

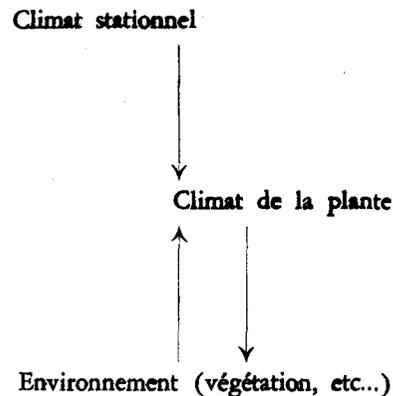
## *INCIDENCE DES FACTEURS MACROCLIMATIQUES SUR LES PRODUCTIONS VÉGÉTALES*

**O**N SAIT QUE LES FACTEURS CLIMATIQUES ONT UNE GRANDE INCIDENCE SUR LES PRODUCTIONS VÉGÉTALES. PLUS PRÉCISEMENT, C'EST « LE CLIMAT DE LA PLANTE » QUI agit, c'est-à-dire le microclimat réalisé au niveau des organes aériens et souterrains. Ce microclimat, qui détermine pour une grande part la croissance et le développement des végétaux, est une résultante :

- des conditions climatiques qui règnent au-dessus du couvert végétal,
- et de l'environnement, dont fait partie la végétation elle-même.

### **1) Préambule sur les indices climatiques concernant l'écologie végétale.**

Le microclimat est donc en corrélation avec le climat qui règne au-dessus du couvert ; d'autre part le microclimat est fort complexe et sa caractérisation présente diverses difficultés que nous n'exposons pas ici (instabilité des masses d'air à ce niveau, etc...). Dans ces conditions, pour généraliser à l'échelle géographique les résultats des études sur les rapports entre la végétation et le climat, on utilise les corrélations entre macroclimat et microclimat, on relie



C'est là le principe des indices climatiques, plus précisément de ceux qui concernent l'écologie végétale ; comment sont choisies les données macroclimatiques à utiliser ?

Elles sont choisies bien entendu en fonction de l'usage qu'on veut en faire, et elles remplissent trois sortes de conditions :

- existence de bonnes corrélations avec le phénomène étudié, corrélations qui résultent de leurs corrélations avec les facteurs microclimatiques, lesquels influent directement sur ce phénomène ;
- disponibilité de ces données ; elles doivent être connues pour de nombreuses stations avec une approximation convenable ;
- on a vu que ces données macroclimatiques doivent permettre des généralisations à l'échelle géographique, les mesures faites dans une station doivent donc être valables, avec une approximation convenable, pour des étendues de territoire relativement vastes ; effectivement, les données qu'on nomme « données météorologiques stationnelles » remplissent en principe cette condition, puisque les stations météorologiques sont établies avec le souci de réduire l'influence de l'environnement proche. En fait, les différentes données des stations se prêtent inégalement aux généralisations géographiques. Certaines d'entre elles : température de l'air assez loin du sol, précipitations, radiation globale, s'y prêtent plus aisément que d'autres, et si de plus on ne considère que leurs moyennes ou leurs sommes pour

des intervalles de temps assez longs, pour chaque mois par exemple, celles-ci se prêtent encore plus aisément à des généralisations géographiques que les valeurs des températures, précipitations, radiations, observées sur de courts intervalles de temps, heure par heure par exemple.

Ainsi on cherche, en établissant les indices climatiques, à faire émerger l'aspect géographique des phénomènes à certaines échelles.

## **2) L'indice climatique de potentialité agricole (Agr. 63) : généralités.**

L'indice qui va être présenté brièvement est un « indice climatique de potentialité agricole ».

Il se calcule en fonction de données macroclimatiques, il permet de relier à ces données les productions annuelles (par unité de surface de terrain) obtenues de nos jours en grande culture dans les meilleures conditions (fumure, choix des variétés...), principalement en ce qui concerne les plantes fourragères. A ces productions élevées, on donnera le nom de « potentialités contemporaines » ; on cherche à obtenir un indice qui soit proportionnel à leurs mesures.

Dans la plus grande partie de la France, l'indice proposé varie, en valeur annuelle, de 10 à 35 et dans le monde de 0 à 75.

Les « potentialités contemporaines », exprimées en tonnes de matière sèche par hectare et par an, sont de l'ordre de ces valeurs multipliées par 0,6.

En pratique nous avons été amenés, pour comparer entre elles des stations ou des époques de l'année, ou pour évaluer l'effet de l'irrigation, à utiliser aussi, à défaut de mieux, des masses récoltables très inférieures aux « potentialités contemporaines » ; on a alors opéré comme si les rapports entre les récoltes considérées n'étaient pas trop différents des rapports entre les « potentialités contemporaines » correspondantes ; dans ces cas, les rapports des récoltes aux indices sont, bien sûr, très inférieurs à 0,6.

L'indice permet de classer approximativement les climats stationnels selon leur productivité, ou du moins d'effectuer des interpolations entre des climats pour lesquels les mesures ont montré clairement que l'un est plus

favorable que l'autre. Cet indice est donc destiné d'abord à permettre des comparaisons entre régions, mais pour l'établir nous avons recours à des données concernant aussi des comparaisons entre années et entre saisons, bien que celles-ci posent en principe des problèmes différents.

On a vu qu'avant d'établir, puis d'utiliser, un tel indice, il faut préciser le mieux possible quelle grandeur on cherche à évaluer, et en fonction de quelles variables (répétons qu'il s'agit de régression et non de relation fonctionnelle).

Ici nous évaluons des masses de matière sèche en fonction de grandeurs macroclimatiques ; on a rappelé selon quels principes sont choisies ces grandeurs macroclimatiques ; on verra que celles qui sont utilisées sont des valeurs mensuelles des grandeurs suivantes (« valeurs mensuelles », c'est-à-dire que, pour chaque grandeur, on utilise une somme ou une moyenne pour chaque mois) : durée astronomique du jour, radiation globale, température, moyenne des minima quotidiens de température, précipitation, évapotranspiration potentielle.

