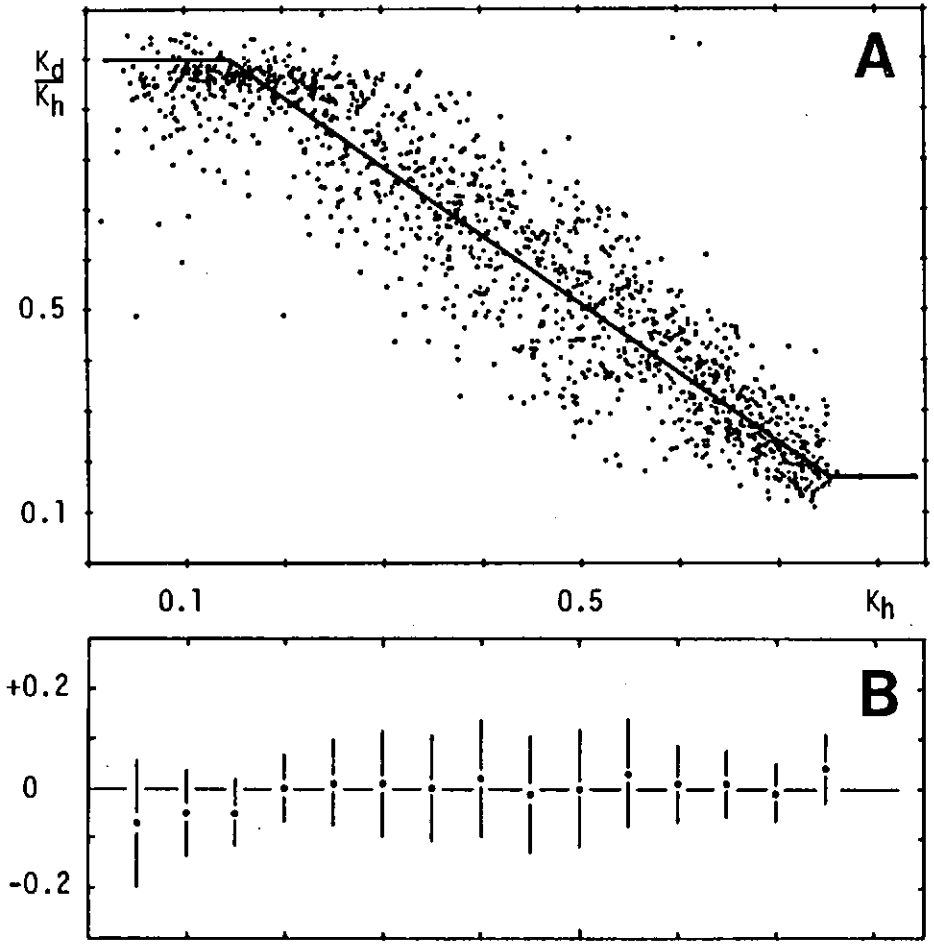
Figure 6 : $K_d/K_h = f(K_h)$ en valeurs journalières.

$K_h < .15$: $K_d/K_h = 1.00$

$.15 \leq K_h \leq .75$ $K_d/K_h = 1.21 - 1.39 \cdot K_h$

$.75 < K_h$ $K_d/K_h = 0.17$

Données : 1459 points



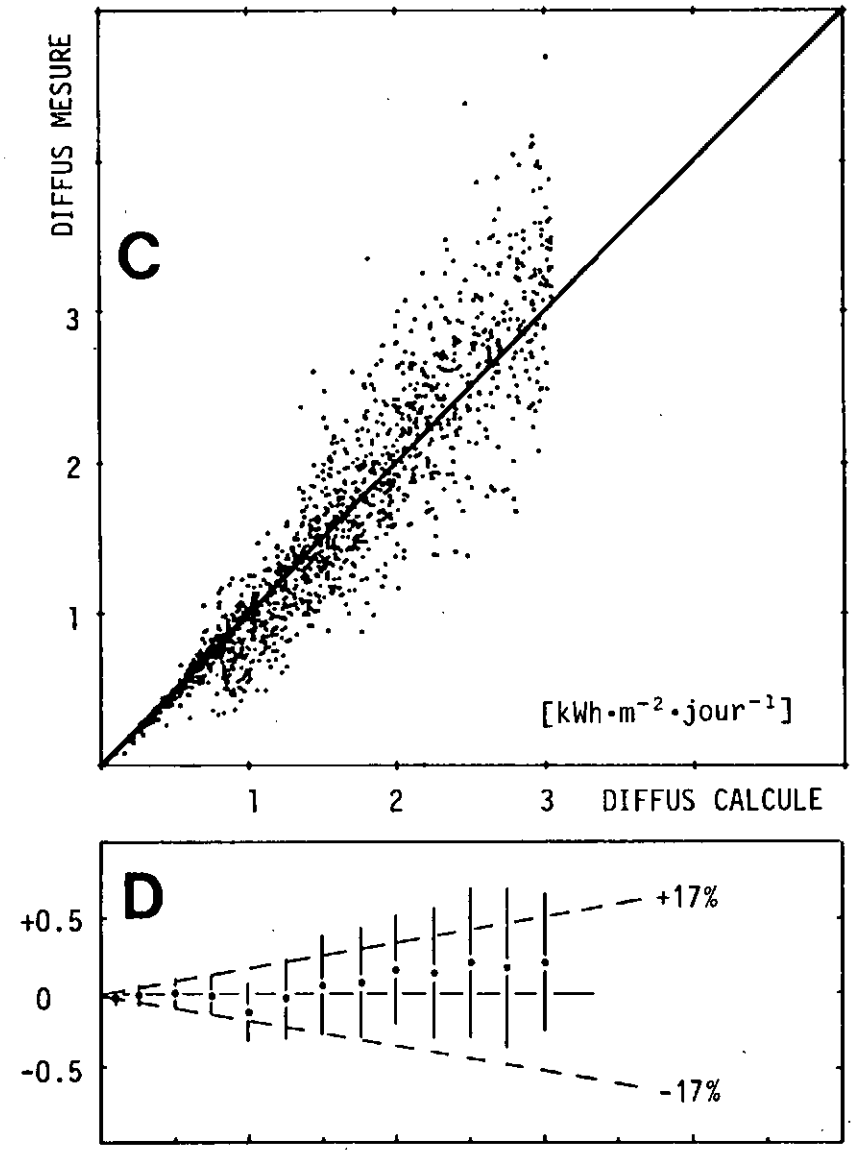
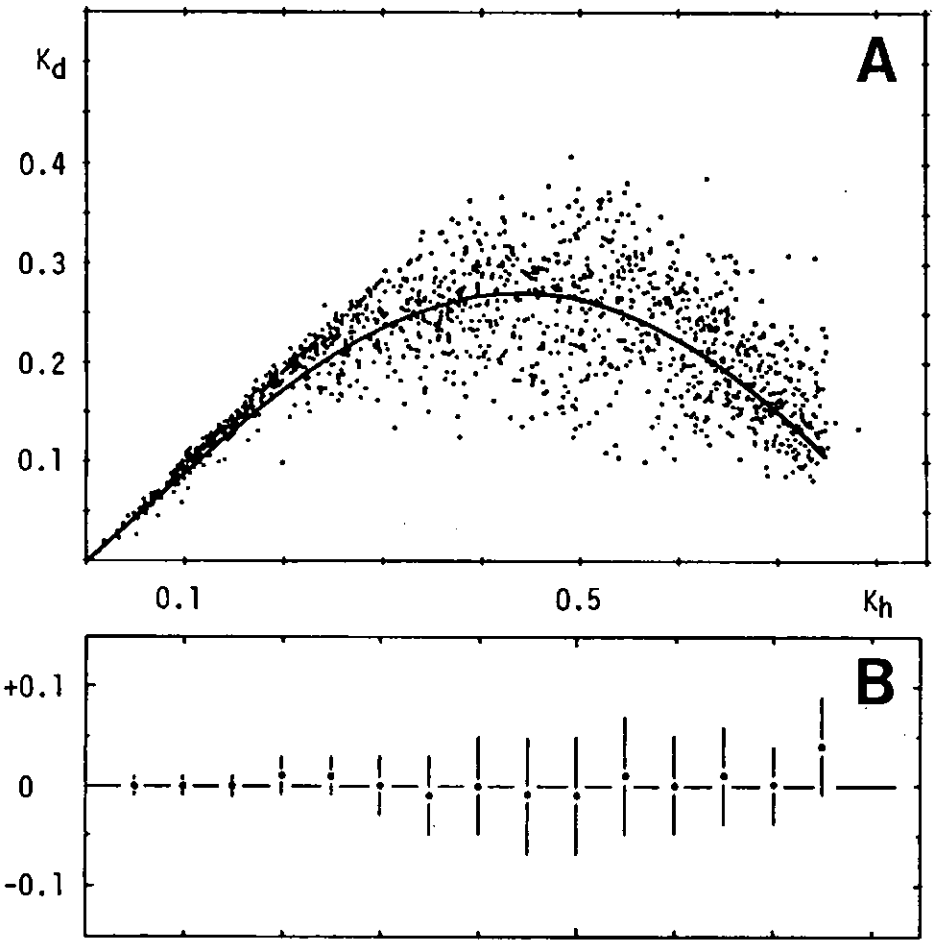


Figure 7 : $K_d = f'(K_h)$ en valeurs journalières.

