

Jean-Luc MERCIER \*

## CALCUL ET CARTOGRAPHIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBAL DANS LE BASSIN VERSANT DU RINGELBACH



8105-8 D RM

### RÉSUMÉ

Un programme de calcul transforme le rayonnement global mesuré à l'horizontale en un rayonnement global incliné sur des pentes. La cartographie de ce rayonnement incliné permet d'obtenir le terme radiatif de l'évapotranspiration potentielle. Un calcul d'erreur permet de connaître la précision de la transformation effectuée.

### SUMMARY

**Computation and mapping of the solar global radiation in the Ringelbach river-basin.**

The global radiation on slopes is computed after measurement of global horizontal radiation. Maps of global inclined radiation are allow to achieve the radiative term of potential évapotranspiration.

### ZUSAMMENFASSUNG

**Berechnung und Kartographie der Globalstrahlung in dem Ringelbachs Einzugsgebiet.**

Ein Computerprogramm verwandelt die Globalstrahlung, auf einer horizontalen Fläche gemessen, in eine geneigte Einstrahlung auf den Hängen. Die Kartographie dieser solaren Hanbestrahlung erlaubt es den Strahlungsfaktor der potentiellen Evapotranspiration.

### INTRODUCTION

La surface du sol est en interaction avec la basse atmosphère ceci à toutes les échelles utilisées en météorologie. A la plus grande échelle, la micrométéorologie a pour but d'étudier la physique de ces échanges. De nombreux travaux tant théoriques qu'empiriques, ont été faits en conditions idéales, régime permanent, surface uniforme infinie... Cependant ces types de milieux sont difficiles à trouver dans la nature car les plus grandes étendues continentales sont formées de collines ou de montagnes.

Les variations dans le temps et dans l'espace des valeurs moyennes du climat sont habituellement présentées sous le vocable de microclimat, mésoclimat ou climat local. Cependant, cette terminologie fait référence implicitement à la notion d'échelle mais il n'existe pas dans la bibliographie de consensus général à ce sujet. Deux termes peuvent néanmoins être utilisés, le terme de microclimat qui s'applique à de très petites surfaces et le terme de topoclimat proposé par Thornthwaite (1953) auquel cet auteur associait une finalité «*the ultimate objective of climatology may be to make maps of the heat budget and the moisture budget of the earth on a topoclimatological scale*» ; ceci correspond en grande partie aux travaux de l'E.R.A. 569 du C.N.R.S. sur les problèmes de l'évaporation (NAJJAR 1980, AMBROISE et al. 1980).

Or, la connaissance de la distribution spatiale de l'évapotranspiration en montagne est des plus réduites : on sait que le profil de vitesse du vent est parallèle au profil topographique, que la hauteur des précipitations est l'inverse du profil topographique et que le profil d'évaporation est parallèle au profil topographique ; ces règles empiriques ne permettent pas de connaître quantitativement les flux. C'est pourtant ce à quoi nous tendons et ce travail n'est qu'un élément dans ce but.

Lorsque l'on considère le fonctionnement de la surface du sol en régime permanent, on peut écrire :

$$R_n + S_s + H + LE + F + A + P + M + B = 0.$$

Expression dans laquelle  $R_n$  est le rayonnement net,  $S_s$  le flux de chaleur dans le sol,  $H$  le flux de chaleur sensible transféré à l'air,  $LE$  la chaleur latente utilisée en évaporation ou cédée par condensation,  $F$  la chaleur utilisée pour fondre la neige (ou rétrocedée) ; à ces termes principaux s'ajoute en terrain non uniforme un terme  $A$  d'advection de chaleur du (ou vers le) site, trois autres termes de moindre importance sont à ajouter, un terme d'échange de chaleur par les précipitations,  $P$ ,  $M$  la chaleur produite par les frottements dus au vent,  $B$  les échanges de chaleur avec les mécanismes biologiques. Dans la plupart des cas on utilise cette relation sous une forme simplifiée :

$$R_n + S_s + H + LE = 0.$$

Le rayonnement net peut s'exprimer sous la forme  $R_n = (G - aG) + (Ra - Rs)$  dans laquelle  $Ra$  et  $Rs$  sont les rayonnements en grande longueur d'onde et  $a$  est l'albédo de la surface.  $Ra$  étant émis par la totalité de la voute céleste il

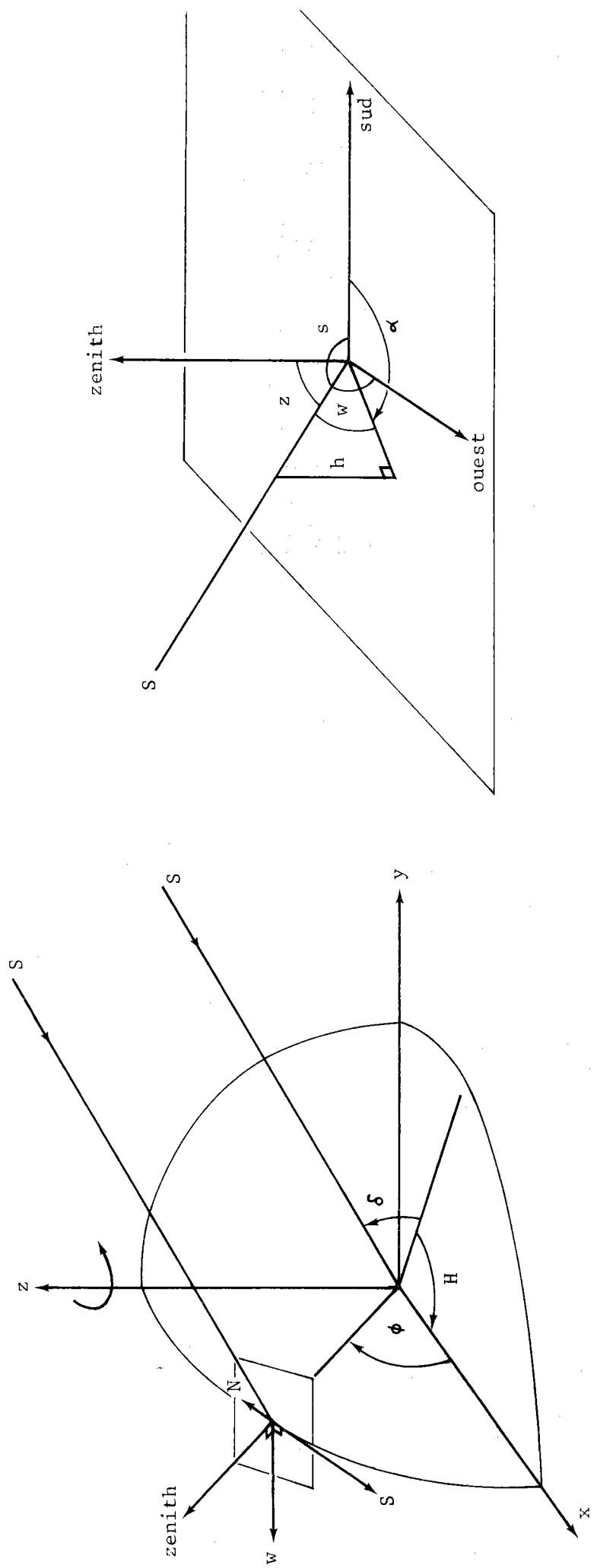


FIGURE 1 - RELATIONS ASTRONOMIQUES DESTINÉES AU CALCUL DE COS Z

affecte aussi bien les versants Nord que les versants Sud, donc seul le rayonnement global  $G$  est susceptible d'être spatialisé en fonction des pentes et des orientations.

C'est cette recherche et la cartographie du rayonnement global incliné qui sont présentés ici.