Quant aux masses des récoltes, on sait à quel point elles dépendent de multiples facteurs en plus des facteurs climatiques ; c'est pourtant ceux-ci qui doivent apparaître au premier rang si on veut obtenir un classement des possibilités de production du point de vue géographique. On sait qu'à l'échelle du globe il y a de vastes domaines improductifs, d'autres qui sont très productifs, et que ces domaines sont déterminés par le climat ; mais si l'on veut envisager ceci plus en détail, subdiviser les domaines productifs, on rencontre des difficultés : à l'intérieur des domaines productifs, la masse des récoltes varie souvent plus d'un champ au champ voisin que d'une région à une autre très différente. Les cultures fourragères, du moins certaines d'entre elles, conviennent mieux que d'autres cultures pour caractériser globalement les possibilités d'un climat, ne serait-ce que parce qu'elles occupent le sol toute l'année et que la récolte porte sur une fraction relativement élevée, et par là semble-t-il relativement constante, de la matière végétale qui a été accumulée jour par jour au cours de la période de végétation (avant tout : la masse produite par la photosynthèse diminuée de la masse perdue par la respiration des plantes qui effectuent cette photosynthèse). C'est donc ces cultures que nous avons surtout envisagées, sans pour autant écarter les renseignements qui pourraient être fournis par d'autres, et même par des végétations naturelles ; il faut préciser que nous considérons non pas les masses normalement récoltées, mais la matière sèche récoltable totale qui, pour cer-

taines cultures, est très supérieure aux récoltes, ainsi, pour une céréale, on ajoutera grain + balle + paille, pour des pommes de terre tubercules + fanes, etc... (les racines non tuberculeuses et les chaumes sont exclus).

Enfin les récoltes que nous envisageons sont obtenues dans les meilleures conditions de fumure et de lutte contre les ennemis des cultures ; ceci élimine encore des aléas et améliore la corrélation entre récolte et conditions macroclimatiques. On conçoit que, même ainsi, la récolte annuelle caractéristique de chaque station reste bien mal définie ; cela résulte de la complexité des facteurs qui déterminent l'intensité de la photosynthèse, puis les pertes ultérieures, puisqu'à la respiration s'ajoutent les pertes de feuilles fanées, etc... ; on connaît en culture fourragère l'influence des fréquences de coupe et des hauteurs de coupe sur la récolte totale. Néanmoins les conditions qui viennent d'être énoncées permettent de définir approximativement une production susceptible de caractériser chaque station considérée et de servir de donnée initiale pour l'établissement de l'indice.

Il faut souligner que l'indice proposé ne peut chercher à atteindre une validité séculaire, mais seulement une validité contemporaine car le classement des stations selon leurs climats évolue avec les techniques. En effet, on a rappelé il y a un instant que les conditions microclimatiques qui agissent sur la végétation dépendent de cette végétation elle-même et, bien sûr, les résultats de cette action, la production, dépendent aussi de cette végétation. Dans ces conditions, l'indice climatique présenté concerne l'agriculture contemporaine, et on peut penser qu'il faudrait le corriger, le réajuster à la suite de nouveaux progrès de l'agriculture (conduite des cultures, variétés utilisées, etc...) ; ainsi, la sélection de nouvelles variétés adaptées à certains climats pourrait modifier le classement des climats, en ce qui concerne leur productivité ; on peut imaginer que des climats très ensoleillés permettent, dans quelques décennies, de produire plus que d'autres climats qui présentent les surclassent même en culture irriguée.

### 3) Rappel des difficultés fondamentales du problème.

On a exclu a priori l'emploi de paramètres prenant des valeurs différentes selon les végétaux considérés, puisque pour chaque station on considère en principe la plante la plus productive en grande culture. En fait, cette règle

n'est pas bien définie, et si on parvenait à rassembler suffisamment de données pour la préciser, il apparaîtrait peut-être des contradictions non négligeables (surtout par l'effet des variations des conditions météorologiques au cours de la période végétative). Il semble qu'on soit près de la limite du domaine où un indice climatique puisse être défini, mais la recherche d'un tel indice est justifiée par son intérêt économique, pour l'exécution d'interpolations dans des études géographiques. D'autre part, si cet indice global ne se montre pas convenable pour classer des stations à l'égard de certaines cultures, on pourra essayer d'ajuster des indices particuliers construits sur le même modèle (en introduisant éventuellement des effets qui n'ont pas été pris en compte ici).

#### 4) En résumé de ce qui précède.

L'indice climatique de potentialité agricole proposé est une formule destinée à évaluer, en fonction de conditions climatiques, les rendements culturaux obtenus à l'époque présente en grande culture intensive, dans les principales régions agricoles du globe.

Il s'agit, par des calculs aussi simples que possible, de classer différentes régions en fonction de leurs données macroclimatiques, ce classement étant valable dans les conditions de l'agriculture intensive contemporaine, et susceptible donc d'être modifié par les progrès à venir (introduction de nouvelles variétés, etc...).

Pour chaque région, on prend en compte les masses récoltables obtenues par les techniques modernes avec les variétés les plus productives dans cette région ; ce sont les cultures fourragères qui donnent en général les résultats les mieux utilisables pour établir un tel indice, en permettant de comparer entre elles diverses régions, et dans une même région diverses époques de l'année.

L'indice ne cherche donc pas à indiquer ce qu'on pourrait obtenir, ce que les progrès de la science et de la technique doivent permettre d'obtenir à l'avenir, mais ce qu'obtiennent de nos jours les agriculteurs les mieux classés. Il permet de faire des interpolations dans les études géographiques.

### 5) Exécution des calculs.

Le calcul est effectué mois par mois, il fait intervenir uniquement des valeurs mensuelles.

Pour des intervalles de plusieurs mois, on prend la somme des valeurs calculées mois par mois (on pourrait envisager de combiner les résultats obtenus mois par mois de façon plus complexe que par une simple addition, mais c'est cette solution, la plus simple, que nous utilisons).

Pour chaque mois, ce calcul est conduit comme suit :

indice climatique de  
potentialité agricole = indice héliothermique • facteur sécheresse

A = HT • Fs  
(ou Agr. 63)

avec  
indice héliothermique = facteur thermique • facteur solaire  
HT = Ft • Fh

La valeur de l'indice héliothermique est celle que prend l'indice climatique lorsque les conditions d'alimentation en eau sont considérées comme satisfaisantes (1) (soit naturellement, soit grâce à l'irrigation) ; en ce cas le facteur sécheresse est égal à 1, sa valeur maximale (absence de sécheresse).

Le facteur thermique est :

$$F_t = \frac{t(60 - t)}{1000} \cdot \frac{m - 1}{4}$$

t est la température moyenne (en degré C) de l'air sous abri ; m la moyenne des minima quotidiens lorsque celle-ci est située entre 1 et 5° C, sinon m est

bloqué à 5 (alors  $\frac{m - 1}{4} = 1$ ) ou à 1 (alors  $F_t = 0$ , l'indice aussi) ;

(1) Ce calcul est conduit comme si les conditions d'alimentation en eau étaient, sur le plan climatique, parfaitement satisfaisantes, lorsque les méthodes de calcul que nous utilisons ici pour évaluer les besoins en eau d'irrigation indiquent des besoins nuls ou entièrement couverts par l'irrigation.

$\frac{m - 1}{4}$  est en corrélation positive avec la fréquence des gelées.