$K_d = 1.11 \cdot K_h - .91 \cdot K_h^2 - .49 \cdot K_h^3$

Données : 1459 points



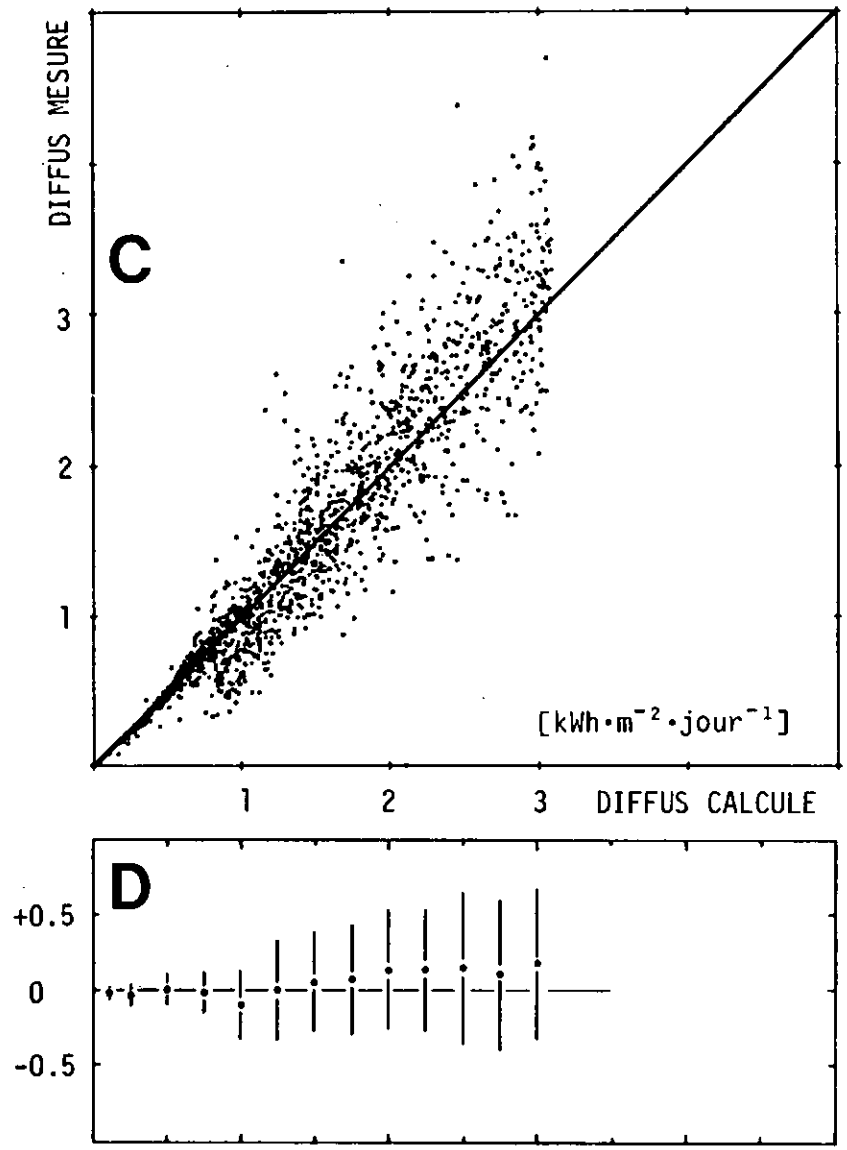
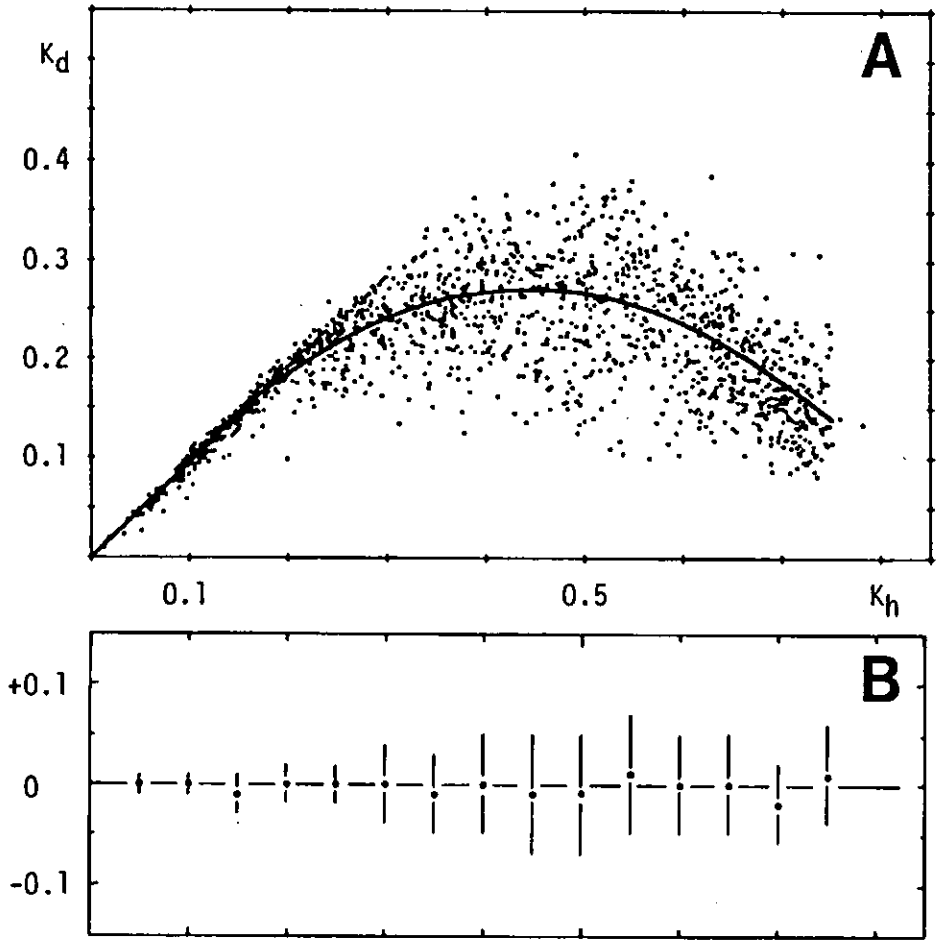


Figure 8 : $K_d = f'(K_h)$ en valeurs journalières.

$K_h \geq .15 \quad K_d = 1.23 \cdot K_h - 1.40 \cdot K_h^2$

$K_h < .15 \quad K_d = K_h$

Données : 1459 points



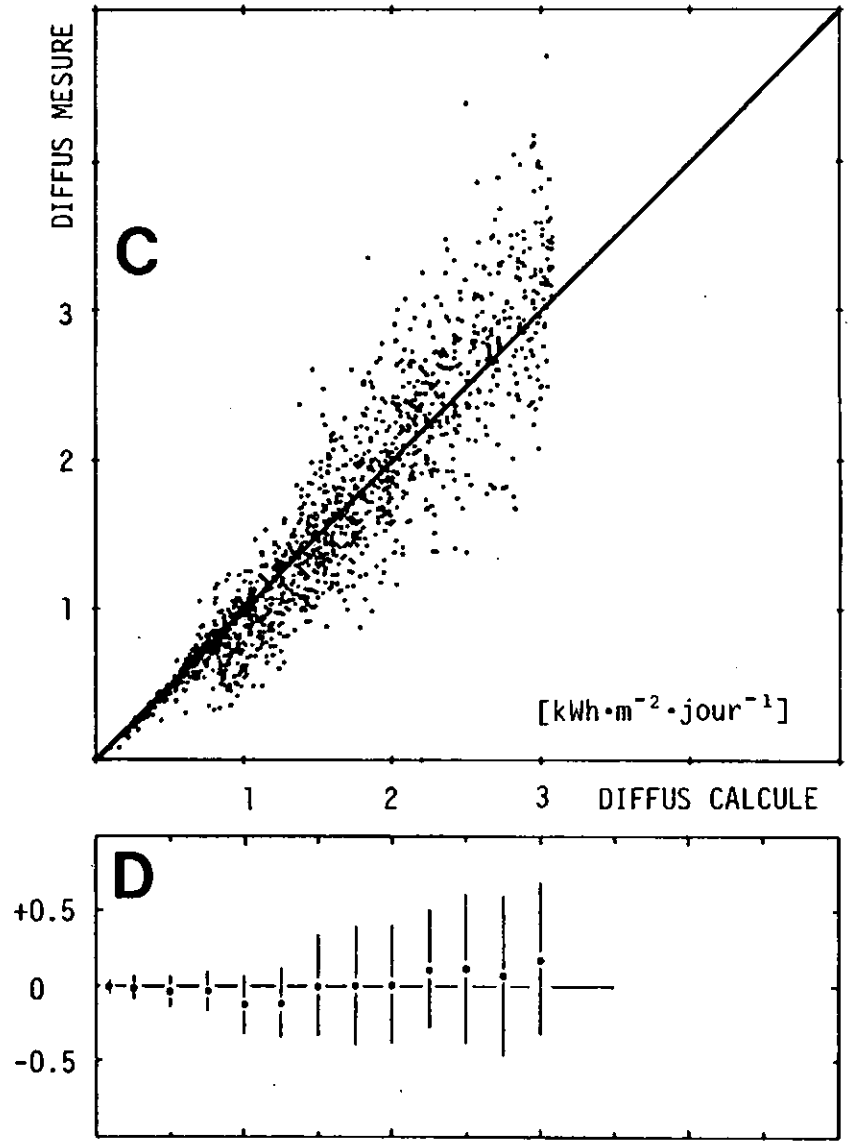
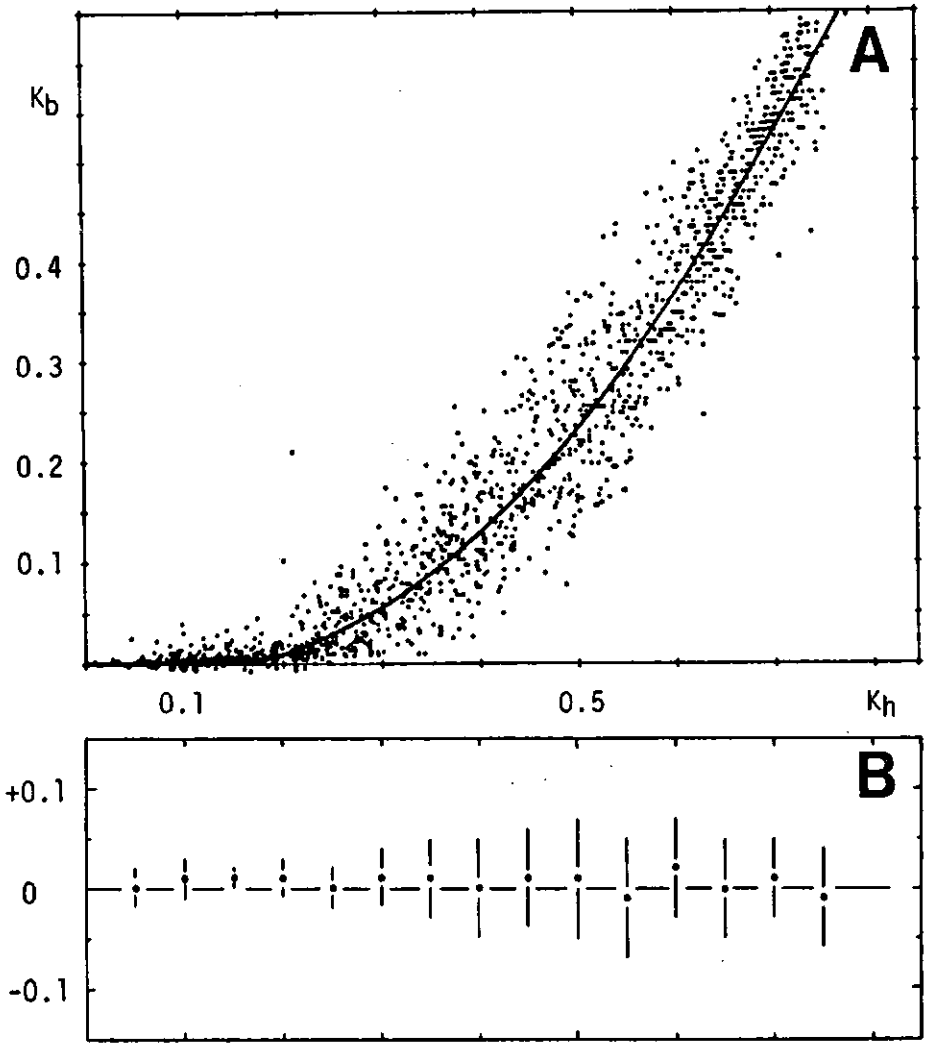


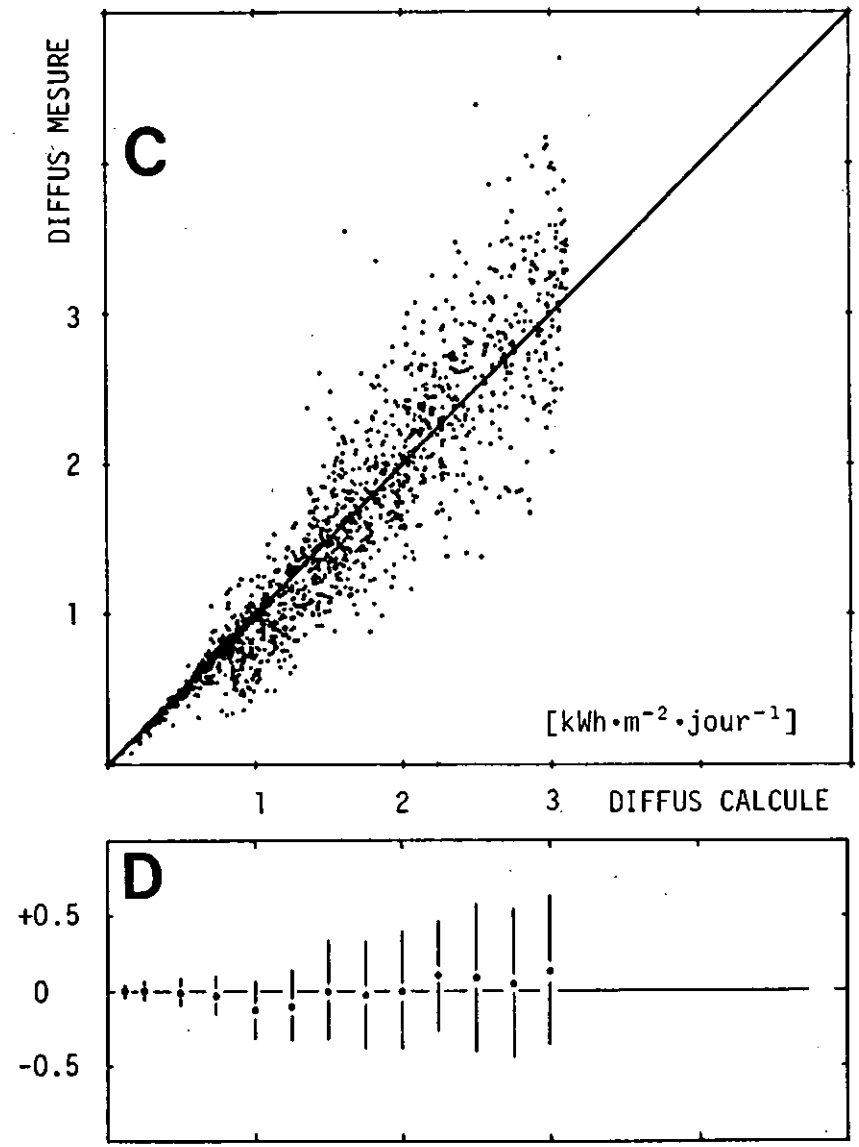
Figure 9 : $K_b = f''(K_h)$ en valeurs journalières.