## I -- LA MÉTHODE UTILISÉE

Le rayonnement global à l'horizontale  $G_h$  est la somme de deux termes ; un rayonnement direct  $S_h$  et un rayonnement diffus  $D_h$  ; le rayonnement global arrivant sur un versant incliné  $G_i$  est donc lui aussi séparable en deux éléments  $D_i$  et  $S_i$  qui sont respectivement le rayonnement direct et le rayonnement diffus (les indices  $i$  référant à un milieu incliné). Il s'agit donc d'obtenir les différents termes  $G_h$ ,  $D_h$ ,  $S_h$ ,  $G_i$ ,  $D_i$ ,  $S_i$ .

### 1) Obtention du rayonnement global horizontal et de ses composantes

Ce rayonnement  $G_h$  est mesuré à l'aide d'une pile Kipp et Zonen et le signal est intégré sur la journée à l'aide d'un intégrateur CIMEL CE 261.

Les rayonnements diffus et directs à l'horizontale : la méthode la plus exacte consiste à mesurer le rayonnement diffus à l'aide d'un second appareillage semblable au premier, mais muni d'un bandeau, le rayonnement direct étant obtenu par différence. L'inconvénient de cette méthode est de nécessiter deux appareils dont les relations d'étalonnage soient les plus proches possibles.

Nous avons utilisé une méthode plus légère qui ne nécessite que la mesure du rayonnement global horizontal, le rayonnement diffus horizontal étant obtenu par un calcul. En effet Liu et Jordan (1960) (in Perrin de Brichambault p 248) ont montré que le rapport Diffus/Global était linéairement relié au rapport Global/Global extra-terrestre soit :

$$G_h = D_h + S_h$$

$$D_h / G_h = 1.0 - 1.13 (G_h / G_0) \quad (1)$$

Cette relation exprime que, à l'échelle de la journée, l'atténuation du rayonnement extraterrestre de  $G_0$  à  $G_h$  est proportionnelle au rapport Diffus/Global.

Le rayonnement global extraterrestre peut être obtenu par des relations astronomiques (fig. 1) et  $G_0 = I_0 \cos z$  (2)

avec  $I_0$  constante solaire égale à 1.98 ly/mn et

$$\cos z = \sin \phi \cdot \sin \delta - \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos h \quad (3)$$

dans laquelle :  $\phi$  est la latitude du lieu  
 $\delta$  est la déclinaison solaire  
 $h$  est l'angle horaire

et si  $\cos z \geq 0$ , le soleil est levé.

### 2) Procédure de calcul

Il s'agit de calculer successivement les relations (3) (2) et (1). Dans l'équation (3) la latitude du lieu peut être considérée comme une constante dans un petit bassin versant donc les termes  $\sin \phi$  et  $\cos \phi$  ne sont calculés qu'une fois. La déclinaison solaire  $\delta$  varie dans l'année mais comme nous nous intéressons à des événements à l'échelle de la journée,

$\delta$  ne sera calculée qu'une fois par jour (Tab : 1). L'angle horaire  $h$  varie dans la journée de  $360^\circ$  en 24 h soit  $h = \omega t$  et la vitesse angulaire  $\omega = 15^\circ/h$ . Le pas de temps utilisé lors du calcul est inférieur à l'heure, car afin de concilier vitesse et précision du calcul, nous avons choisi un pas de temps de 15 mn. La justification de ce choix sera faite plus loin.

Tableau 1 :  $\delta$  : déclinaison solaire

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
1	-23.16°	-18.22°	-8.40°	3.66°	14.75°	21.89°	23.16°	18.22°	8.40°	-3.66°	-14.75°	-21.89°
10	-22.30°	-15.69°	-4.87°	7.24°	17.42°	22.93°	22.30°	15.69°	4.87°	-7.24°	-17.42°	-22.93°
20	-20.70°	-12.42°	-0.81°	11.00°	19.88°	23.43°	20.70°	12.42°	0.81°	-11.00°	-19.88°	-23.43°

L'algorithme de calcul est le suivant :

1. Calcul des constantes
2. Début d'une boucle de calcul sur les 96 quarts d'heures de la journée
3. Calcul de la relation (3)
4. Si  $\cos z < 0$ , le soleil n'est pas levé et l'on va directement en 6.
5. Si le soleil est levé on ajoute 15 mn de rayonnement à la valeur précédente de  $G_0$
6. Fin de la boucle, on augmente le temps de 15 mn et l'on retourne en 2.
7. A la fin de la journée, on imprime le résultat du calcul.

On a reporté sur le tableau 2 les valeurs de rayonnement global à l'extérieur de l'atmosphère obtenues de cette manière.

Tableau 2 :  $G_O$  : Rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère sur une surface horizontale (joules/cm<sup>2</sup>)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
1	858	1186	1895	2820	3687	4244	4344	3958	3190	2253	1429	939
10	913	1362	2161	3099	3896	4327	4277	3760	2915	1981	1241	872
20	1018	1597	2472	3394	4088	4365	4152	3505	2599	1701	1073	840

Le rayonnement global à l'horizontale  $G_H$  étant mesuré,  $G_O$  étant calculé, il est aisé par la relation (1) d'obtenir le rayonnement diffus à l'horizontale  $D_H$  puis par soustraction le rayonnement direct  $S_H$  (tableau 3).

Tableau 3 : Valeurs de rayonnement obtenues lors des campagnes de mesure d'évapotranspiration 1980

JUILLET 1980

	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$G_O$ (2)	4207	4194	4181	4167	4152	4137	4121	4105	4088
$G_H$ mesuré	1549	1648	1168	1918	939	524	2923	2753	2456
$D_H$ (1)	904	916	799	920	699	449	580	666	788
$S_H$	644	731	368	997	239	74	2342	2086	1667

SEPTEMBRE 1980

	15	16	17	18	19	20	21	22	28	29
$G_O$ (2)	2757	2726	2694	2663	2631	2599	2567	2535	2347	2315
$G_H$ mesuré	1877	1797	884	1283	1570	1571	706	936	1512	834
$D_H$ (1)	432	458	556	584	511	497	486	545	411	494
$S_H$	1444	1338	327	698	1058	1073	219	390	1100	339

### 3) Obtention du rayonnement global incliné et de ses composantes

Le rayonnement global incliné  $G_i$  étant la somme des rayonnements directs et diffus inclinés ( $G_i = D_i + S_i$ ), nous obtiendrons d'abord le rayonnement diffus incliné puis le rayonnement direct incliné.

L'obtention du rayonnement diffus  $D_i$  sur une pente est très difficile à obtenir : la diffusion du rayonnement par le ciel n'est pas isotrope, une couronne plus intense existe autour du soleil. Ainsi le rayonnement diffus sera plus important sur un versant orienté au Sud que sur une surface plane et un versant exposé au Nord recevra moins que celle-ci. Pour des versants verticaux ces différences sont pratiquement nulles. Kondratiev (1961) a montré que pour des versants de moins de 30° le rayonnement diffus sur une pente pouvait être approché par :

$$D_i = D_H \cos^2 (\beta/2) \quad (4)$$

dans laquelle  $\beta$  est la pente du versant ; pour des raisons numériques cette relation est résolue sous la forme  $D_i = 0.5 D_H (1 + \cos \beta)$  qui lui est équivalente.