$\frac{t(60 - t)}{1.000}$  est maximum pour  $t = 30^\circ \text{C}$ , ce maximum est très aplati.

Le facteur solaire est égal à la plus petite des deux fonctions suivantes si celle-ci est positive, sinon le facteur solaire est nul ; avec les unités et les symboles que nous utilisons jusqu'ici, ces fonctions s'écrivent :

$$H - 5 - \left( \frac{\lambda}{40} \right)^2 \quad \text{ou encore} \quad H - 2 - \left( \frac{\lambda}{40} \right)^2 - 3$$

$$3 \frac{I_g - 100}{100} \quad \text{ou encore} \quad \frac{3 I_g}{100} - 3$$

H désigne la durée astronomique du jour,  $\lambda$  la latitude,  $I_g$  la radiation globale.

On verra que ce mode de calcul du « facteur solaire » peut être interprété comme traduisant de façon assez lointaine et très schématique :

- des effets de saturation,
- le bilan : photosynthèse moins respiration.

Le facteur sécheresse enfin est calculé en fonction de l'évapotranspiration potentielle et du besoin en eau d'irrigation,  $B_i$ , ce dernier étant lui-même évalué en confrontant mois par mois, selon certaines règles de calcul, évapotranspiration potentielle (évaluée par la formule « f 60 ») et précipitation (1). Pour chaque mois, le facteur sécheresse a une valeur nulle au minimum, et au maximum égale à 1 ; en cas de sécheresse très sévère, le calcul effectué pour obtenir le « facteur sécheresse » conduit à des valeurs

(1) La grandeur  $B_i$  utilisée dans le calcul de  $F_s$  n'est pas calculée pour évaluer l'eau qui manque à la végétation effectivement présente ;  $B_i$  est le besoin en eau d'irrigation calculé pour une culture intensive et convenablement irriguée, c'est donc ici un besoin plus ou moins fictif (pour son calcul, voir ZAHEDI, 1966).

négatives qui sont reportées sur les mois suivants, avec certaines limitations ;  
voici comment on calcule  $F_s$  et le report :

1° Calculons  $X$  :

$$X = \text{le plus petit de } \begin{cases} ETp \\ 0,3 ETp + 50 \end{cases}$$

( $ETp$  = évapotranspiration potentielle ; pour l'évaluation de  $ETp$ , ainsi qu'au sujet de celle de  $I_g$ , voir TURC, 1961) ;

2° Considérons  $\frac{X - Bi}{X} + \text{rep}$

$Bi$  = besoins en eau d'irrigation ;

$\text{rep}$  = report du mois précédent ; on a  
toujours :  $0 \geq \text{rep} \geq -1$ .

a) Si cette expression est  $\geq 0$  on prend :

$$F_s = \frac{X - Bi}{X} + \text{rep}$$

et le report sur le mois suivant  
est nul ;

b) si l'expression est  $< 0$  on prend :

$$F_s = 0 \text{ (on a donc toujours : } 1 \geq F_s \geq 0)$$

et le report sur le mois suivant est

$$\frac{X - Bi}{X} + \text{rep si cette expression}$$

est  $\geq -1$ , sinon le report est  $-1$ .

Tel est le calcul de l'indice, à quelques détails près qui intéressent des cas particuliers.

On voit que les précipitations n'interviennent dans le calcul que par  $Bi$  (besoins en eau d'irrigation) ; le modèle constitué par l'indice ne prend en compte que les effets néfastes de la sécheresse, mais non pas ceux des précipitations ou des excès d'eau. Après cette remarque, passons à d'autres aspects de ce modèle :

## 6) Etablissement et examen de l'indice.

Voyons maintenant comment ces calculs ont été mis au point :

Les indices climatiques les plus simples sont des indices annuels, par exemple la précipitation annuelle, ou encore la température moyenne annuelle ; d'autres indices annuels sont des combinaisons de ces deux valeurs, etc... On a estimé que, pour résoudre le problème posé ici, il est possible de faire mieux par des calculs exécutés mois par mois (importance de la durée de la période favorable).

Pour établir ces calculs mois par mois, on considère un fait bien connu : sur les terres du globe, les grands domaines impropres à l'agriculture sont :

- ceux qui sont trop froids,
- ceux qui sont trop secs.

Envisageons donc de calculer d'abord un indice valable en absence de sécheresse (il va être dans les premiers essais fonction de la seule température), puis un facteur sécheresse, égal à 1 en absence de sécheresse et d'autant plus inférieur à 1 que la sécheresse est plus sévère, par lequel on multipliera l'indice précédent pour obtenir l'indice final (TURC, 1961 : « Application 2 »).

On peut rattacher à ce type des indices simples établis et utilisés par GAUSSEN, AUBREVILLE, PÉGUY, EUVERTE...

En absence de sécheresse, le plus simple est de compter comme mois utile chaque mois dont la température moyenne est supérieure à un certain seuil, 10° C par exemple, ou 6° C. Par exemple on décide que l'indice vaut 1 si t est supérieur à 10° C, 0 si t est inférieur à 10.

Puis le facteur sécheresse peut être pris égal à 1 ou 0 selon que  $\frac{P}{t}$

du mois est supérieur ou inférieur à une valeur fixée.  $(\frac{P \text{ mm}}{t \text{ °C}} = 2, \text{ par}$

exemple, est un seuil souvent utilisé par GAUSSEN). Pour des climats inter-tropicaux relativement homogènes quant à la température, AUBREVILLE introduit deux seuils de précipitations, distinguant donc non pas des mois secs et des mois humides, mais des mois très secs, des mois sans sécheresse, et des mois de caractère intermédiaire.

On pourrait envisager de faire ainsi le décompte des mois convenables pour l'agriculture :

- non convenable (indice du mois égal à 0) si  $t$  est inférieur à  $7^{\circ}$  (trop froid) ou si  $P$  mm est inférieur à  $t^{\circ}\text{C}$  (trop sec) ;
- convenable (indice du mois égal à 1) si les deux conditions suivantes sont remplies simultanément :  $t$  supérieur à  $12^{\circ}\text{C}$ ,  $P$  mm supérieur à  $5 \cdot t^{\circ}\text{C}$  ;
- intermédiaire dans les autres cas, avec un indice égal à :

$$\frac{t - 7}{5} \cdot \frac{P - t}{4t}, \text{ chacun des deux facteurs } \frac{t - 7}{5} \text{ et } \frac{P - t}{4t}$$

étant écarté à la valeur 1.

(Ce n'est qu'un exemple de ce qu'on peut essayer.)