$K_h \geq .15 \quad K_b = -.25 \cdot K_h + 1.43 \cdot K_h^2$

$K_h < .15 \quad K_b = 0$

Données : 1459 points





d) Corrélations en valeurs horaires

Diverses corrélations sont représentées sur les Fig. 10 à 12.

Les données de base sont limitées ici à l'année de référence (juxtaposition de 12 mois représentatifs des moyennes sur 4 ans).

Nous avons de plus éliminé certaines données moins précises en imposant les 2 critères suivants :

- hauteur moyenne du soleil durant l'heure > 9°
- H_h > 30 Wh/m^2

Les mêmes remarques que pour les corrélations journalières s'appliquent ici; plus particulièrement, la corrélation de la Fig. 11 est non seulement la plus simple mais tout aussi bonne si ce n'est meilleure que les autres. On peut noter également dans les Fig. 10D à 12D des effets systématiques non négligeables. L'application des corrélations conduit à des erreurs de l'ordre de 20 % sur la détermination du diffus.

Une analyse plus détaillée décrite dans l'Appendice 4, conduit à des constatations très semblables à celles décrites précédemment pour les valeurs journalières :

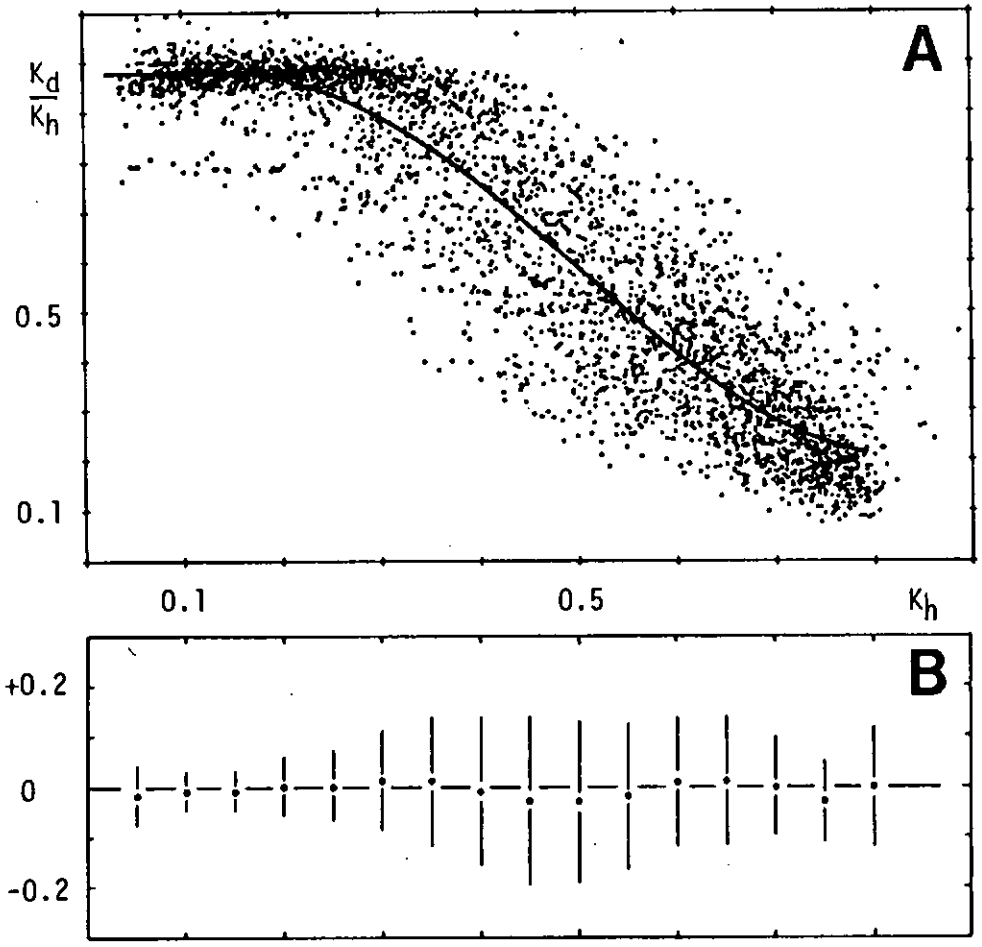
- la réduction des données en points moyens équivalents conduit aux mêmes résultats qu'avec un traitement direct de toutes les données initiales
- en examinant des données partielles d'été et d'hiver pour des mêmes hauteurs de soleil, nous avons mis en évidence des effets saisonniers significatifs mais faibles.
- de même pour la hauteur (h) du soleil (qui conduit à des effets semblables, significatifs mais faibles), ou la masse d'air traversée qui lui correspond (m), ceci indépendamment des saisons.
- il ne semble pas justifié de prendre en compte ces divers effets, compte tenu d'autres sources d'erreurs et des limites intrinsèques de ce genre de méthodes.

Figure 10 : $K_d/K_h = f(K_h)$ en valeurs horaires.

$K_h \geq .15$ $\quad K_d/K_h = .80 + 2.25 \cdot K_h - 7.93 \cdot K_h^2 + 5.26 \cdot K_h^3$

$K_h < .15$ $\quad K_d/K_h = .98$

Données : 3582 points



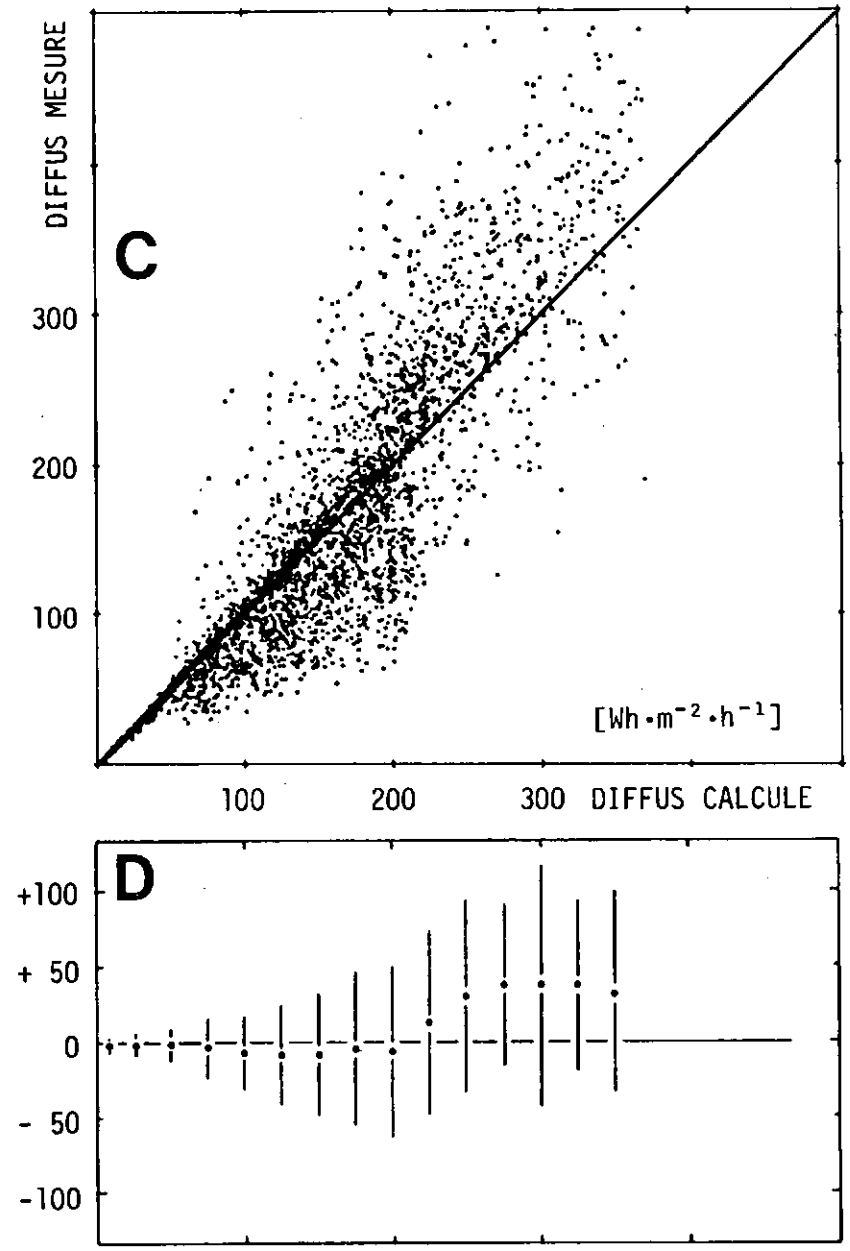


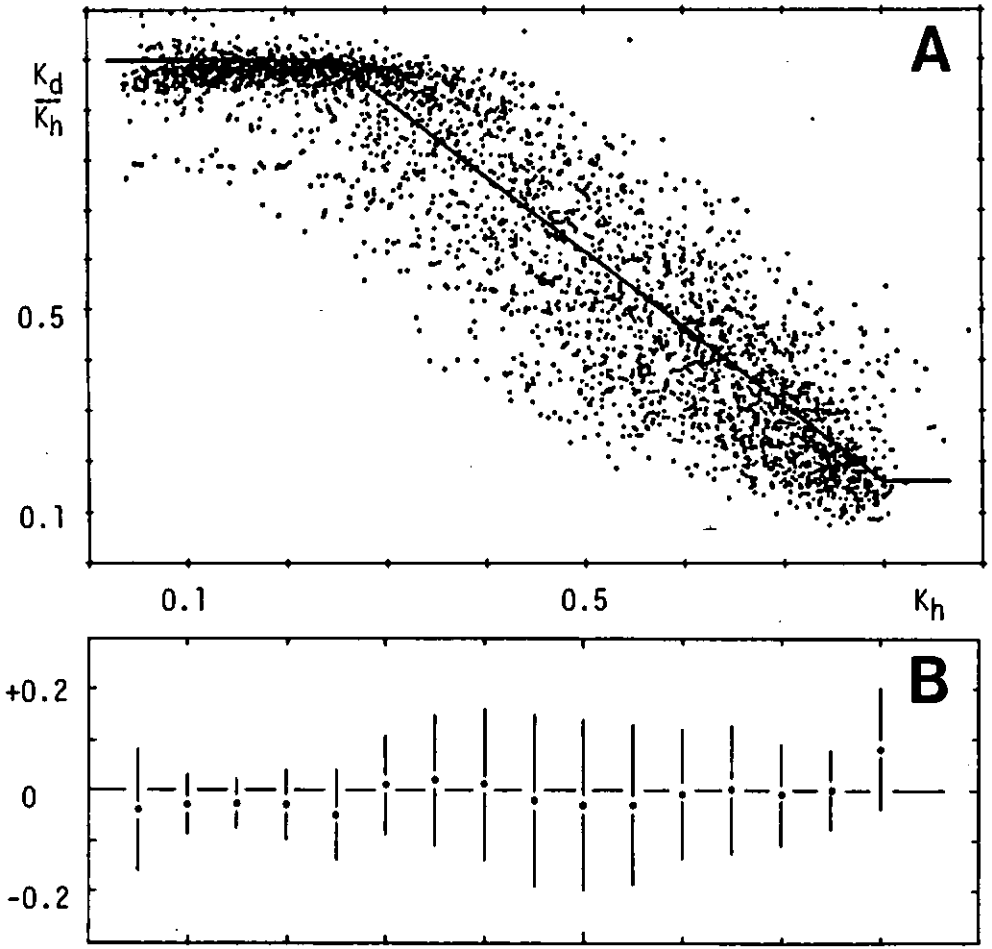
Figure 11 : $K_d/K_h = f(K_h)$ en valeurs horaires.