L'obtention du rayonnement direct incliné est moins immédiate :

Le rayonnement direct sur une surface plane s'écrit :  $S_H = 1.98 / r^2 \exp(-T) \cos z$   
 Le rayonnement direct sur une surface inclinée :  $S_i = 1.98 / r^2 \exp(-T) \cos i$  (GATES 1965) dans lesquelles les termes en  $\exp(-T)$  représentent l'absorption atmosphérique. Si l'on écrit le rapport entre ces deux rayonnements, on obtient une expression plus simple

$$S_i/S_H = \cos i / \cos z \quad (6)$$

dans laquelle  $\cos z$  a déjà été calculé et

$$\cos i = \cos \beta \cdot \cos z + \sin \beta \cdot \sin z \cdot \cos (\alpha - \eta) \quad (7)$$

$z$  et  $\beta$  ont déjà été définies,  $\eta$  est l'orientation du versant et  $\alpha$  l'azimut du soleil. En combinant les relations (4) et (6) on obtient le rayonnement global incliné  $G_i$ .

$$G_i = (G_H - D_H) \left( \sum_{j=1}^n (\cos i / \cos z) \right) + 0.5 D_H (1 + \cos \beta) \quad (8)$$

#### 4) Procédure de calcul

La quantité  $\cos z$  ayant déjà été calculée, le terme  $D_i$  de rayonnement diffus incliné ne présentant pas de difficultés, il nous reste à expliciter le terme en  $\cos i$ . Dans ce terme  $\cos \beta$  et  $\sin \beta$  sont des constantes. L'orientation  $\eta$  est donnée par l'utilisateur de la manière suivante : un versant orienté au Sud =  $0^\circ$ , un versant orienté au Nord =  $\pm 180^\circ$ , un versant orienté à l'Est est précédé d'un signe négatif, et positif à l'ouest. Par contre l'azimut du soleil change au cours de la journée il est obtenu par  $\alpha = \arcsin(\cos \delta \cdot \sin h / \cos z)$ . Le calcul de  $\cos i$  s'effectue dans la même boucle que  $\cos z$ , il faut soumettre  $\cos i$  au même test que  $\cos z$  et cumuler les valeurs quart d'heure par quart d'heure sur la journée. Le calcul de la relation (8) permet d'obtenir le rayonnement global incliné en un point du bassin versant.

#### 5) Le cache orographique et sa prise en compte

En montagne, les rayons du soleil ne touchent pas le sol au même moment et laissent parfois tard le matin et tôt le soir des versants entiers dans un éclairage diffus  $D_i$  ; il était donc nécessaire de rendre compte de cet état de fait de la manière la plus simple possible. On a posé en première approximation que la trajectoire du soleil est Est-Ouest donc que tout point d'un bassin voit son soleil se lever le matin à l'Est et se coucher plein Ouest, quelle que soit la saison. Posé en ces termes, un simple profil topographique Est-Ouest passant par le point considéré permet de résoudre le problème (fig. 2), on peut déterminer deux angles CLEV et CCOU qui permettent d'obtenir l'heure locale d'apparition et de disparition du rayonnement direct  $S_i$ . Dans le programme de calcul il suffit de tester les valeurs de la hauteur du soleil avec les angles CLEV et CCOU.

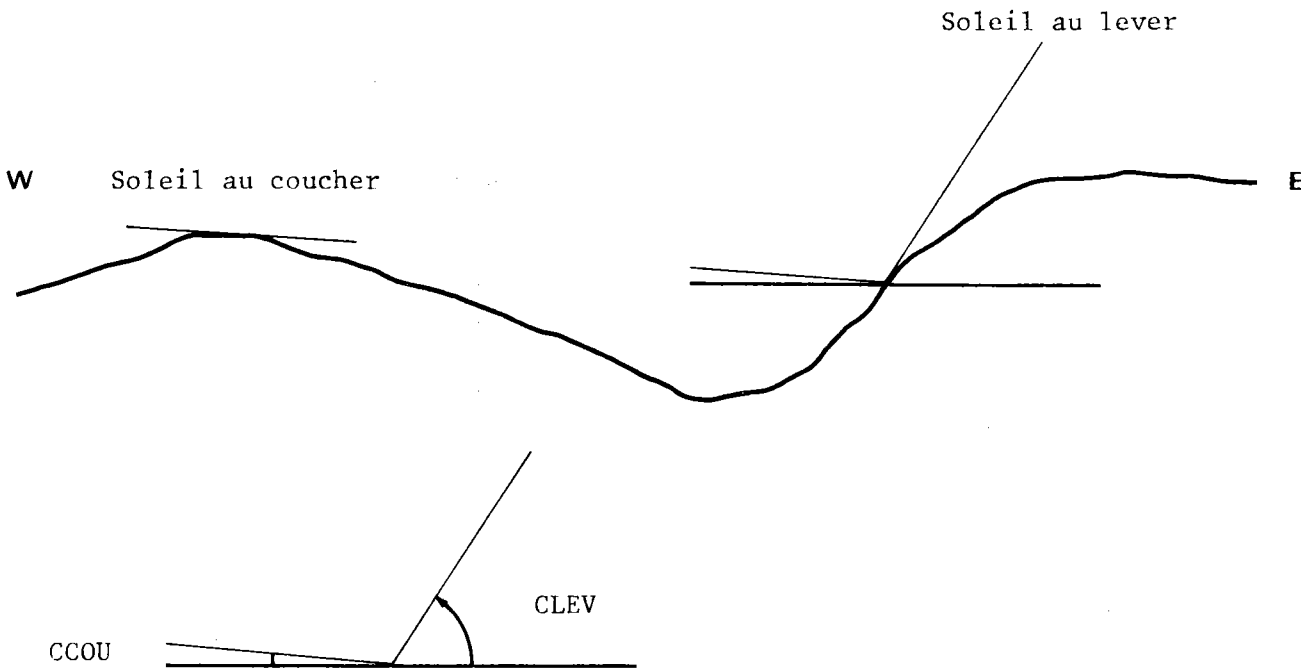


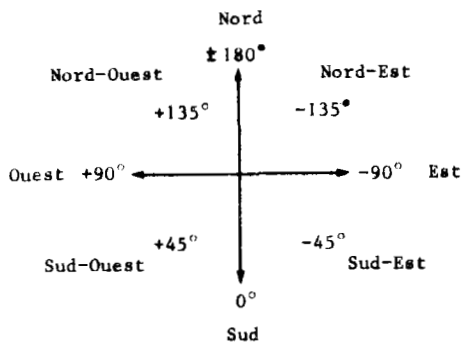
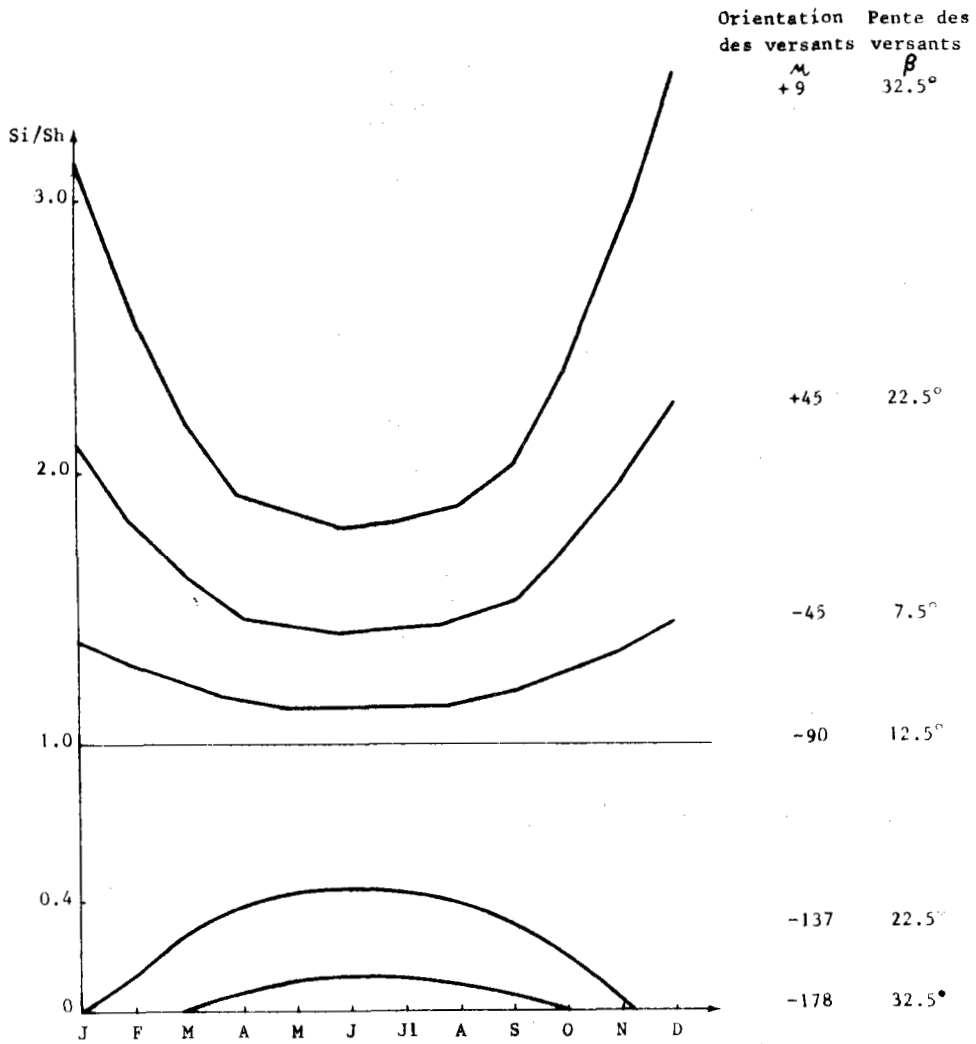
FIGURE 2 - Mesure des caches orographiques au lever et au coucher du soleil pour un point du bassin versant