Des indices si simples permettraient d'obtenir une première approximation satisfaisante en tant que telle ; ils permettraient de distinguer sur le globe les grands domaines propres à l'agriculture, mais leur manque de précision serait tel que, dans bien des régions, ils ne nous montreraient rien que nous ne sachions déjà. Nous nous sommes donc efforcés de mettre au point un indice du même type, mais plus précis, donc plus complexe. Les informations disponibles pour établir la régression :

$$\text{masse récoltable} = f(\text{facteurs climatiques})$$

sont bien peu précises ; néanmoins, au cours d'essais successifs, elles paraissent s'être montrées suffisamment contraignantes pour nous amener à introduire dans l'indice, pour le terme indépendant de la sécheresse, des variables supplémentaires : il a fallu conserver la température, mais une seule variable supplémentaire a paru insuffisante, et nous en avons utilisé deux : la durée astronomique du jour et la radiation globale. D'autre part la formule, mise au point par approximations successives, semble bénéficier de confirmations a posteriori par des considérations théoriques (extrêmement simplifiées) ; bien que très empirique à certains égards, cette formule constitue un modèle mathématique (très schématique) de l'accumulation de matière récoltable.

Voyons donc succinctement comment l'indice traduit l'« incidence de facteurs climatiques sur la production végétale » :

On voit d'abord que l'indice est calculé mois par mois, et que l'indice annuel n'est que la somme des indices mensuels. Dans le calcul concernant chaque mois, seul le facteur sécheresse tient compte de ce qui s'est passé les

mois précédents (réserves d'eau du sol, d'ailleurs fictives, et « report » qui traduit la destruction de la végétation par les sécheresses les plus sévères) ; l'indice héliothermique d'un mois donné ne dépend que de grandeurs météorologiques de ce mois, on ne tient nullement compte du stade de développement ni de la masse des végétaux en place, bien que l'intensité de la photosynthèse et celle de la respiration dépendent beaucoup de ces données.

Passons maintenant aux différents facteurs dont le produit donne l'indice.

Le facteur thermique est maximum pour  $t = 30^{\circ} \text{C}$  (peut-être serait-il préférable de placer le maximum à  $25^{\circ} \text{C}$ ), mais en fait il varie peu dans un large intervalle de température :

— pour  $t = 10$ , il vaut généralement 0,5 car la moyenne des minima

est alors souvent supérieure à 5, ce qui donne  $\frac{m - 1}{4} = 1$  ; il

atteint 0,675 pour  $t = 15$ , puis varie bien plus lentement : 0,80 à  $20^{\circ} \text{C}$ , 0,90 à  $30^{\circ} \text{C}$ , 0,80 à  $40^{\circ} \text{C}$ .

Par contre, en dessous de 10, il tombe rapidement à 0 (vers  $t = 5^{\circ} \text{C}$ ), à cause du terme en  $m$ , corrélatif de la fréquence des gelées : ainsi en France,

lorsque la moyenne des minima vaut  $1^{\circ} \text{C}$  (d'où  $\frac{m - 1}{4} = 0$ ), on a dix à

quinze jours « de gelée » dans le mois, lorsque la moyenne des minima vaut

$5^{\circ} \text{C}$  (d'où  $\frac{m - 1}{4} = 1$ ), il y a moins de trois jours « de gelée » dans le

mois.

*Remarque :* On donne ici à l'expression « jour de gelée » le sens des météorologistes, c'est donc un nyctémère pour lequel le minimum de la température de l'air sous abri est égal ou inférieur à  $0^{\circ} \text{C}$  ; la fréquence des « jours de gelée » est en corrélation positive avec celle du gel des végétaux, lequel dépend de bien d'autres facteurs.

Les comparaisons entre productions des régions équatoriales, tropicales, nordiques, entre productions de saison à jours longs et de saison à jours courts (ceci surtout dans le domaine méditerranéen), ont conduit à introduire, en plus d'un facteur thermique, le facteur solaire que nous calculons en fonction de  $H$  et de  $I_g$ .

Ce facteur apparaît comme une fonction de deux variables dont tantôt l'une, tantôt l'autre, joue le rôle de facteur limitant : H et  $I_g$  ; on emploie

souvent dans ce cas des formules de type  $\frac{x y}{(x^n + y^n)^{\frac{1}{n}}}$  ou de types voi-

sins ; ici le calcul est simplifié, on se contente de prendre la plus petite des deux expressions  $x$  et  $y$  (cela correspond, dans la formule précédente, au cas où  $n$  devient infiniment grand) ; de cette façon, si le jour est suffisamment long, c'est la radiation globale qui limite la production (1), au contraire, si la radiation globale est élevée, c'est, d'après l'indice, la durée du jour qui intervient, on fait le calcul comme si une radiation encore plus élevée n'apportait rien de plus ; dans ce bref exposé ceci ne sera pas examiné plus longuement.

En écrivant plus haut les formules qui servent à calculer le facteur solaire, on a mis en évidence un terme — 3 :

$I_g - 100$   
c'est la valeur que prend 3  $\frac{I_g - 100}{100}$  pour  $I_g = 0$  ; ce terme indique que

la production s'annule avant la radiation globale ; c'est surtout l'effet des pertes dues à la respiration qui apparaît ici, sous une forme très sommaire ; en fait, la respiration dépend de bien des facteurs que nous n'explicitons pas ; citons entre autres la masse végétale en place et les températures nocturnes, mais nous ne faisons guère apparaître ces températures car leurs effets semblent fort complexes : trop élevées, elles accroîtraient les pertes, trop faibles, elles freineraient la migration des produits de la photosynthèse du jour précédent, et par là compromettraient celle du jour suivant, etc... ; rappelons encore que si les températures nocturnes sont encore plus faibles, la végétation souffre des gelées, c'est là seulement que les températures nocturnes apparaissent dans l'indice proposé (par le canal du terme en  $m$ ).

Facteur sécheresse : l'évaluation de ce facteur est une application de la formule que nous utilisons pour l'évaluation de ETp et du mode de calcul

(1) Rappelons seulement qu'en moyenne l'énergie des radiations actives dans la photosynthèse constitue approximativement sous nos latitudes 40 % de celle de la radiation globale ; mais la composition spectrale de la radiation globale n'est pas la même selon les régions du globe et selon les heures et les mois : elle varie en particulier avec la hauteur du soleil ; on observe corrélativement des variations dans la répartition entre radiation directe et radiation diffuse ; peut-être y aura-t-il lieu ultérieurement d'introduire ces effets dans le calcul de l'indice.

qui permet d'évaluer des besoins d'irrigation en fonction de P et de ETP ; nous admettons que la végétation ne souffre pas de sécheresse lorsque nous calculons un besoin d'irrigation nul (cf. plus haut : « 4. Exécution des calculs », note infrapaginale) :  $F_s = 1$  (sauf intervention d'un « report ») ; pour une certaine valeur du besoin ( $B_i = X$ , en absence de report),  $F_s = 0$ , la sécheresse est suffisamment sévère pour que le mois soit improductif.