$K_h < .25$ $\quad K_d/K_h = 1.00$

$.25 \leq K_h \leq .80$ $\quad K_d/K_h = 1.38 - 1.52 \cdot K_h$

$.80 < K_h$ $\quad K_d/K_h = .16$

Données : 3582 points



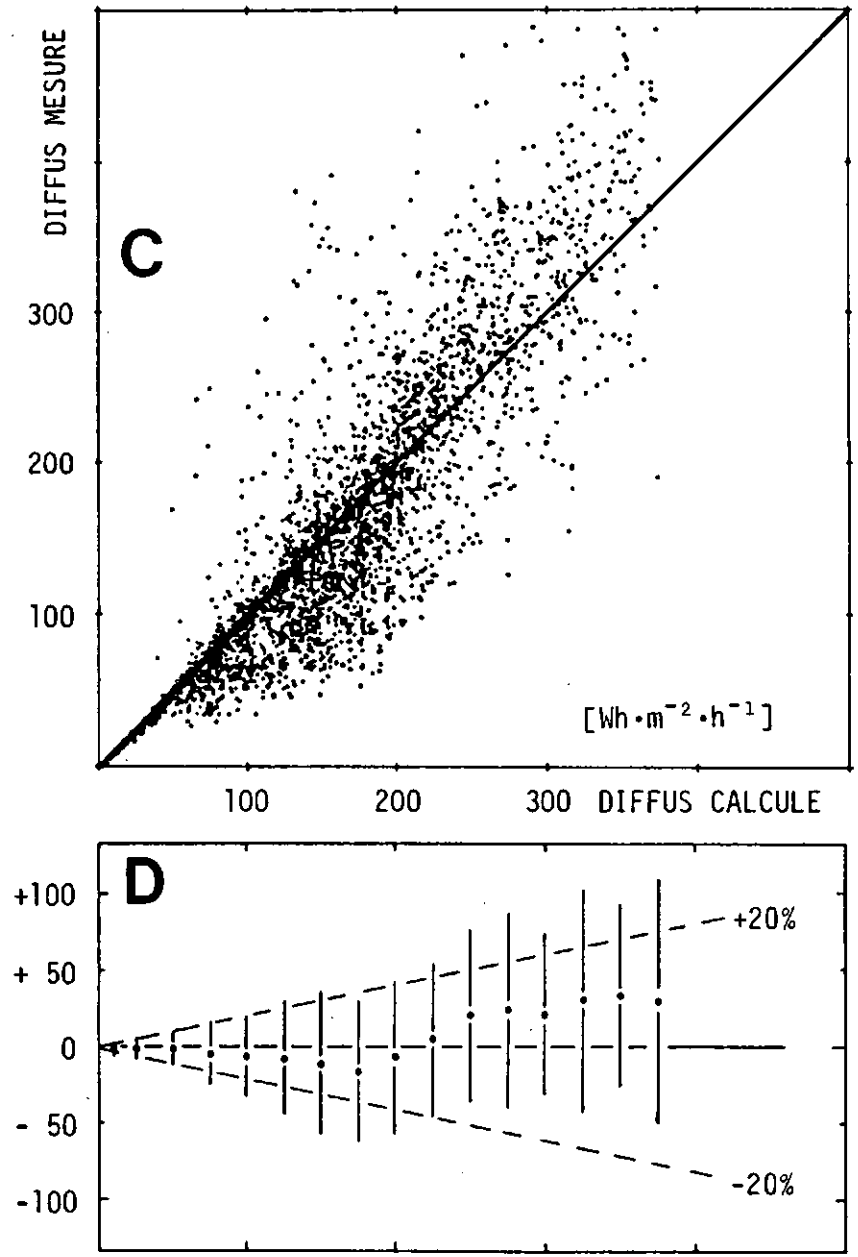
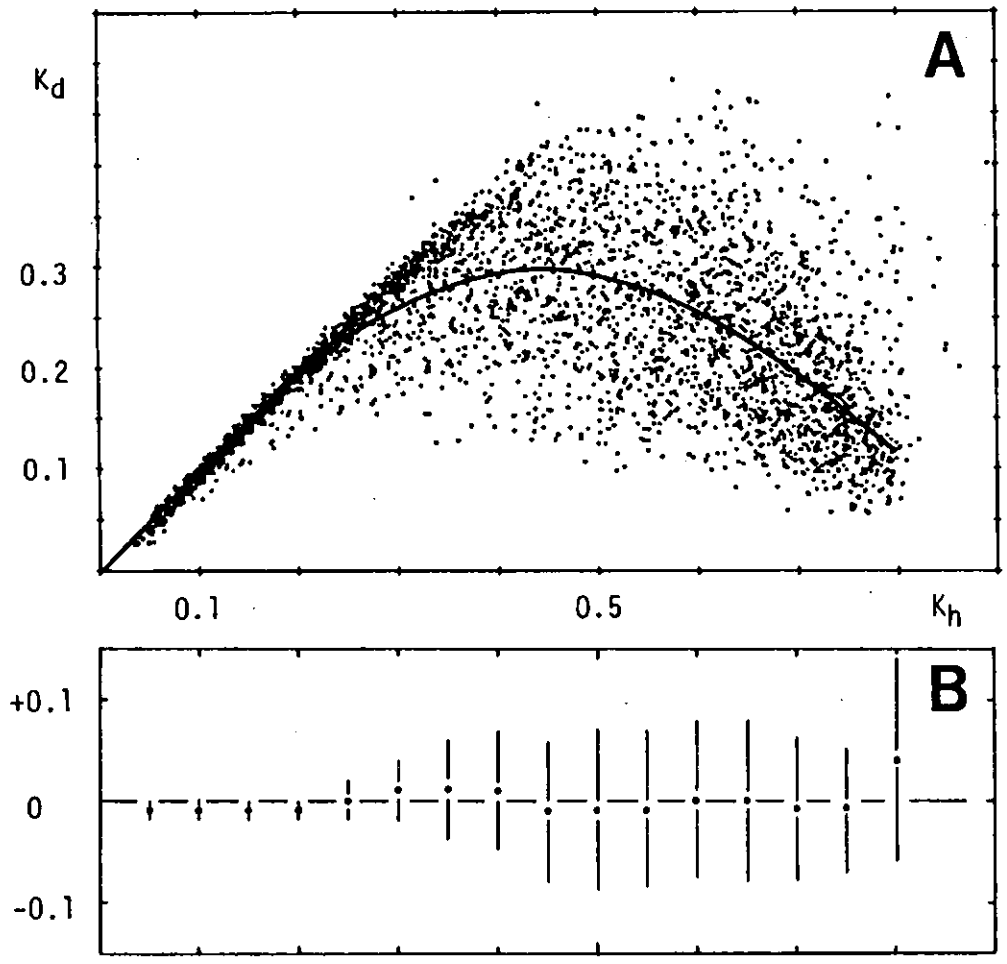


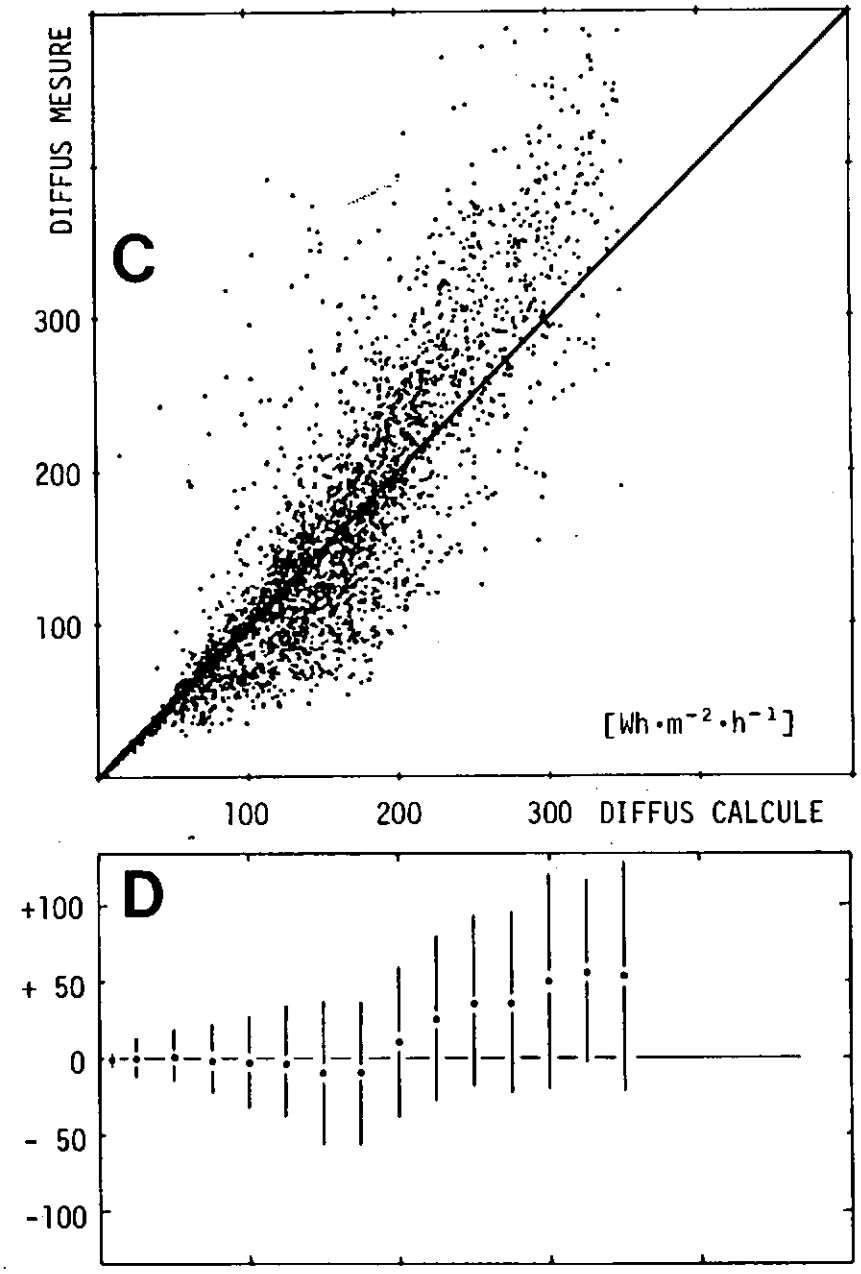
Figure 12 : $K_d = f'(K_h)$ en valeurs horaires.