La précision que l'on attribue au cache orographique est connue : en effet, le soleil se déplace de  $15^\circ$ /heure, le calcul est effectué tous les quarts d'heures donc le soleil se déplace de  $3075$  toutes les  $15$  mn lors de chaque boucle de calcul. Lors de l'introduction des caches orographiques, l'erreur maximale qui est faite sur la position respective des massifs montagneux et du soleil est de  $\pm 1.087$  lors de l'apparition et de la disparition des rayons directs sur un versant, en durée cette erreur est au maximum de  $7.30$  mn en début ou en fin de journée.

## II - RÉSULTATS

On a reporté sur la figure 3 l'évolution du rapport  $S_i/S_h$  au cours de l'année et pour six versants du haut bassin de la Petite Fecht, les pentes s'échelonnent de  $7.5^\circ$  à  $32.5^\circ$  et les orientations sont réparties sur les  $180^\circ$ . Pour les versants orientés dans le domaine Nord, le rapport entre le rayonnement direct incliné et direct horizontal est inférieur à 1, alors qu'il est supérieur à 1. pour tous les versants orientés vers le domaine Sud. C'est la classique opposition entre l'adret et l'ubac, un versant de  $12.5^\circ$  orienté plein Est reçoit toute l'année le même rayonnement direct que l'horizontale, un versant de  $32.5^\circ$  orienté au Sud-Sud-Ouest reçoit en hiver trois fois plus de rayonnement direct que l'horizontale alors qu'en été il n'en reçoit que deux fois plus. Un versant incliné à  $22.5^\circ$  et orienté au Sud-Ouest reçoit l'hiver deux fois plus de rayonnement direct que l'horizontale et l'été 1.5 fois plus seulement. Un versant de  $22.5^\circ$  orienté au Nord-Est reçoit en été 0.4 fois plus de

FIGURE 3 - Évolution annuelle du rapport (rayonnement direct incliné/rayonnement direct horizontal) pour 6 versants du bassin de la petite FFCHT



rayonnement direct qu'en hiver. Et un versant de  $32.5^\circ$  orienté au Nord reçoit en été 0.2 fois plus de rayonnement direct qu'en hiver

On a reporté (fig. 4) la **carte du rayonnement global incliné** dans le bassin du Ringelbach pour le 19 septembre 1980. Cette carte a été obtenue de la manière suivante :

1. Établissement d'une carte des pentes (HUMBERT et al. 1981),
2. Établissement d'une carte des orientations de versants,
3. La superposition des deux cartes précédentes nous a donné une carte dite des « facettes », une facette étant un pan de versant ayant même pente et même orientation.
4. Dessin de 14 profils topographiques Est-Ouest équidistants de 50 m.
5. 177 intersections sont reconnues entre les limites des facettes et les profils topographiques.
6. En chacune des 177 intersections mesure des angles CLEV et CCOU.
7. Calcul du rayonnement global incliné en 177 points (chaque point est caractérisé par 4 angles  $\beta$ ,  $\eta$ , CLEV, CCOU),
8. Cartographie en isolignes du rayonnement global incliné.

Alors que le rayonnement mesuré à l'horizontale était de  $1570 \text{ joules/cm}^2$ , le rayonnement global incliné s'échelonne de  $650$  à  $2020 \text{ joules/cm}^2$  suivant les pentes, l'orientation, et le cache orographique. Et pour l'ensemble du bassin ce jour-là les valeurs relatives sont les suivantes :

$$0,414 \leq \frac{G_i}{G_h} \leq 1,286$$

### III – DISCUSSION

Un point important mais mal connu et peu étudié car difficile est celui du rayonnement réémis par les versants voisins ; dans une vallée Est-Ouest, le versant orienté au Nord reçoit un rayonnement diffus, un rayonnement direct, plus un rayonnement en courte longueur d'onde réfléchi par le versant adret. On peut penser que celui-ci n'est pas négligeable surtout en sol nu. On peut donc tenter de mettre au point un terme correctif tenant compte de ces rayonnements. En pratique ceci est possible bien que long et fastidieux, mais le programme résultant perd toute généralité car les réflexions multiples des versants voisins sont toutes uniques. Par contre, on peut imaginer au pied du versant étudié une plaine infinie horizontale recevant un rayonnement global  $G_h$  et réémettant un rayonnement  $aG_h$  où  $a$  est l'albedo. Ce rayonnement est émis vers la totalité de la sphère, un versant de pente  $\beta$  en intercepte la quantité

$$0.5 a G_h (1 - \cos \beta) \quad (9)$$

qui, ajoutée à la relation (8) donne la relation la plus évoluée que nous possédions actuellement pour le rayonnement global incliné :

$$G_i = \{(G_h - D_h) \sum_{j=1}^{j=97} (\cos i / \cos z)\} + 0,5 D_h (1 + \cos \beta) - 0,5 a G_h (1 - \cos \beta) \quad (10)$$

#### 1) Précision apportée par le terme de correction

L'usage de la relation 8 ou 10 - donc que l'on tienne compte d'une partie des réflexions ou pas - découle de la relation 9. Pour un albedo de 0.20 et une falaise ( $\beta = 90^\circ$ ) ce terme de correction représente 10 % de  $G_h$  pour des versants moins inclinés cette relation a été calculée lors des rayonnements extrêmes mesurés en juillet et septembre 1980.

	$\beta$	7.5	12.5	22.5	32.5
22 juillet 1980 $G_h = 2923 \text{ J/cm}^2$		2.50	6.92	22.25	45.77
21 septembre 1980 $G_h = 706 \text{ J/cm}^2$		0.60	1.67	5.37	11.05
terme 9 en % de $G_h$		0.08	0.23	0.76	1.56

On peut donc considérer que sauf dans des milieux où l'albedo est excessivement élevé une partie de l'année, ce terme peut être négligé lors de calculs manuels, au contraire l'été il peut être inclus au rayonnement global incident.