Entre ces deux cas, on effectue une interpolation linéaire ; c'est en effet le mode d'interpolation le plus simple, mais des travaux de ROBELIN ont montré que c'est, de plus, une bonne approximation de la réalité.

Il a fallu encore établir une évaluation pour le terme X, enfin on a introduit un arrière-effet des sécheresses les plus sévères sur les mois suivants.

Notons que les seuils de précipitations mensuelles d'AUBREVILLE : 30 mm et 100 mm, s'accordent convenablement avec la façon dont nous calculons  $F_s$ .

Pour clore ces quelques considérations théoriques, il faut insister sur les écarts entre l'indice et la réalité, en ce qui concerne les interactions. Ainsi l'indice héliothermique, HT, est le produit de deux facteurs, et chacune des variables utilisées intervient dans un seul de ces facteurs : cette forme a été choisie pour sa simplicité, mais elle conduit à négliger ou à fausser des interactions ; par exemple : pour des conditions données d'ensoleillement, l'indice

est calculé comme si le rapport :  $\frac{\text{pertes par respiration}}{\text{production}}$  était indépendant de

la température ; autre exemple : considérons deux systèmes qui ne diffèrent que par l'ensoleillement (mêmes températures et alimentation en eau optimale dans les deux cas), le rapport des indices sera égal au rapport des valeurs de  $F_h$  (« facteur solaire »), donc indépendant de la température.

## 7) Confrontation avec des données expérimentales.

Voici maintenant les données expérimentales que traduit l'indice, confrontées avec les valeurs de l'indice :

Les masses récoltables qui peuvent être obtenues dans les meilleures conditions de grande culture irriguée semblent être de l'ordre de 20 t M.S./ha an

dans le Bassin Parisien (on verra plus loin que pour des luzernes non irriguées on a obtenu des récoltes donnant un rapport  $\frac{\text{récolte}}{\text{indice}} = 0,66$  près de Versailles.

Prenons 45 t pour des régions équatoriales humides (BERNARD indique 60 à 100 t par an dont près de la moitié pour les racines à Yangambi — Congo — d'après des essais sur maïs).

C'est surtout le rapport approximatif entre ces nombres qui nous importe. A cet égard, on pourrait aussi se référer aux évaluations données par WOODWELL pour les tiges d'arbres : 5 t/ha . an en Europe, 13 t dans l'archipel malais, soit un rapport de 2,6 ; les indices correspondants ont des rapports situés entre 2,2 et 3,7 (« A » vaut de 20 à 30 pour les forêts d'Europe et 65 à 75 pour la Malaisie).

On voit qu'entre les 20 t envisagées pour le Bassin Parisien (avec irrigation) et les 45 des régions équatoriales, le rapport serait celui de 1 à 2,25 ; les indices étant respectivement 33 et 73, cela donne un rapport de  $73/33 = 2,2$ , voisin de ce qui vient d'être indiqué d'après les récoltes ; les rapports récolte/indice seraient ici de  $45/73 = 0,62$  et  $20/33 = 0,61$ .

Pour le Sud de la Suède, on indique des récoltes de 10 t M.S./ha pour le maïs, ce qui, avec un indice de 20, donne un rapport récolte/indice égal à 0,50 ; on atteint 14 t dans les régions les plus favorables, avec un rapport récolte/indice de l'ordre de 0,65.

En allant encore plus au Nord, on constate que des récoltes très appréciables peuvent être obtenues près du cercle polaire, grâce aux longs jours d'été, et au fait que la sécheresse est absente ou faible ; ainsi, des statistiques anciennes indiquent, pour le Norrbotten, district le plus septentrional de la Suède, une production de pommes de terre par hectare cultivé voisine de la moyenne du pays, et pour les céréales des récoltes inférieures de 20 à 25 % à la moyenne. Si on retient ces rapports, on va de 0,75 à 1, or si on compare l'indice de Haparanda, près du golfe de Botnie, et l'indice d'Uppsala, pres-

que à la latitude de Stockholm, on constate que leur rapport vaut  $\frac{14,2}{17,7} = 0,80$ .

Nous venons d'aller de l'équateur au cercle polaire, en considérant les productions annuelles, et alors que la sécheresse est absente ou peu marquée ; il apparaît que dans ces conditions les rapports entre les valeurs de l'indice donnent des évaluations plausibles pour les rapports entre les productions.

Un mot maintenant, en absence de sécheresse ou en culture irriguée, de la variation de la production au cours de l'année (les comparaisons sont ici encore moins précises que pour les valeurs annuelles, car chaque sorte de plante a son rythme de croissance spécifique lié aux conditions climatiques) : on sait que dans le Bassin Parisien la croissance végétale démarre au début du printemps ; les courbes de croissance de certaines cultures montrent un départ rapide en avril ; or ceci est traduit par les indices mensuels, voici comme exemple ceux de Versailles :

<i>Février</i>	<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>
0	0,5	2,7	5,3

(pour un total annuel de 33 avec irrigation et de 20 sans irrigation).

Au sujet du démarrage de la croissance en avril, dans le Bassin Parisien, citons un travail de GESLIN et SERVY portant sur un blé d'hiver, à Versailles : le rapport de la croissance de mai à celles de mars et avril a été de 2,9 , avec une faible part pour mars, le rapport des indices que nous calculons d'après les données météorologiques de l'année concernée (1932) est de 3. Pour le colza d'hiver, par contre, l'indice sous-estime les possibilités d'avril, mois pendant lequel cette plante a une croissance particulièrement rapide : d'après des expériences dues à E. RADET, en Champagne, G. LEFEVRE et P. LEFEVRE, près d'Amiens, Mlle J. GAROLA dans la Beauce, etc., les rap-

ports :  $\frac{\text{accroissement de M.S. (t/ha)}}{\text{indice}}$  vont de 1 à 1,8 pour avril alors que

pour les autres mois ils vont de 0,6 à 1, ce qui est déjà élevé.