$K_h \geq .25$ $\quad K_d = 1.28 \cdot K_h - 1.40 \cdot K_h^2$

$K_h < .25$ $\quad K_d = K_h$

Données : 3582 points





4. Comparaisons.

La Figure 13 A, B, C illustre une comparaison entre les résultats que nous avons obtenus pour la corrélation $K_d/K_h = f(K_h)$ et d'autres résultats mondiaux, en valeurs mensuelles, journalières et horaires.

L'accord est satisfaisant. Nos résultats sont bien "centrés" par rapport aux autres. Il faut remarquer dans ce contexte, que les corrélations en question peuvent dépendre du climat; il semble cependant que pour les intervalles de temps courts (valeurs horaires par exemple) ces corrélations suivent un comportement unique et universel, dans les limites de cette méthode approximative bien entendu !

Une comparaison des corrélations horaires, journalières et mensuelles entre elles est illustrée sur la Figure 13D . On voit qu'en passant de l'heure au jour puis au mois, les fonctions $f(K_h)$ sont progressivement "atténuées", ce qui se comprend sachant que les courbes journalières(ou mensuelles)résultent d'une convolution sur les courbes horaires (ou journalières).

La Figure 14 illustre une comparaison sur le plan suisse et en ce qui concerne les valeurs journalières de K_d/K_h. Nos résultats sont significativement en-dessous de ceux de Davos, Kloten et Locarno (d'après réf. [24]). Nous ne nous expliquons pas cette différence, si ce n'est que les valeurs citées correspondent à des mesures relativement anciennes.

Figure 13 : $K_d/K_h = f(K_h)$. Comparaisons.

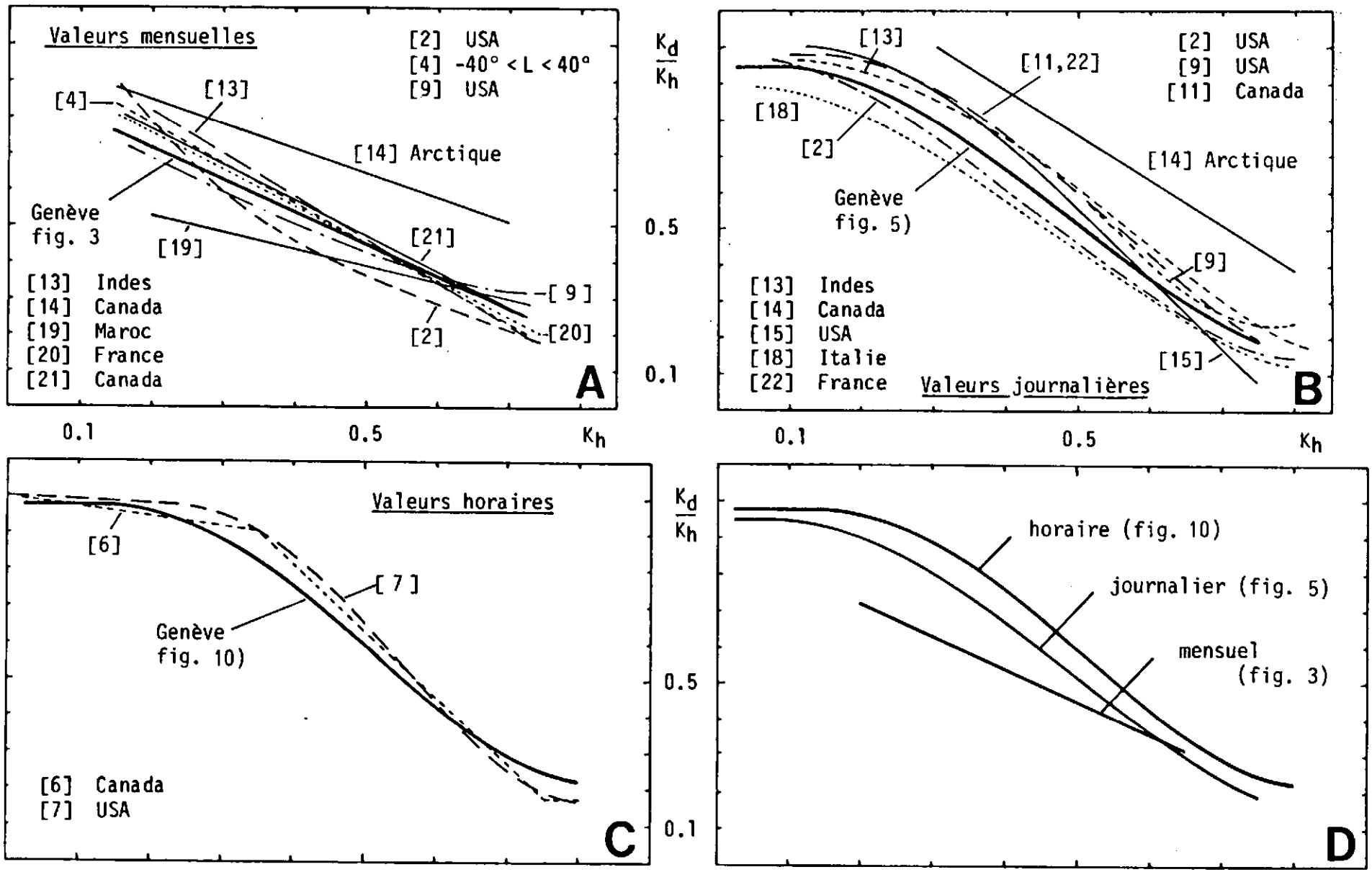


Figure 14 : $K_d/K_h = f(K_h)$ Comparaisons.

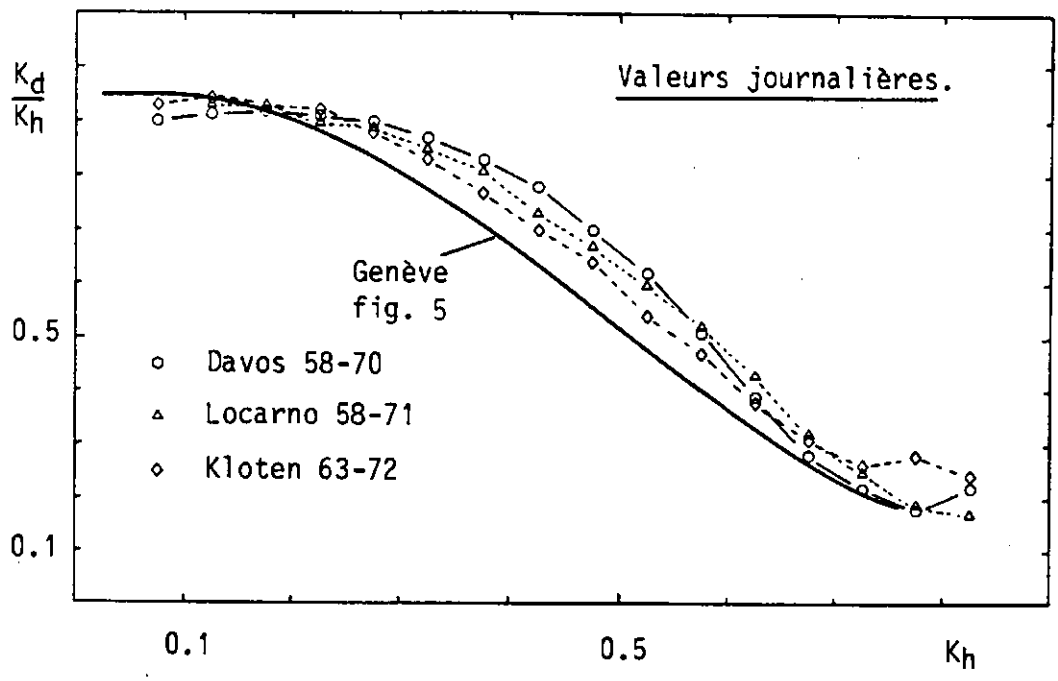


Table 1 : Résumé des corrélations obtenues.

cf. définitions dans le chapitre 1.

Valeurs mensuelles (Fig 3)

K_h qqc	$K_d/K_h = 0.90 - 0.90 \cdot K_h$

Valeurs journalières (Fig. 6)

$K_h < .15$	$K_d/K_h = 1.00$
$.15 \leq K_h \leq .75$	$K_d/K_h = 1.21 - 1.39 \cdot K_h$
$.75 < K_h$	$K_d/K_h = 0.17$

Valeurs horaires (Fig. 10)

$K_h < .25$	$K_d/K_h = 1.00$
$.25 \leq K_h \leq .80$	$K_d/K_h = 1.38 - 1.52 \cdot K_h$
$.80 < K_h$	$K_d/K_h = 0.16$

5. Conclusion.

Sur la base de nos 4 ans de données genevoises, nous avons analysé en détails certaines caractéristiques de l'indice de clarté K_h ainsi que les corrélations mensuelles, journalières et horaires des grandeurs K_d/K_h, K_d et K_b avec cet indice.

Nous donnons dans la Table 1 un résumé des corrélations qui nous semblent les plus simples et les plus significatives. Nous nous bornons ici aux corrélations $K_d/K_h = f(K_h)$ habituellement utilisées, les autres corrélations liées à K_d ou K_b n'apportant pas d'amélioration par rapport aux précédentes.
De nombreux effets (saisonniers, hauteur du soleil, méthodes d'ajustement et complexité des ajustements, etc...) ont été mis en évidence. Leur importance relative peut néanmoins être considérée comme négligeable et ne justifie pas l'introduction de méthodes plus compliquées.

Les résultats obtenus sont parfaitement cohérents avec d'autres études mondiales en la matière. Signalons que pour les hautes valeurs de K_h (>0.75 à 0.8), certains auteurs ont trouvé un comportement de $f(K_h)$ qui "remonte" alors que physiquement on s'attend à ce que $f(K_h) = 0$ pour $K_h = 1$. Nous n'avons pas introduit de contrainte pour les corrélations dans cette région, par ailleurs très peu peuplée statistiquement. Nos corrélations peuvent donc être modifiées dans cette région sans conséquence significative.

Les corrélations que nous avons déterminées constituent un outil extrêmement utile pour l'estimation du rayonnement diffus lorsqu'on ne connait que le rayonnement global (sur plan horizontal). Cet outil est simple, indépendant de modèles et quasi-universel; il n'est certes pas parfait, nous en avons précisé les limites. C'est néanmoins une approximation suffisante et raisonnable pour de nombreuses applications.

Remerciements.

Les mesures d'ensoleillement à Genève ont pu être accomplies grâce à un financement du Nationaler Energie-Forschungs-Fonds (NEFF). Cette étude se fait dans le cadre d'une collaboration avec M.A.Zelenka (ISM, Zurich) et avec l'Agence Internationale de l'Energie (OFEN et NEFF).

[1] Mesures d'ensoleillement à Genève

Publication N° 1 : Mesures d'ensoleillement à Genève
du 1er juillet 1978 au 30 juin 1979
A.M. Felkel, J.M. Gremaud, O. Guisan,
P. Ineichen et A. Mermoud. Février 1980.

Publication N° 2 : Mesures d'ensoleillement à Genève. Vol. II
Période du 1.7.79 au 30.6.80
J.M. Gremaud, O. Guisan, P. Ineichen, A. Mermoud
Avril 1981.

Publication N° 3 : Mesures d'ensoleillement à Genève. Vol. III
Etudes diverses.
P. Ineichen, O. Guisan, J.M. Gremaud.
Mai 1982.

Publication N° 4 : 4 années de mesures d'ensoleillement à Genève.
Thèse de P. Ineichen, Faculté des Sciences,
Université de Genève. Juillet 1983.