*Exemple : pour deux versants types de  $10^\circ$  orientés Nord et plein Sud, le 15 septembre 1980, on a reporté sur le tableau 4 les divers rayonnements mesurés et calculés ;  $G_{i8}$  est le rayonnement global incliné calculé par la relation 8 et  $G_{i10}$  est le même rayonnement calculé par la relation 10.*

$\beta$	$\eta$	$G_o$	$G_h$	$S_h$	$D_h$	$S_i$	$G_{i8}$	$G_{i10}$	$\delta G/G_h$
$10^\circ$	$0^\circ$	2757	1877	1443	433	1974	2404	2407	28.23 %
$10^\circ$	$180^\circ$	2757	1877	1443	433	868	1298	1301	30.68 %

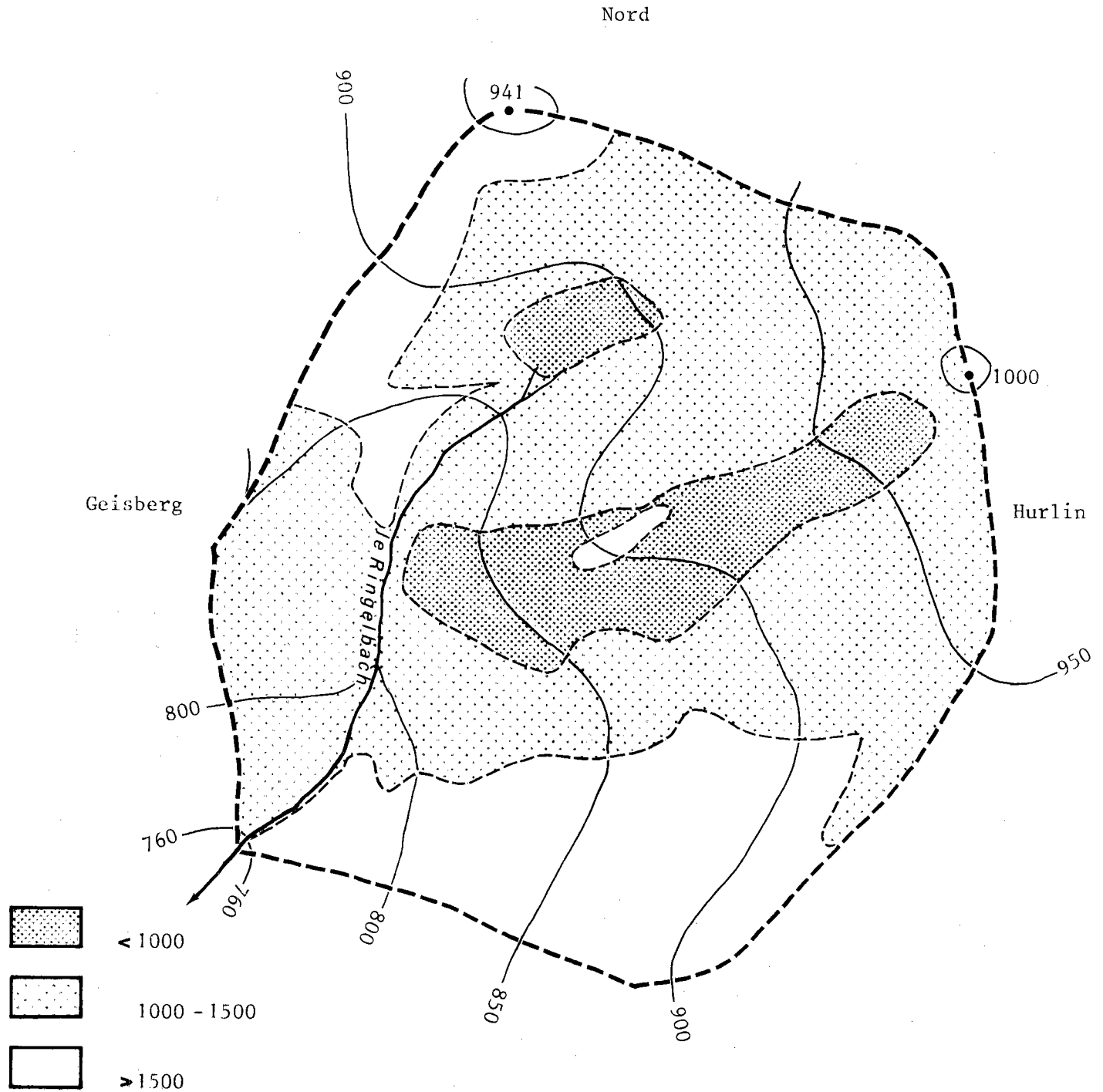
TABLEAU 4

*Dans ce tableau, on peut voir que les résultats produits par les relations 8 et 10 sont très voisins, un versant incliné à  $10^\circ$  et orienté au Sud reçoit un rayonnement global supérieur à l'horizontale de 28 % alors que, orienté au Nord un versant incliné de  $10^\circ$  reçoit 30 % de rayonnement en moins que l'horizontale.*

#### 2) Valeur des différents termes de la relation (10)

Cette relation est formée de trois termes, le premier qui varie au cours du temps, et qui a été tabulé tableau 5 pour la journée du 15 juin en fonction des classes de pentes et des classes d'orientations. Ce premier terme varie **considérablement**

FIGURE 4 - Carte du rayonnement global incliné dans le bassin du Ringelbach  
le 19 septembre 1980



Le rayonnement global horizontal = 1570 joules/cm<sup>2</sup>

Le rayonnement global incliné varie de 650 à 2020 joules /cm<sup>2</sup>



de - 0.048 pour les versants Nord à - 1.735 pour les versants Sud.

TABLEAU 5 : valeur de  $\sum \cos i / \cos z$  pour le 15 et le 16 juin 1980

JOUR : 15

MOIS : JUIN 1980

$G_o = 4353$

$G_h = 1696$

$\beta \setminus n$	- 22,5	- 67,5	- 112,5	- 157,5	157,5	112,5	67,5	22,5
2.5	1.07144	1.02903	0.96905	0.92664	0.92664	0.96905	1.02903	1.07144
7.5	1.20809	1.08118	0.90170	0.77479	0.77479	0.90170	1.08118	1.20809
12.5	1.33554	1.12510	0.82748	0.61704	0.61704	0.82748	1.12510	1.33554
17.5	1.45283	1.16045	0.74697	0.45459	0.45459	0.74697	1.16045	1.45283
22.5	1.55906	1.18698	0.66077	0.28869	0.28869	0.66077	1.18698	1.55906
27.5	1.65343	1.20447	0.56954	0.12059	0.12059	0.56954	1.20447	1.65343
32.5	1.73521	1.21279	0.47398	- 0.048288	-0.048288	0.47398	1.21279	1.73521

JOUR : 16

MOIS : JUIN 1980

$G_o = 4356$

$G_h = 1733$

$\beta \setminus n$	- 22,5	- 67,5	- 112,5	- 157,5	157,5	112,5	67,5	22,5
2.5	1.07138	1.02901	0.96908	0.92670	0.92670	0.96908	1.02901	1.07138
7.5	1.20791	1.08110	0.90177	0.77497	0.77497	0.90177	1.08110	1.20791
12.5	1.33524	1.12497	0.82761	0.61734	0.61734	0.82761	1.12497	1.33524
17.5	1.45242	1.16028	0.74714	0.45501	0.45501	0.74714	1.16028	1.45242
22.5	1.55853	1.18676	0.66099	0.28921	0.28921	0.66099	1.18676	1.55853
27.5	1.65279	1.20420	0.56981	0.12122	0.12122	0.56981	1.20420	1.65279
32.5	1.73447	1.21248	0.47429	- 0.047690	-0.047690	0.47429	1.21248	1.73447