Si dans la plus grande partie de la France les six mois à jours courts (octobre à mars) ont des possibilités de production faibles (et les indices mensuels sont alors faibles ou nuls), il n'en est pas de même sous climat méditerranéen ; voici des essais de comparaison, sous climat méditerranéen, entre le semestre d'octobre à mars et tout ou partie du semestre à jours longs (avec irrigation) :

Ces comparaisons concernent des luzernes ; la luzerne se prête relativement bien à une étude comme celle-ci (certaines variétés peuvent croître en jours courts et en jours longs, etc...), néanmoins il pourrait être utile de comparer aussi des récoltes obtenues en jours courts pour une culture adaptée à cette époque, avec des récoltes obtenues en jours longs pour une culture de jours longs ; la luzerne présente en effet des difficultés pour la comparaison entre jours longs et jours courts, ainsi elle accumule à certaines époques des réserves souterraines ; comme la variation de la masse de ces réserves entre la date d'une coupe et celle de la suivante ne constitue pas une fraction constante de cette seconde coupe, les coupes successives ne représentent pas convenablement la production dans son évolution au cours de l'année ; d'autre part, la production de la luzerne fléchit en été, ainsi VERNET observait à Tunis une chute de production à mi-juin malgré des irrigations abondantes et, d'après des travaux récents (BOUCHET, DAMAGNEZ), il faudrait faire traduire ce fléchissement par l'indice en introduisant un effet dépressif des évapotranspirations potentielles élevées.

Les difficultés concernant la luzerne étant rappelées, examinons quelques résultats.

Comparaisons entre jours courts (d'octobre à mars) et total :

Près de Damas (BALDY) le rapport entre les résultats obtenus pour les « jours courts » et les résultats totaux (« jours courts » + « jours longs ») est :

— d'après les récoltes : 0,52 ;

— d'après les indices : 0,48 ;

précisons qu'ici les « jours longs » ne concernent que avril et mai, et

M.S.

que les rapports  $\frac{\text{M.S.}}{\text{indice}}$  sont pour les « jours courts » : 0,45, pour les « jours

longs » : 0,35, pour le total : 0,38.

A Valabre, en 1961, le rapport  $\frac{\text{« jours courts »}}{\text{total}}$  a été :

— d'après les récoltes : 0,28 ;

— d'après les indices : 0,195.

M.S.  
 (————— en « jours courts » : 0,75, en « jours longs » : 0,46, pour le total :  
 indice  
 0,52).

A Gilat (Israël, Nord du Néguev ; résultats dus à STANHILL),  
 « jours courts »  
 ————— :  
 total  
 — mesuré : 0,35 ;  
 — indice : 0,36.

M.S.  
 (————— : « jours courts » : 0,30, « jours longs » : 0,32, total : 0,31).  
 indice

L'indice donnerait donc, pour les rapports entre les potentialités des jours courts et celles des jours longs, des évaluations qui ne sont pas en désaccord avec l'expérience.

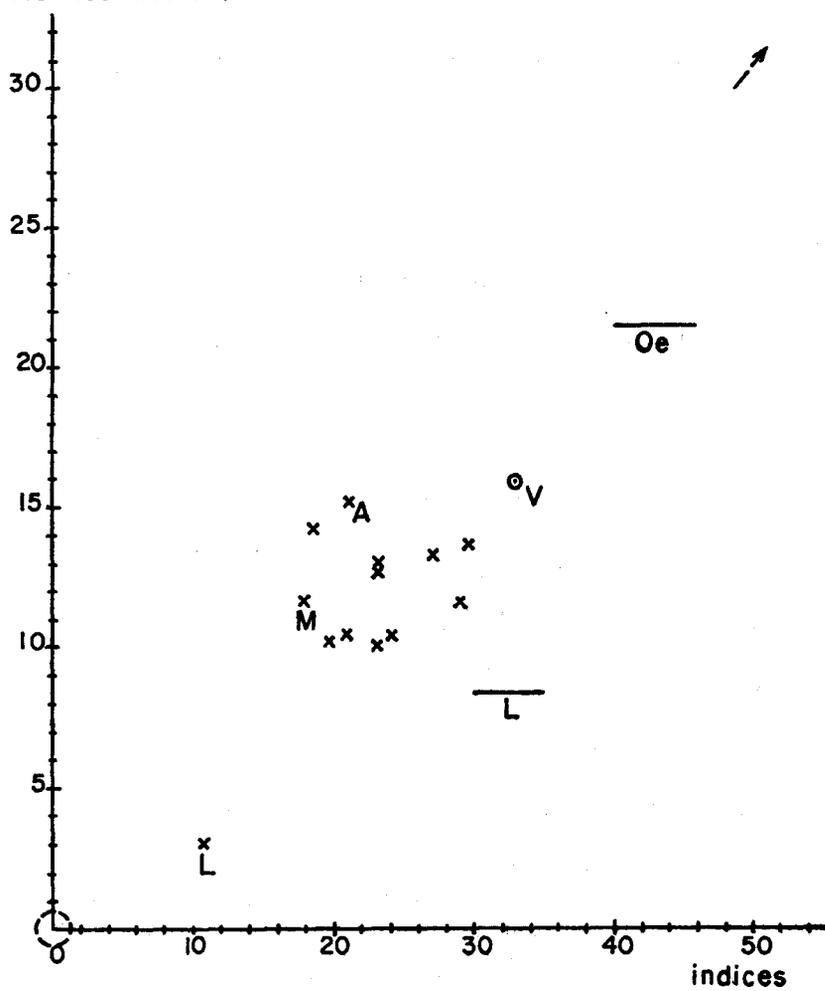
Considérons maintenant d'autres données concernant des luzernes (parfois associées avec des graminées). Leur examen introduit des comparaisons entre des récoltes dont certaines ont été obtenues sous climat humide, d'autres ont souffert d'une sécheresse modérée, d'autres d'une sécheresse sévère, enfin quelques-unes ont été irriguées ; parmi d'autres enseignements, il contribue donc à éprouver la validité du « facteur sécheresse », Fs.

Ces résultats sont plus comparables entre eux qu'avec d'autres car il s'agit, sauf pour la Station de Valabre, d'essais organisés selon un protocole coordonné par la Station Centrale d'Amélioration des Plantes de Versailles (DEMARLY, publication O.E.C.E.) et exécutés dans des stations expérimentales de onze pays, échelonnés du Nord au Sud depuis la Suède jusqu'à la Grèce et au Portugal.

Les valeurs qui ont été retenues pour être portées sur le graphique joint sont en général les moyennes de deux années successives, la deuxième et la troisième ; pour chaque station on considère les résultats de la variété de luzerne qui a donné les plus fortes récoltes.

Pour CEiras (Portugal), Larrissa (Grèce) et Valabre (France), les Luzernes ont été irriguées ; le point représentatif de Valabre, marqué « V », est figuré différemment des autres pour rappeler que cet essai n'appartient pas à la série O.E.C.E. ; les résultats d'CEiras (marqué « CE ») et de Larrissa (mar-

Mat. sèche  
(tonnes/ha. an)



qué « L ») sont représentés par des segments de droite et non par des points : les informations disponibles sur les quantités d'eau apportées par irrigation sont trop peu précises pour permettre de calculer les indices avec une moindre marge d'incertitude.