Publication N° 5 : Analyse et comparaison de deux modèles de
transposition plan horizontal => plan quelconque
A. Razafindraibe, P. Ineichen, O. Guisan.
Février 1984.

Publication N° 6 : Atlas et fichiers, mesures de 1978 à 1982
A. Razafindraibe, P. Ineichen, O. Guisan.
Février 1984.

Publication N° 7 : Corrélations diverses sur le rayonnement
infrarouge du ciel.
P. Ineichen, O. Guisan, A. Razafindraibe.
Février 1984.

Publication N° 8 : Connaissance du rayonnement solaire en
Suisse : besoins présents et futurs.
O. Guisan
Avril 1984

Publication N° 9 : ce document.

[2] B. Y. H. Liu, R. C. Jordan
The interrelationship and characteristic distribution of direct,
diffuse and total solar radiation.
Solar Energy N° 3, vol. IV, 1 (1960)

[3] B. LeBaron, I. Dirmhirn
Strengths and limitations of the Liu & Jordan model to determine
diffuse from global irradiance.
Solar Energy Vol. 31, N° 2, 167-172 (1983)

[4] J. K. Page
The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N - 40°S.
Proc. UN Conf. on New Sources of Energy, Publ N°35/5/98 (1961)

[5] J. W. Bugler
The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation.
Solar Energy Vol. 19, 477-491 (1977)

[6] J-F. Orgill, K. G. T. Hollands
Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface.
Solar Energy Vol. 19, 357-359 (1977)

[7] D. G. Erbs, S. A. Klein, J. A. Duffie
Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation.
Solar Energy Vol. 28, N° 4, 293-302 (1982)

[8] S. A. Klein
Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces.
Solar Energy Vol. 19, 325-329 (1977)

[9] M. Collares-Pereira, A. Rabl
The average distribution of solar radiation - Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values.
Solar Energy Vol. 22, 155-164 (1979)

[10] F. Vignola, D. K. McDaniels
Correlation between diffuse and global insolation for the Pacific north-west.
Solar Energy Vol.32, N° 2, 161-168 (1984)

[11] D. W. Ruth, R. E. Chant
The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada.
Solar Energy Vol. 18, 153-154 (1976)

[12] J. E. Hay
Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces.
Solar Energy Vol. 23, 301-307 (1979)

[13] N. K. D. Choudhury
Solar radiation in New Delhi.
Solar Energy Vol. 7, 44 (1963)

[14] S. E. Tuller
The ralationship between diffuse, total and extra terrestrial solar radiation.
Solar Energy Vol. 18, 259-263, (1976)

[15] C. R. Nagaraja Rao, W. A. Bradley, T. Young Lee
The diffuse component of the daily global solar irradiation at Corvallis, Oregon (USA).
Solar Energy Vol. 32, N° 5, 637-641 (1984)

[16] P. J. Smietana, R. G. Flocchini, R. L. Kennedy, J. L. Hatfield
A new look at the correlation of K_d and K_t ratios and at global solar radiation tilt models using one minute measurements.
Solar Energy Vol. 32, N° 1, 99-107 (1984)

[17] J. M. Gordon, M. Hochman
On correlation between beam and global radiation.
Solar Energy Vol. 32 N° 3, 329-336 (1984)

[18] G. Bartoli, V. Cuomo, U. Amato
Diffuse and beam components of daily global radiation in Genova and Macerata.
Solar Energy Vol. 28, N° 4, 307-311 (1982)

[19] M. L. Ben Kaddour
Etude du gisement solaire au Maroc en vue de son exploitation dans l'habitat.
Travail de fin d'études, Ecole Nationale des Travaux Publiques de l'Etat, Vaulx-en-Velin (1980)

[20] C. Perrin de Brichambaut
Estimation du rayonnement solaire.
Météorologie Nationale (1978)

[21] M. Iqbal
A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - I
Monthly average daily horizontal radiation.
Solar Energy Vol. 22, 81-86 (1979)

[22] J. L. Antoine, E. Desplanches, D. Ohlman
Lois horaires et journalières d'ensoleillement. Bilan énergétique d'une fenêtre.
Travail de fin d'études, Ecole Nationale des Travaux Publiques de l'Etat, Vaulx-en-Velin (1980)

[23] M. Iqbal
Prediction of hourly diffuse solar radiation from measured hourly global global radiation on a horizontal surface.
Solar Energy Vol. 24, (1980)

[24] P. Bremer
Communication privée.
Sede SA, Vevey

Appendice 1 : Définitions statistiques.

On trouve dans la littérature des approches statistiques pour le traitement des données différant parfois fortement d'un auteur à l'autre. Par souci de clarté, nous précisons ici les définitions que nous utilisons et le sens que nous leur attribuons.

- Définition du problème :
on dispose de N couples mesurés (x_i, y_i), on cherche à expliciter une corrélation entre les grandeurs y et x par une fonction y(x), on désire connaître l'erreur d'estimation sur y lorsqu'on applique la corrélation y(x) à une valeur particulière x_i : $y(x_i)$.

- Détermination de y (x) :
nous nous limitons ici à des fonctions simples (droites, polynôme, etc...)

I) les méthodes habituelles, par un ajustement à travers tous les couples (x_i, y_i), permet de déterminer les paramètres de la fonction y(x).
Lorsque y_i n'est pas affecté par une erreur connue (ce qui est souvent le cas), il n'est pas possible de caractériser l'ajustement par un chi-carré(χ^2).

II) lorsque les N couples (x_i, y_i) sont très nombreux on peut réduire les données en divisant l'axe x en n intervalles jointifs et en attribuant un point "moyen" (x_j, y_j) par intervalle :

$$y_j = \frac{1}{N_j} \sum_i y_i \qquad x_j = \frac{1}{N_j} \sum_i x_i \quad (\simeq \text{milieu intervalle } j)$$

N_j = nombre des couples (x_i, y_i) dans l'intervalle j, $N_j >> 1$,

$$\sum_{j=1}^{n} N_j = N$$

Dans chaque intervalle j, la distribution des écarts $y_i - y_j$ est centrée sur 0 et caractérisée par un écart-type σ_j (ou écart-standard):

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{N_j} \sum_i (y_i - y_j)^2$$

La valeur centrale y_j est déterminée avec une erreur $\sigma_{\mu j}$:

$$\sigma_{\mu j} = \sigma_j / \sqrt{N_j}$$

Partant de tous les points réduits (x_j, y_j) où y_j est affecté de l'erreur $\sigma_{\mu j}$, on peut par les méthodes habituelles déterminer les paramètres de la fonction y(x) cherchée.
L'ajustement peut être caractérisé par un chi-carré réduit :

$$\chi^2_\nu = \frac{n}{n-a} \frac{\sum_{j=1}^{n} [y_j - y(x_j)]^2 \frac{1}{\sigma_{\mu j}^2}}{\sum \frac{1}{\sigma_{\mu j}^2}} \qquad (a = \text{nbre de paramètres})$$

Ces 2 méthodes ne sont pas strictement équivalentes, elles donnent néanmoins en général des résultats très proches en ce qui concerne $y(x)$.

- Interprétation :
les points (x_i, y_i) peuvent être très dispersés par rapport à $y(x)$.
Deux causes, entre autres :
  - les erreurs de mesures
  - y n'est pas fonction uniquement de x

En énergie solaire, ce deuxième effet est souvent très important : on ramène des phénomènes extrêmement complexes (par le nombre de variables et leur dynamique) à des approximations simples du type $y(x)$. Ainsi dans un intervalle j, la grandeur σ_j caractérise l'erreur liée à la non-prise en compte d'autres phénomènes, ce qui se traduit par une erreur quasi-statistique. La grandeur y_j, moyenne de nombreux y_i, est une sorte de moyenne à long terme, de même pour l'erreur $\sigma_{\mu j}$ qui l'affecte. L'examen des points $(x_j, y_j \pm \sigma_{\mu j})$ permet une analyse plus fine des tendances à long terme, en s'affranchissant des fluctuations liées à σ_j.

Considérant tous les N points (x_i, y_i) et une fonction déterminée $y_\alpha(x)$ nous définissons :

$$\mu_\alpha = \frac{1}{N} \sum_i [y_i - y_\alpha(x_i)] \qquad \mu_\alpha = \text{écart-moyen}$$

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{1}{N} \sum_i [y_i - y_\alpha(x_i)]^2 \qquad \sigma_\alpha = \text{écart-type (ou écart-standard)}$$

L'écart-moyen μ_α traduit une erreur systématique entre données et fonction $y_\alpha(x)$; l'écart-type σ_α inclut l'effet précédent, mais si $\sigma_\alpha >> |\mu_\alpha|$, σ_α est dominé par les effets quasi-statistiques mentionnés.
Dans la recherche d'une corrélation on vise en général une erreur systématique à long terme aussi négligeable que possible ($\mu_\alpha \simeq 0$) ainsi qu'une description aussi proche que possible de la réalité ($\sigma_\alpha << y$), d'où l'importance de ces deux indicateurs qui, notons-le, s'expriment dans la même unité que y. N'oublions pas non plus que μ_α et σ_α caractérisent la précision que l'on peut atteindre en appliquant la corrélation obtenue $y_\alpha(x)$ à d'autres données x'_i.
L'ensemble des N points considérés peut être divisé en sous-ensembles N_k (intervalles en x ou autres), les indicateurs mentionnés peuvent être calculés spécifiquement pour ces sous-ensembles $(\mu_{\alpha k}, \sigma_{\alpha k})$, ce qui permet de voir la qualité d'une corrélation dans un ou des secteurs particuliers.

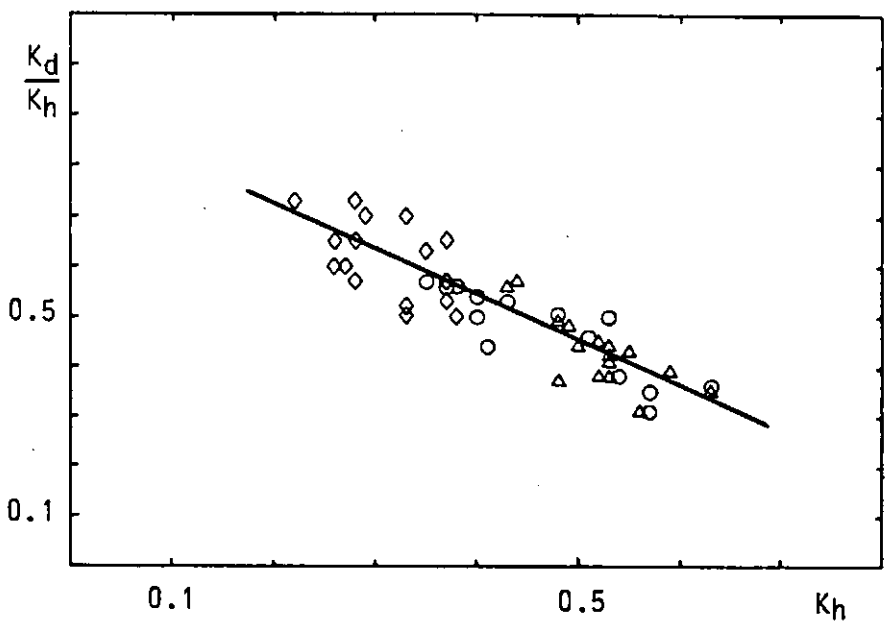
On peut être également amené à considérer différentes déterminations α de la fonction $y(x)$: nombre variable de termes polynomiaux, prise en compte ou non d'autres variables, etc.... Le choix de la fonction $y_\alpha(x)$ peut se faire sur la base d'un χ^2, d'un σ ou d'un μ minimum ou de combinaisons de ces critères. La réponse n'est pas unique, elle dépend du ou des critères retenus.

Les méthodes statistiques habituelles impliquent la minimisation d'un χ^2 ou d'un σ , mais pas de μ. Nous insistons ici sur le rôle de μ qui n'est pas sans importance dans ce contexte.