Les deuxième et troisième termes ont été tabulés (tableau 6) pour les mêmes classes de pentes. L'utilisation de ces tableaux est la suivante :

Le 15 juin 1980, le rayonnement global horizontal mesuré est de 1696 joules/cm<sup>2</sup>. La relation (1) donne le rayonnement diffus de 949 joules/cm<sup>2</sup> et le rayonnement direct horizontal est de 747 joules pour un versant de 29° orienté au Nord-Nord-Est. Le rayonnement global incliné vaut :

$$(747 * 0.12059) + (949 * 0.943505) + (1696 * 0.012989) = 1007.50 \text{ Joules/cm}^2$$

soit une **atténuation du rayonnement horizontal de 40 % environ.**

TABLEAU 6 : valeur des termes correctifs en fonction des classes de pentes

$\beta$	2ème terme		3ème terme	
2.5	$D_h$	* 0.999524	$G_h$	* 0.0000951
7.5	$D_h$	* 0.995722	$G_h$	* 0.0008555
12.5	$D_h$	* 0.988148	$G_h$	* 0.002370
17.5	$D_h$	* 0.976858	$G_h$	* 0.004628
22.5	$D_h$	* 0.961939	$G_h$	* 0.0076120
27.5	$D_h$	* 0.943505	$G_h$	* 0.0112989
32.5	$D_h$	* 0.921695	$G_h$	* 0.0156608

#### IV -- VÉRIFICATION DU PROGRAMME

Vérifier les calculs de rayonnement global incliné n'est pas une chose simple qui pourrait se réduire à installer un solarimètre sur un versant et à effectuer des enregistrements ; en effet, il faut d'abord s'assurer que les mesures de rayonnement global horizontal dont on dispose sont correctes. D'autre part, il faut vérifier que le choix du pas d'intégration est bien adapté au problème.

##### 1) Estimation de l'erreur faite sur les mesures à l'horizontale

Deux sources d'erreurs sont possibles, l'une est liée à l'installation : le solarimètre n'est pas à l'horizontale mais faiblement incliné dans une direction, la seconde source d'erreur provient d'une dérive lente de l'appareil au cours du temps.

a) **Défaut d'inclinaison** : l'appareillage ayant été correctement installé à l'horizontale, on va admettre dans ce qui suit qu'il est néanmoins incliné de  $1^\circ$  et ceci successivement vers les quatre points cardinaux. On calculera pour les solstices et quelques jours particuliers les différents rayonnements et l'erreur relative maximale  $|\delta G/G_h|$ . Cette analyse de sensibilité a été faite à l'aide des relations 8 et 10.

Ex. : 22 juin 1980 - TABLEAU 7

$\beta$	$\eta$	$G_o$	$G_h$	$S_h$	$D_h$	$S_i$	$G_{i8}$	$G_{i10}$	$ \delta G/G_h $
$1^\circ$	$0^\circ$	4366	1575	641.8	933	661.8	1594	1594	1.20 %
$1^\circ$	$180^\circ$	4366	1575	641.8	933	621.7	1554	1554	1.33 %
$1^\circ$	$+90^\circ$	4366	1575	641.8	933	641.7	1574	1574	0.06 %
$1^\circ$	$-90^\circ$	4366	1575	641.8	933	641.7	1574	1574	0.06 %

Par cette journée maussade le rayonnement diffus l'emporte sur le direct ; pour un appareil orienté de  $1^\circ$  vers le Sud, on obtient une surestimation de 1.20 % et pour une orientation de  $1^\circ$  vers le Nord une sous-estimation de 1.33 %.

Ex. : 5 juin 1980 - TABLEAU 8

$\beta$	$\eta$	$G_o$	$G_h$	$S_h$	$D_h$	$S_i$	$G_{i8}$	$G_{i10}$	$ \delta G/G_h $
$1^\circ$	$0^\circ$	4286	2945	2286	658.7	2358	3017	3017	2.44 %
$1^\circ$	$180^\circ$	4286	2945	2286	658.7	2213	2871	2871	2.51 %
$1^\circ$	$+90^\circ$	4286	2945	2286	658.7	2285	2944	2844	0.03 %
$1^\circ$	$-90^\circ$	4286	2945	2286	658.7	2285	2944	2944	0.03 %

Le calcul a été refait à la même période (la déclinaison solaire est voisine) mais le rayonnement mesuré est plus puissant (2945 J/cm<sup>2</sup>)

Dans ce cas, l'erreur relative est une surestimation de 2.44 % pour l'appareil orienté de  $1^\circ$  vers le Sud et une sous-estimation de 2.51 % lorsqu'il est orienté de  $1^\circ$  vers le Nord. Dans ces deux exemples, l'orientation vers l'Est ou l'Ouest de  $1^\circ$  n'entraîne qu'une erreur négligeable.

Ex. : 10 décembre 1980 - TABLEAU 9

$\beta$	$\eta$	$G_o$	$G_h$	$S_h$	$D_h$	$S_i$	$G_{i8}$	$G_{i10}$	$ \delta G/G_h $
$1^\circ$	$0^\circ$	872	22	0.62	21.37	0.67	22.04	22.04	0.18 %
$1^\circ$	$180^\circ$	872	22	0.62	21.37	0.57	21.94	21.94	0.27 %
$1^\circ$	$+90^\circ$	872	22	0.62	21.37	0.62	21.99	21.99	0.04 %
$1^\circ$	$-90^\circ$	872	22	0.62	21.37	0.62	21.99	21.99	0.04 %

A proximité du solstice d'hiver, nous avons choisi la valeur la plus faible dont nous disposions (22 J/cm<sup>2</sup>)

Dans ce cas comme dans les précédents, l'erreur faite lorsque l'appareil est orienté de  $1^\circ$  vers le Nord est la plus grande.

Ex. : 19 mars 1980 - TABLEAU 10

$\beta$	$\eta$	$G_o$	$G_h$	$S_h$	$D_h$	$S_i$	$G_{i8}$	$G_{i10}$	$ \delta G/G_h $
$1^\circ$	$0^\circ$	2441	1239	710	528	740	1268	1268	2.34 %
$1^\circ$	$180^\circ$	2441	1239	710	528	680	1209	1209	2.42 %
$1^\circ$	$+90^\circ$	2441	1239	710	528	710	1238	1238	0.08 %
$1^\circ$	$-90^\circ$	2441	1239	710	528	710	1238	1238	0.08 %

Est une journée relativement claire dans une période maussade et enneigée à l'approche de l'équinoxe de printemps ; les résultats sont les suivants :

Pour l'appareil orienté au Nord, l'erreur est toujours la plus élevée, l'orientation vers l'Est ou vers l'Ouest est presque souhaitable si l'on n'est pas sûr de son installation. Faute de belles journées en 1980, nous n'avons pas pu illustrer le rôle de la déclinaison solaire dans la genèse des erreurs ; un calcul théorique montre cependant qu'un rayonnement global horizontal de 1900 J/cm<sup>2</sup> à cette époque de l'année entraîne une erreur relative de 3,5 % pour un appareil orienté au Nord.