Le point marqué « L » représente les résultats obtenus pour Larissa sans irrigation, celui qui est marqué « M » concerne La Minière (près de Versailles) et « A » concerne Abbotstown (Irlande) ; les dix autres points concernent des stations situées en Suède, au Danemark, en Angleterre, en Belgique, en Allemagne, en Suisse, en Italie.

La dispersion observée ici provient pour une part des différences entre les conditions de sol, dont il n'est pas tenu compte dans le calcul de l'indice ; en particulier, on a, pour toutes les stations, donné la même valeur (100 mm) à RFU ; or cette grandeur, qui intervient dans le calcul de  $B_i$ , est déterminée en première approximation par l'épaisseur de sol exploitée par les racines, et par la constitution de ce sol, différentes selon les stations. Les différences entre les indices calculés ici sont donc destinées à traduire uniquement des différences entre des grandeurs macrométéorologiques.

Enfin, pour situer les résultats de ces essais « Luzerne » par rapport à des extrêmes (le Sahara dont il va être question et, au Congo, Yangambi cité plus haut) le graphique porte en traits interrompus : un cercle entourant le point de coordonnées 0,0 (Sahara) et une flèche portée par la droite qui joint l'origine au point représentatif de Yangambi (dont les coordonnées sont celles de l'origine du vecteur multipliées par 1,5).

Voici les valeurs des rapports :

récoltes mesurées (en tonnes de M.S. par ha et par an)

indice

Larissa : 0,29 sans irrigation et 0,24 à 0,28 avec irrigation.

CEiras : 0,48 à 0,54.

Versailles : 0,66.

Abbotstown : 0,73.

Pour les autres : 0,40 à 0,78.

Pour Valabre : 0,51.

On constate que presque tous les points de ce graphique se trouvent dans le domaine défini par :

$$\text{masse de M.S. en t/ha} = 0,6 A \pm (2 + 0,1 A)$$

A étant l'indice.

On a indiqué plus haut que l'examen de ces valeurs contribue à éprouver la validité du facteur sécheresse,  $F_s$  ; concernant ce facteur sécheresse, voici une comparaison entre essais irrigués et non irrigués, dans la même station (résultats dus à HUSEMANN) : près de Berlin, pour un mélange légumineuses-graminées dont on considère ici les moyennes des coupes de trois années, les rapports des résultats obtenus sans irrigation aux résultats obtenus avec irrigation sont :

- d'après les mesures : 0,76 ;
- d'après les indices : 0,78.

Signalons qu'il s'agit de faibles rendements (le rapport  $\frac{\text{récolte mesurée}}{\text{indice}}$  est de 0,24).

On peut essayer de donner à ce propos un ordre de grandeur des erreurs de l'indice en ce qui concerne les effets de la sécheresse et de l'irrigation : dans

les cas où, par exemple, le calcul donne  $\frac{\text{indice sans irrigation}}{\text{indice avec irrigation}} = 0,70$ , c'est

à-dire  $\frac{A \text{ (indice climatique)}}{HT \text{ (indice héliothermique)}} = 0,70$ , il semblerait que les valeurs

observées soient souvent situées entre 0,60 et 0,80.

Une dernière indication enfin sur les résultats donnés par l'indice lorsqu'il s'agit de traduire l'effet de la sécheresse : pour le Sahara, l'indice est nul (alors que HT, valeur qu'atteint l'indice tel qu'il est présenté ici lorsque l'irrigation est suffisante, vaudrait environ 60) ; la production du désert, évaluée par ha et par an, est extrêmement faible et justifie des indices nuls ; voici quelques exemples des valeurs que prend l'indice :

Au Sud du Sahara,  $A = 0$  dans la région de Tombouctou (alors que, dans une région dont le climat n'est pas classé comme saharien mais comme sahélo-saharien, El Fasher donne 4) ;  $A$  est nul également au Nord, non seulement au pied de l'Atlas Saharien mais aussi au-delà, dans le Sud des Hauts-Plateaux algériens (Aïn-Séfra, El Abiod), n'atteignant 1,7 qu'à Méchéria (à 1 170 m d'altitude) au Sud du Chott Chergui.

### 8) Application aux hautes terres du Massif Central.

Pour terminer, voyons ce que donne cet indice dans des stations du Massif Central dont les altitudes vont de 700 à 1 500 m ; pour chaque station on a indiqué l'altitude, la valeur annuelle de l'indice et ses valeurs semestrielles : d'avril à septembre et d'octobre à mars.

La Courtine (765 m) :  $27,4 = 26,5 + 0,9$  ;  $\frac{\Lambda}{HT} = 1$  (car avec la

valeur convenue pour RFU, 100 mm, le besoin d'irrigation est nul) ; l'indice est presque en retard d'un mois sur celui de la Région Parisienne :

<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>
0	0,2	4,35

(comparer avec les indices mensuels de Versailles indiqués plus haut).

Le Puy (715 m) :  $23 = 21,3 + 1,7$  ; avec irrigation on atteint 31,4 ;

$$\frac{\Lambda}{HT} = \frac{23}{31,4} = 0,73.$$

Les Sauvages (723 m) :  $32,4 = 31 + 1,4$  ;  $\frac{\Lambda}{HT} = 1.$

Aurillac (685 m) :  $28,9 = 27,55 + 1,35$  ; avec irrigation : 30,9.

Saint-Chély-d'Apcher (1 010 m) :  $23,7 = 23,2 + 0,5$  ; avec irrigation : 25,5 ; indices mensuels du printemps :

<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>
0	0,15	3,2	5,8

cela fait un mois de retard sur la Région Parisienne.

Issanlas (1 100 m) :  $23,5 = 22,5 + 1$  ;  $\frac{\Lambda}{HT} = 1.$

$$\text{Aigoual (1 567 m) : } 19,8 = 19,3 + 0,5 ; \frac{A}{HT} = 1.$$

$$\text{Puy-de-Dôme (1 467 m) : } 18,6 = 18,3 + 0,3 ; \frac{A}{HT} = 1.$$

De façon plus générale, pour la moitié Nord du Massif Central :

$$\text{— à 1 000 m : } 24,5 + 0,7 = 25,2 ; \frac{A}{HT} = 1.$$

$$\text{— à 1 500 m : } 18,1 + 0,3 = 18,4 ; \frac{A}{HT} = 1.$$

Dans des régions situées plus au Sud, jusqu'à environ 44° 30' de latitude, les indices restent voisins de ceux-ci, il faudrait peut-être leur ajouter 1 point ou 2, à altitudes égales.