En conclusion, quelle que soit la méthode d'optimisation utilisée pour la détermination de $y_\alpha(x)$ et de ses paramètres (on pourrait discuter longuement là-dessus et les avis diffèrent), il nous semble important de caractériser la corrélation obtenue par les indicateurs mentionnés, μ_α et σ_α.

Appendice 2 Corrélations mensuelles et effets saisonniers.

Figure 15 : $K_d/K_h = f(K_h)$ en valeurs mensuelles
Effets saisonniers.
$K_d/K_h = .90 - .90 \cdot K_h$ Données : 48 points.



◇ été (mai,juin,juillet,août)
△ hiver (novembre, décembre, janvier, février)
○ autres (mars, avril,septembre, octobre)

L'examen visuel des différents points montre qu'aucun effet saisonnier significatif n'intervient. La statistique limite également les possibilités d'investigation.
La corrélation $K_d = f'(K_h)$ conduit aux mêmes conclusions.

Appendice 3. Corrélations $K_d/K_h = f(K_h)$ en valeurs journalières.

La corrélation définie au Chap. 3c et sur la Figure 5 est appelée ici la corrélation 1.

Investigation d'effets saisonniers :
Les saisons sont ici définies par le numéro du jour (J) compté à partir du 1er janvier : Eté : $102 \leq J \leq 242$; Hiver : $225 \leq J \leq 60$
Ou encore par : Eté : $\omega_s > \pi/2 + .15$; Hiver : $\omega_s < \pi/2 - .15$
(ω_s = angle horaire lever/coucher en rad.)

En utilisant la même méthode que pour la corrélation 1 mais en séparant les données par saison, des corrélations partielles ont été établies. Elles sont données dans la Table 2, ainsi que les indicateurs (valeur moyenne μ et écart standard σ des écarts entre ajustement partiel et données correspondantes) qui les caractérisent. Ces corrélations sont également illustrées sur la Figure 16 A. Les différences observées sont significatives au niveau des effets systématiques (valeurs moyennes à long terme ou indicateurs μ correspondants) mais négligeables comparativement aux variations quasi-aléatoires à court terme (décrites par les écarts-standard σ).

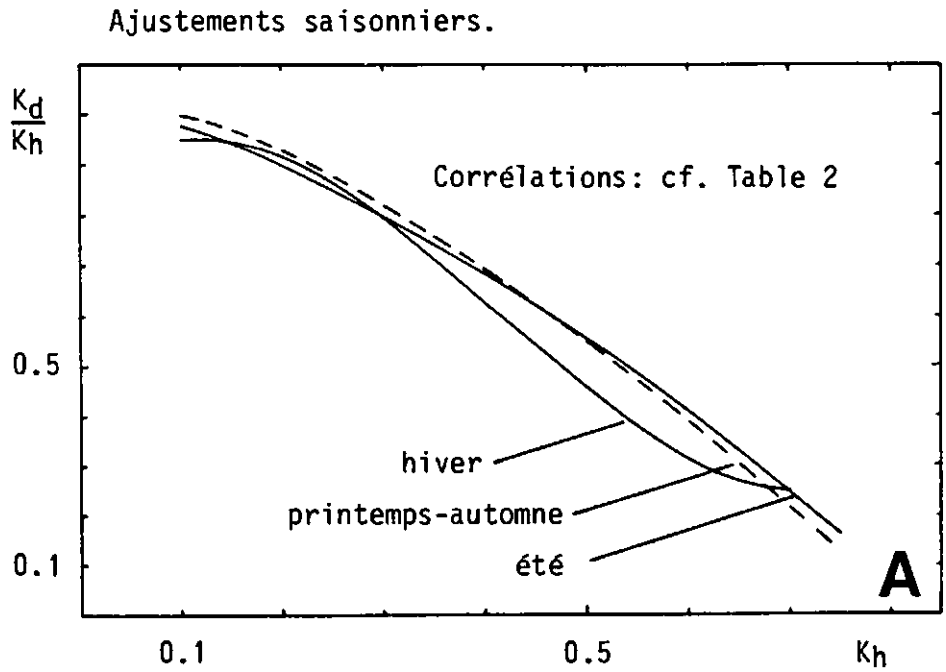
Une corrélation générale incluant ces effets saisonniers peut être établie en pondérant les corrélations partielles précédentes à l'aide d'un facteur variable au cours des saisons (lié ici à la déclinaison δ du soleil) : c'est la corrélation No 2 de la Table 2.

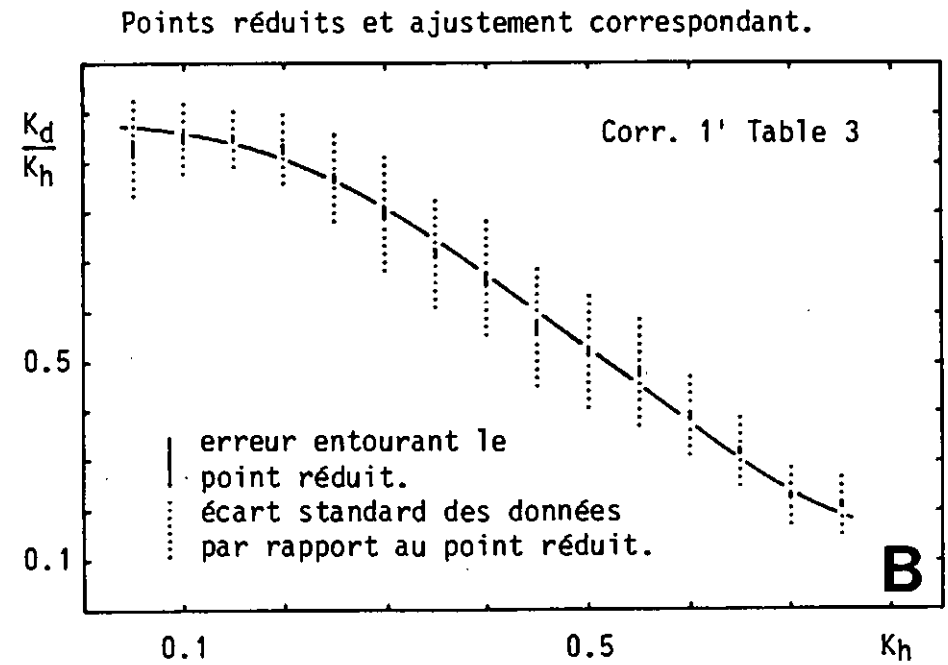
L'examen des divers indicateurs de la Table 2 (plus particulièrement μ) montre que les corrélations partielles sont localement légèrement meilleures que la corrélation générale 1 et que la corrélation 2 permet de tenir compte un peu mieux des effets saisonniers comparativement à la corrélation 1. Ces effets restent néanmoins faibles (quelques %); comme nous l'avons dit, ils sont significatifs au niveau de biais systématiques et négligeables vis-à-vis de fluctuations quasi-statistiques à court terme ($\sim$ 10%).

Dans la démarche précédente, les corrélations sont établies sur une partie des données ($K_h \geq .1$) ; les indicateurs sont calculés sur l'ensemble des données (en totalité et/ou par secteur) et pour les corrélations les plus significatives. Le nombre des données considérées dans chaque cas est précisé dans la même Table 2.

Toute l'analyse précédente des corrélations journalières a été reprise, pour comparaison, en utilisant une autre méthode : les données sont tout d'abord réduites en un nombre limité de "points moyens", lesquels servent à l'établissement des corrélations. Un indicateur χ^2_ν permet de qualifier la corrélation. Nous continuons néanmoins à utiliser aussi les autres indicateurs (μ et σ définis précédemment) calculés sur l'ensemble des données initiales (non réduites) en totalité et/ou par secteur et pour les corrélations les plus significatives.

Figure 16 : $K_d/K_h = f(K_h)$ en valeurs journalières.





La Figure 16 B illustre la réduction des points des Figures 5 ou 6 ainsi que l'ajustement correspondant.

Tous les aspects quantitatifs de cette seconde analyse sont présentés dans la Table 3, de façon presque conforme à la Table 2, sauf pour les différences inhérentes aux méthodes (y inclus la corrélation supplémentaire 3' dont l'équivalent par la première méthode est la corrélation 1).

Quant aux corrélations obtenues et aux indicateurs correspondants, les résultats sont quasi-identiques avec les 2 méthodes, la deuxième confirmant ainsi la première ainsi que les conclusions que nous en avons dégagées.

Table 2 : Corrélations journalières $K_d/K_h = f(K_h)$.

Méthode directe sur tous les points.

Examen d'effets saisonniers

Résultats et indicateurs des corrélations obtenues.

Corrélations et données Nº	type	nombre de points pour corrélation ($K_h \geq .10$)	Résultats a_0	a_1	a_2	a_3	nombre de points pour les indicateurs	indicateurs de la corrélation considérée μ	σ	indicateurs de la corrélation Nº 1 μ	σ	indicateurs de la corrélation Nº 2 μ	σ
1	Générale	1401	.92	.68	-4.47	3.02	1459	0.004	0.095	0.004	0.095	0.003	0.091
-	partielle été $f_e(K_h)$	560	1.05	- .70	- .38	- .35	563	0.002	0.086	0.021	0.091	0.007	0.086
-	partielle prin.- aut.	324	1.04	- .23	-1.86	.73	332	-0.002	0.076	0.015	0.080	0.016	0.081
-	partielle hiver $f_h(K_h)$	517	.85	1.82	-8.68	6.94	564	-0.004	0.101	-0.018	0.107	-0.008	0.101
2	générale + variations saisonnières	1401	$f(K_h) = CE \cdot f_e(K_h) + CH \cdot f_h(K_h)$ $CE = \frac{\delta + \delta_{max}}{2 \cdot \delta_{max}}$ $CH = 1 - CE$				1459	0.003	0.091	0.004	0.095	0.003	0.091

$K_h \geq 0.10$ $\quad f(K_h) = a_0 + a_1 \cdot K_h^1 + a_2 \cdot K_h^2 + a_3 \cdot K_h^3$

$K_h < 0.10$ $\quad f(K_h) = f(.10)$

δ = déclinaison

$\delta_{max} = 23.4°$

Table 3 : Corrélations journalières $K_d/K_h = f(K_h)$.

Méthode indirecte en passant par des points réduits.

Examen d'effets saisonniers
Résultats et indicateurs des corrélations obtenues.

Corrélations et données N°	type	nombre de points pour réduction ($K_h \geq .075$)	nombre de points réduits pour corrélation	Résultats a_0	a_1	a_2	a_3	nombre de points réduits pour χ^2_ν	nombre de points pour indicateurs μ σ	indicateurs de la corrélation considérée χ^2_ν	μ	σ	indicateurs de la corrélation N° 1' μ	σ	indicateurs de la corrélation N° 2' μ	σ
1'	Générale	1425	14	.95	.52	-4.10	2.73	15	1459	4.34	-0.002	0.095	-0.002	0.095	0.002	0.090
-	partielle été $f_e(K_h)$	562	14	.98	.04	-2.26	1.05	15	563	3.31	-0.006	0.086	0.017	0.090	0.001	0.086
-	partielle hiver $f_h(K_h)$	535	14	.85	1.67	-7.92	6.06	15	564	1.62	-0.001	0.101	-0.027	0.109	-0.006	0.100
-	partielle prin.-aut.	328	14	.99	.22	-3.01	1.58	15	332	1.27	0.003	0.076	0.009	0.078	0.016	0.079
3'	générale ttes saisons	1425	42	.94	.67	-4.42	2.93	45	1459	5.63	-0.011	0.096	-0.002	0.095	0.002	0.090
2'	générale + variations saisonnières	1425	42	$f(K_h) = CE \cdot f_e(K_h) + CH \cdot f_h(K_h)$				45	1459	3.14	0.002	0.090	-0.002	0.095	0.002	0.090
				$CE = \begin{cases} 1 & \text{été} \\ .5 & \text{autres} \\ 0 & \text{hiver} \end{cases}$ $CH = 1 - CE$												

$K_h \geq 0.10 \quad f(K_h) = a_0 + a_1 \cdot K_h^1 + a_2 \cdot K_h^2 + a_3 \cdot K_h^3$

$K_h < 0.10 \quad f(K_h) = f(.10)$

Appendice 4. Corrélations $K_d/K_h = f(K_h)$ en valeurs horaires.