Ex. : 15 septembre 1980 - TABLEAU 11

C'est la journée la plus claire à proximité de l'équinoxe. Les résultats sont les suivants :

$\beta$	$\eta$	$G_o$	$G_h$	$S_h$	$D_h$	$S_i$	$G_{i8}$	$G_{i10}$	$ \delta G/G_h $
$1^\circ$	$0^\circ$	2757	1877	1443	433	1499	1932	1932	2.93 %
$1^\circ$	$180^\circ$	2757	1877	1443	433	1387	1821	1821	2.98 %
$1^\circ$	$+90^\circ$	2757	1877	1443	433	1443	1876	1876	0.05 %
$1^\circ$	$-90^\circ$	2757	1877	1443	433	1443	1876	1876	0.05 %

FIGURE 5

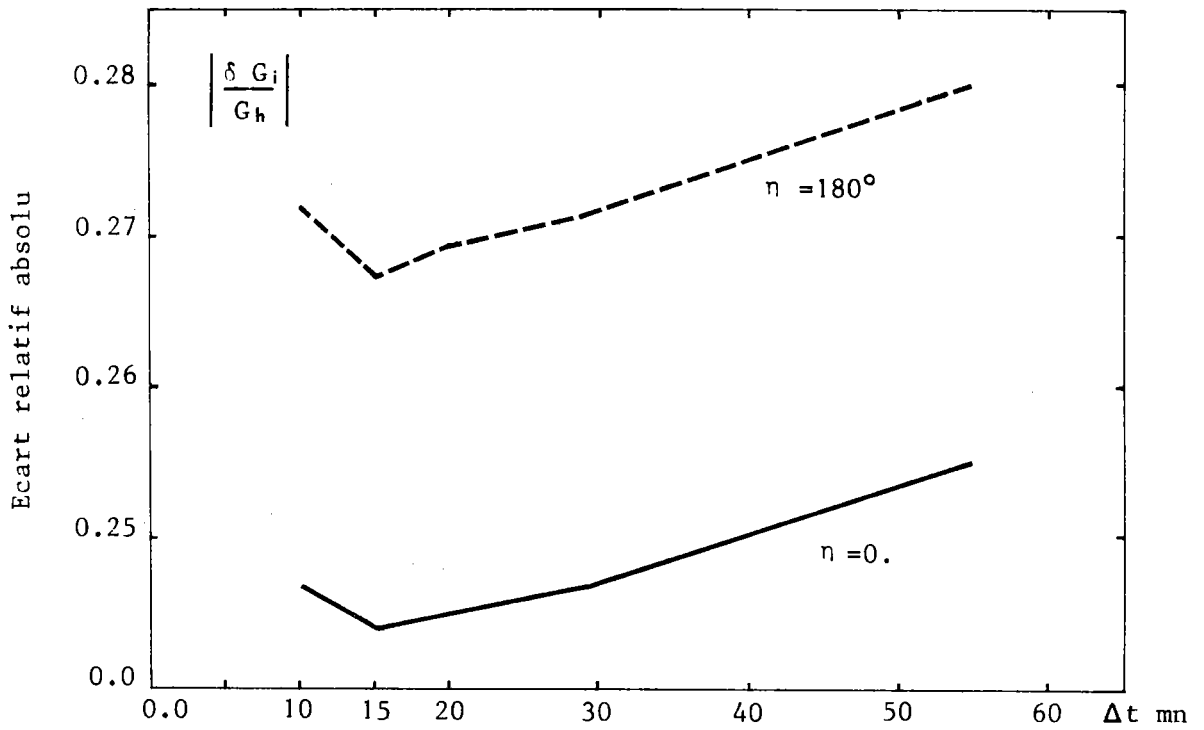
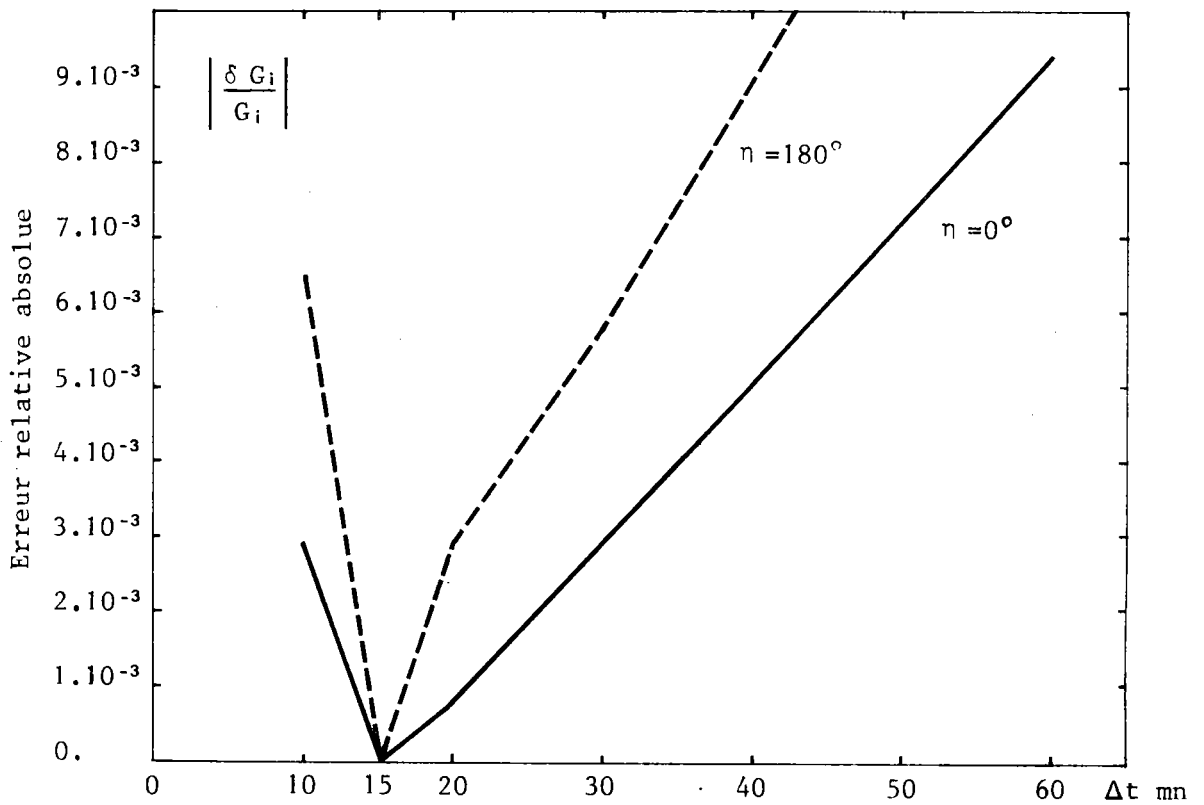


FIGURE 6



On obtient dans ce cas une erreur relative plus élevée que dans les cas précédents de près de 3 %. Un défaut d'installation de  $1^\circ$  est **négligeable** si les orientations sont vers l'**Est** ou l'**Ouest** par contre il ne l'est pas pour des orientations vers le Sud et vers le Nord. Les jours de ciel couvert les erreurs sont faibles. Les risques d'erreur sont les plus forts par temps clair à l'approche des équinoxes. En conclusion, ceci montre qu'une installation parfaitement horizontale est souhaitable surtout par temps clair, à la rigueur un écart de  $1^\circ$  vers l'Est ou l'Ouest est supportable ( $|\delta G / G_h| < 1\%$ ) **si ce n'est pas le cas on est obligé d'admettre une erreur de 5 à 6 % sur les mesures.**

**b) Défaut d'orientation de l'appareil :** si l'inclinaison de la pile a une importance comme nous venons de le voir, la sensibilité de l'ensemble des thermocouples est maximale lorsque le soleil est situé sur l'axe longitudinal de la pile et minimum sur l'axe transversal.

Perrin de Brichambaut (1974) donne la variation de sensibilité de la pile Kipp et Zonen en fonction de l'azimut du soleil, les chiffres varient de  $\pm 5\%$  pour des hauteurs du soleil de  $15^\circ$  et  $\pm 1\%$  à  $60^\circ$ .

Ces erreurs sont donc importantes en absolu si l'on travaille avec un pas de temps fin inférieur à l'heure, mais si la mesure est intégrée sur la journée l'erreur relative est plus faible.