On voit que l'indice croît lorsque l'altitude décroît de 1 500 m à 1 000 m ; pour des altitudes encore plus basses, descendant jusque vers 700 m, l'indice peut décroître lorsque l'altitude décroît dans certaines régions où la sécheresse se manifeste, mais cet effet est faible.

Nous n'avons pas encore fait de calculs pour les régions plus méridionales : Grands Causses, Cévennes, Bas-Vivarais, et plus au Sud et au Sud-Est, où la sécheresse estivale méditerranéenne peut se manifester même à des altitudes de 800 m (l'Aigoual, en raison de son altitude particulièrement élevée, est humide toute l'année).

Comparons les indices calculés pour le Massif Central avec ceux des régions de France dont l'altitude est inférieure à 600 m, voici des valeurs représentatives pour ces derniers :

Au Nord du 45° parallèle, A vaut en général de 20 à 30 dont 1 pour le semestre d'octobre à mars ; avec irrigation  $HT = 33 = 32 + 1$ .

Dans la France méditerranéenne : A vaut 15 et au-dessous, dont 6 pour le semestre à jours courts ; avec irrigation :  $HT = 43 = 37 + 6$ .

Dans des régions pluvieuses d'altitudes faibles et moyennes (jusque vers 500 m), l'indice vaut 30 et au-dessus ; c'est le cas de la bordure Ouest du

Massif Central (de Tulle à Villefranche-de-Rouergue), du Jura, des Vosges, des Basses-Pyrénées.

*En conclusion*, pour des stations du Massif Central dont les altitudes sont situées entre 700 et 1 500 m, l'indice prend des valeurs situées entre 20 et 25, alors que pour la plus grande partie du territoire français il vaut entre 20 et 30 ; d'après cet indice, le Massif Central, pour les latitudes supérieures à 44° 30', a donc une situation assez favorable à l'agriculture en ce qui concerne le climat.

Ceci est dû à l'abondance des précipitations ; en effet, entre 700 et 1 500 m d'altitude, l'indice héliothermique HT est réduit à environ les deux tiers de ce qu'il était à basse altitude dans la plus grande partie de la France, et à la moitié de ce qu'il vaut dans le Midi ; mais par contre l'absence de sécheresse fait souvent que l'indice A est égal à HT, alors que dans des régions plus basses la sécheresse rend A inférieur à HT.

Il faut rappeler :

- que l'indice exprime des corrélations, et l'emploi de corrélations comporte toujours un certain risque ;
- que les indications que nous avons données au sujet de la fréquence des « jours de gelée » concernent des stations françaises de basse altitude, si bien que ceci devrait être réexaminé pour des stations d'altitudes élevées.

Enfin, nous avons encore trois réserves à examiner :

1° Il se pourrait que l'indice donne des valeurs trop élevées pour les régions très froides (altitudes dépassant 2 500 m en France, régions arctiques) ; en ce cas, on envisagerait d'introduire un arrière-effet des grands froids et peut-être un effet des hautes altitudes, mais les indications dont on dispose permettent de penser que cela n'aurait pas d'incidence sur les valeurs prises par l'indice, en France, à des altitudes inférieures à 2 000 m ;

2° Nous n'avons pas pris en compte les effets néfastes des précipitations ni des excès d'eau (humidité excessive, érosion...) ; or ces effets, qui existent ailleurs en montagne, sont souvent très notables ici ;

3° Le sol : on a vu que l'indice concerne des cultures très bien conduites, en particulier convenablement fumées, et dans le Massif Central on rencontre souvent des sols pauvres qui peuvent être particulièrement exigeants à cet égard ; mais il y a un facteur « sol » qui intervient dans le calcul de l'indice,

c'est la capacité qu'a le sol d'emmagasiner l'eau des précipitations et de la restituer à l'évaporation et à la transpiration végétale.

Le facteur sécheresse ( $F_s$ ), dépend des besoins d'irrigation ( $B_i$ ), or tous les indices dont il a été question dans cet exposé ont été calculés en évaluant  $B_i$  pour le cas où  $RFU = 100$  mm (1);  $RFU$  (capacité du réservoir à eau facilement évaporable, ou facilement « utilisable », reportable de mois en mois) dépend de facteurs divers : de la constitution et de la profondeur du sol, ainsi que de l'enracinement, d'autres propriétés de la végétation intéressant son aptitude à extraire l'eau du sol, et des conditions météorologiques ; on peut estimer néanmoins qu'une valeur de  $RFU$  voisine de 100 mm est souvent convenable lorsque la végétation est bien enracinée sur une profondeur de 60 cm à 1 mètre. Dans les régions du Massif Central considérées ici (altitudes entre 700 et 1 500 m, latitudes supérieures à  $44^{\circ} 30'$ ), des sols plus profonds que ceci n'accroîtraient guère l'indice, pas plus que l'irrigation, alors que dans la région de Versailles, par exemple, l'indice passe de 20 pour  $RFU = 100$ , à 29 pour des sols très profonds et 33 avec irrigation.

Pour des sols moins profonds, le calcul donnerait des indices plus faibles, car,  $RFU$  étant plus petit, les besoins d'irrigation seraient plus élevés, donc les valeurs du « facteur sécheresse » seraient moindres. Si on considère les sols encore plus superficiels (l'épaisseur de sol accessible aux racines étant par exemple de 20 cm), on ne peut plus utiliser les modes de calcul que nous avons employés, il faudrait pour le moins modifier le mode de calcul de  $B_i$  ; enfin, avec des sols suffisamment minces les indices qui viennent d'être présentés perdent toute validité. Comme les sols très minces se rencontrent plus souvent en montagne qu'en plaine, ces restrictions méritaient d'être rappelées ici.

L. TURC,

Laboratoire des Sols, Versailles,  
Département de l'Agronomie de l'I.N.R.A.

(1) La valeur de  $RFU : 100$  mm, intervient directement dans le calcul lorsque les calculs mensuels sont effectués année par année ; si au contraire les calculs mensuels portent sur des moyennes interannuelles, on utilise  $RFU = 30 = 70$ .

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Des indications complémentaires concernant l'indice sont données dans :

- L. TURC : « A propos d'indices climatiques » (Mélanges Maurice PARDE, sous presse).
- L. TURC : « Indice climatique de potentialité agricole » (intervention au Premier Symposium international sur les méthodes de l'agrocimatologie, Reading, 1966).

On trouvera des détails sur la façon dont nous évaluons certaines données météorologiques et l'évapotranspiration potentielle ainsi que les besoins en eau d'irrigation dans :

- L. TURC, 1961 : « Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle : formule climatique simplifiée et mise à jour », *Ann. Agr.* p. 13-49.
- F. ZAHEDI, 1966 : « Etude sur les besoins en eau d'irrigation de l'Iran », Thèse de Docteur-Ingénieur, Paris.