La corrélation décrite au Chap. 3 d) et sur la Figure 10 est appelée ici corrélation 1.

Différentes corrélations polynomiales sont déterminées : dans un cas avec toutes les données initiales, dans les autres cas avec les points réduits qui leur correspondent; nous avons calculé de même les divers indicateurs, plus spécialement μ et σ (écart-moyen et écart-standard) qui permettent de qualifier les diverses corrélations obtenues par comparaison aux données initiales (en totalité ou par secteur).

Des corrélations générales sont présentées dans la Table 4 avec les caractéristiques suivantes :

Corr. 1 : sur tous les points. Cf. Fig. 10

Corr. 2 : sur points réduits (indépendamment de la hauteur h du soleil) Cf. Fig. 17A

Corr. 3 : fonction de K_h seul, établie sur points réduits en K_h et h (référence pour 2 cas suivants)

Corr. 4 : fonction de K_h et h, sur points réduits en K_h et h

Corr. 5 : fonction de K_h et $\bar{m}$, sur points réduits en K_h et h ($\bar{m}$ = épaisseur d'air = $1/\sin h$)

Les corrélations 4 et 5 sont établies sur la base des corrélations partielles en h de la Table 5.

Sur la Table 4, figurent également 2 corrélations partielles été/hiver (ces saisons étant définies de la même façon que pour les corrélations journalières). Elles sont illustrées sur la Fig. 17 B. Cette comparaison est effectuée pour un même domaine de hauteur h de soleil : $9° \leqslant h \leqslant 25°$ (celle-ci excédant rarement 25° en hiver). On voit là un effet saisonnier indépendant de h qui, si il est faible, est cependant significatif.

Nous avons examiné en détails des effets possibles de "hauteur de soleil" incluant toutes saisons. Des corrélations partielles suivant h sont explicitées dans la Table 5 et illustrées sur la Figure 17 C (h = 20° concerne la plage 15° à 25°, etc...).Un lissage par moindres carrés des coefficients polynomiaux de $f(K_h)$ suivant h ou $\bar{m}$ permet de déterminer les corrélations générales 4 et 5 (avec l'approximation $\bar{m} = 1/\sin h$; ce lissage est caractérisé par des coefficients de corrélation médiocres : $0.5<r<0.9$). Les conclusions de cette analyse diffèrent peu de celles tirées des corrélations journalières :

- des effets systématiques (typiquement quelques %) apparaissent, liés aux saisons et à la hauteur du soleil (ces 2 types d'effets étant par ailleurs fortement imbriqués). Ils sont néanmoins faibles comparativement aux fluctuations quasi-aléatoires liées à σ.

- la corrélation 5 est légèrement meilleure que la corrélation 4

- la corrélation 5 ne semble pas, globalement, meilleure que la corrélation 1, néanmoins elle respecte mieux certaines conditions locales (Cf. indicateurs corrélations par tranches h)

- il semble difficile de trouver des corrélations raffinées nettement meilleures que les corrélations générales directes (1 ou 2 ou même Fig. 11).

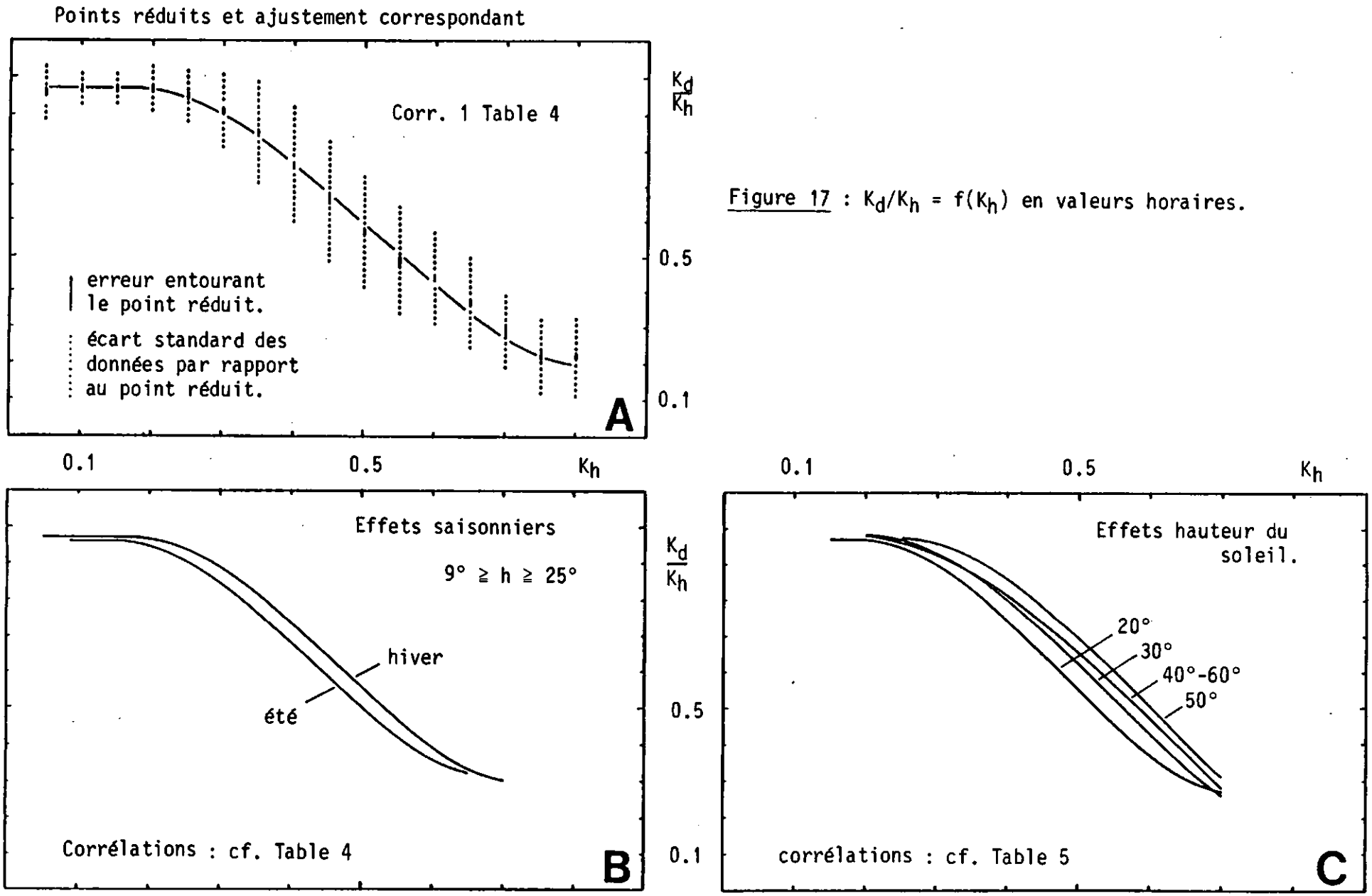


Figure 17 : $K_d/K_h = f(K_h)$ en valeurs horaires.

Table 4 : Corrélations horaires $K_d/K_h = f(K_h)$ sur la base de 3582 données (année de référence).
Paramètres et indicateurs des corrélations trouvées.

Corrélations						Indicateurs			
Nº	Données : N points => N_k pts réduits ($K_h \geq .125$)	Résultats a_0	a_1	a_2	a_3	Données pour χ^2_υ pts réd.	χ^2_υ	μ & σ pour les 3582 points. μ	σ
1	3132 ($K \geq .15$)	.80	2.25	-7.93	5.26	-	-	0.006	0.113
2	3299 => 14	.78	2.34	-8.07	5.29	16	5.63	0.004	0.113
3	3299 => 65	.75	2.65	-8.41	5.25	75	7.16	-0.015	0.115
4	3299 => 65	$.63+.19\cdot\overline{\sin h}$	$4.19-2.51\cdot\overline{\sin h}$	$-14.5+10.1\cdot\overline{\sin h}$	$10.9-9.52\cdot\overline{\sin h}$	75	4.93	0.007	0.107
5	3299 => 65	$.85-0.06\cdot\overline{m}$	$1.18+0.81\cdot\overline{m}$	$-2.25-3.30\cdot\overline{m}$	$-0.57+3.09\cdot\overline{m}$	75	3.09	0.013	0.109
été	412 => 11	.73	3.01	-11.39	8.89	13	1.11		
hiver	604 => 13	.70	3.24	-11.13	8.13	15	2.27		

$K_h \geq .15 \quad f(K_h) = a_0 + a_1 \cdot K_h + a_2 \cdot K_h^2 + a_3 \cdot K_h^3$

$K_h < .15 \quad f(K_h) = f(.15)$

hauteur du soleil	nombre de points par tranche h ($K_h \geq .125$)	nombre de points réd. ($K_h \geq .125$)	Résultats obtenus pour la corrélation par points réduits. a_0	a_1	a_2	a_3	Données pour χ^2_ν pts réd.	nombre de pts pour μ & σ	Indicateurs pour la corrélation considérée χ^2_ν	μ	σ
15° - 25°	786	11	.67	3.60	-12.0	8.65	13	878	3.80	0.000	0.111
25° - 35°	662	13	.73	2.84	-8.89	5.54	15	729	4.05	0.003	0.096
35° - 45°	539	13	.82	1.83	-5.88	3.10	15	597	1.68	0.010	0.099
45° - 55°	430	14	.68	3.98	-8.10	4.40	16	454	6.08	0.003	0.097
55° - 67°	419	14	.82	1.88	-5.83	3.07	16	440	3.50	-0.003	0.099
	2836	65						3098			

hauteur du soleil	nombre de pts pour μ & σ	Indicateurs pour d'autres corrélations de la Table 4 et les mêmes points par tranche h. Corr. N° 2 μ	Corr. N° 2 σ	Corr. N° 4 μ	Corr. N° 4 σ	Corr. N° 5 μ	Corr. N° 5 σ
15° - 25°	878	-0.013	0.115	0.002	0.111	0.015	0.111
25° - 35°	729	0.012	0.098	0.014	0.096	0.001	0.095
35° - 45°	597	0.027	0.105	0.017	0.101	-0.001	0.098
45° - 55°	454	0.032	0.107	0.022	0.100	0.003	0.096
55° - 67°	440	0.033	0.111	0.023	0.108	0.006	0.101

Corrélation 4	Corrélation 5
$a_0 = 0.63 + 0.19 \cdot \overline{\sin h}$	$a_0 = 0.85 - 0.06 \cdot \bar{m}$
$a_1 = 4.19 - 2.51 \cdot \overline{\sin h}$	$a_1 = 1.18 + 0.81 \cdot \bar{m}$
$a_2 = -14.5 + 10.1 \cdot \overline{\sin h}$	$a_2 = -2.25 - 3.30 \cdot \bar{m}$
$a_3 = 10.9 - 9.52 \cdot \overline{\sin h}$	$a_3 = -0.57 + 3.09 \cdot \bar{m}$

Table 5 : Corrélations horaires partielles $K_d/K_h = f(K_h)$ pour différentes hauteurs de soleil h.

Paramètres et indicateurs des ajustements obtenus.

$K_h \geq .15 \quad f(K_h) = a_0 + a_1 \cdot K_h + a_2 \cdot K_h^2 + a_3 \cdot K_h^3$

$K_h < .15 \quad f(K_h) = f(.15)$