Dans notre cas, le défaut d'orientation de l'appareil s'il existe a la même influence sur tous les points où le rayonnement global incliné est calculé, si les valeurs absolues ne sont pas correctes, les valeurs relatives de rayonnement entre deux points voisins le sont.

## 2) Choix du pas d'intégration

On a vu plus haut que le pas de temps choisi était de 15 mn mais ceci n'était pas le seul possible car pour intégrer le rayonnement sur une journée le pas pouvait varier de 1 à 1440 mn. On a reporté dans les tableaux 12 et 13 les valeurs calculées du rayonnement global incliné  $G_i$  et  $G_{i10}$  le 15 septembre 1980 pour deux versants inclinés de  $10^\circ$  et orientés au Nord et au Sud, on leur a attribué en outre des caches orographiques au lever et au coucher du soleil.

TABLEAU 12: valeur du rayonnement global incliné ( $\eta = 0^\circ$ ;  $\beta = 10^\circ$ ; CLEV =  $10^\circ$ ; CCOU =  $10^\circ$ )

	$\Delta t = 10 \text{ mn}$	$\Delta t = 15 \text{ mn}$	$\Delta t = 20 \text{ mn}$	$\Delta t = 30 \text{ mn}$	$\Delta t = 60 \text{ mn}$
$G_i 8$	2339	2332	2334	2339	2355
$G_i 10$	2342	2335	2337	2342	2357

Ce tableau illustre parfaitement le dilemme auquel est confronté le numéricien : d'une part choisir le pas de temps le plus grand possible afin d'avoir un programme rapide mais accepter de faire une erreur sur la fonction recherchée, ou au contraire, prendre le pas de temps le plus petit possible mais risquer de faire des erreurs d'arrondi. On porte Fig. 5 l'erreur relative absolue par rapport au rayonnement global horizontal  $|G_i / G_h|$  il apparaît nettement sur cette figure que **l'optimum est obtenu avec un pas de temps de 15 mn.**

Des résultats semblables sont obtenus avec le versant orienté au Nord ( $\eta = 180^\circ$ )

TABLEAU 13: valeur du rayonnement global incliné ( $\eta = 180^\circ$ ;  $\beta = 10^\circ$ ; CLEV =  $10^\circ$ ; CCOU =  $10^\circ$ )

	$\Delta t = 10 \text{ mn}$	$\Delta t = 15 \text{ mn}$	$\Delta t = 20 \text{ mn}$	$\Delta t = 30 \text{ mn}$	$\Delta t = 60 \text{ mn}$
$G_i 8$	1363	1371	1368	1364	1348
$G_i 10$	1366	1375	1371	1367	1351

Comme dans le cas précédent, **le résultat le plus vraisemblable** est obtenu avec un pas de temps de 15 mn. On a reporté (fig. 6) l'erreur relative absolue faite par rapport au pas de temps de 15 mn :  $|\delta G_i / G_i|$ , pour des rayonnements faibles l'erreur est plus grande que pour des rayonnements forts, si l'on choisit un autre pas de calcul que 15 mn on accepte de faire une erreur relative de quelques joules pour mille.

## CONCLUSION

Dans le but de cartographier l'évapotranspiration, on a tenté la spatialisation du rayonnement global sur des versants.

A partir de mesures de rayonnement global à l'horizontale, un programme de calcul nous permet d'obtenir le rayonnement global incliné sur des versants en fonction de leur orientation et de leur pente. Par rapport au rayonnement à l'horizontale, ce rayonnement diffère de  $\pm 30\%$ .

Si l'on ajoute le rôle des caches orographiques au lever et au coucher du soleil, on améliore ce rayonnement de 10 à 20 %.

Au cours de cette transformation, les sources d'erreurs ont les valeurs suivantes : 5 % dus au solarimètre lui-même;  $\pm 3\%$  dus à un défaut d'inclinaison du site de mesure si celui-ci est orienté vers le Nord ou vers le Sud ;  $\pm 0.10\%$  s'il est orienté vers l'Est ou vers l'Ouest.

## BIBLIOGRAPHIE

- AMBROISE B., MERCIER J.L., NAJJAR G.** (1981) : Méthode de cartographie de l'évapotranspiration potentielle en moyenne montagne : application au bassin versant du Ringelbach. *Recherches géographiques à Strasbourg* (à paraître)
- BECKINSALE R.P.** (1945) : The latitude of the zenithal sun ; a geographic approach to determinations of climatic significance. *Geogr. Rev.* 35, 596-600.
- BROCHET P., GERBIER N.** (1975) : L'évapotranspiration. Aspects agrométéorologiques - évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie n 65 de la Mét. Nat. 95 p.
- GARNIER B.J., OHMURA A.** (1968) : A method of calculating the direct shortwave radiation income of slopes. *J. of Applied Meteorology.* Vol. 7 n 5, 796-800.
- GATES D.M.** (1965) : *Energy exchange in the biosphere.* Harper and Row. London. 151 p.
- GEIGER R.** (1966) : *The climate near the ground.* Harvard University Press. 611 p
- GRANGER J.E., SCHULZE R.E.** (1977) : Incoming solar radiation patterns and vegetation response : examples from the natal Drakensberg. *Vegetatio*, 35, 1, 47-54.
- HAY J.E.** (1977) : Analyse de données sur le rayonnement solaire pour des sites sélectionnés au Canada. Ministère des approvisionnements et des services du Canada. Études climatologiques.n 32, 160 p.
- HUMBERT J., NAJJAR G., AMBROISE B., AMIET Y.** (1981) : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques des bassins versants de la petite Fecht et du Ringelbach - *Recherches géographiques à Strasbourg* (à paraître)
- KONDRATIEV K.Ya, MONOLOVA M.P.** (1961) : *Radiation balance of sloping surfaces.* Gidrometeorizdat Leningrad.
- KÖPPEN W., GEIGER R.** (1930) : Handbuch der Klimatologie. 1. Teil A Berlin, 176 p.
- LEE R.** (1964) : Potential insolation as a topoclimatic characteristic of drainage basins. *Bull. A.I.H.S.*, IX 1, 27-41
- MORRIS C.W., LAWRENCE J.H.** (1971) : The anisotropy of clear sky diffuse solar radiation. *Trans. A.S.H.R.A.E.*, 137-143.
- NAJJAR G.** (1980) : Essai de spatialisation de l'évapotranspiration potentielle dans le bassin versant du Ringelbach. *Recherches Géographiques à Strasbourg*, 13, 55 - 62.
- PASZYNSKI J.** (1972) : Études topoclimatiques du bilan thermique dans les montagnes moyennes. «*L'aménagement de la montagne*» Warszawa, 47-70.
- PERRIN DE BRICHAMBAUT Ch.** (1963) : *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels.* Gauthier-Villars, 300 p.
- PERRIN DE BRICHAMBAUT Ch., LAMBOLEY G.** (1974) : Le rayonnement solaire au sol et ses mesures. *Cahiers A.F.E.D.E.S.*, 1, 128 p.
- ROUSE W.R., WILSON R.G.** (1963) : Time and space variations in the radiant energy fluxes over sloping forested terrain and their influence on seasonal heat and water balances at a middle latitude sites. *Geografiska Annaler*, 51, A. 3, 160-175.
- SCHRAM K., THAMS J.C.** (1967) : Die kurzweilige Strahlung von Sonne und Himmel auf verschieden orientierte und geneigte Flächen. *Arch. für Met. Geo. und Biok. Serie B*, 15, 1-2, 99-125.
- SCHÜTTE K.** (1943) : Die Berechnung der Sonnenhöhen für beliebig geneigte Ebenen. *Ann. d'Hydr.*, 71, 325-328.