

Contribution de Stéphane Hénin dans le domaine de la climatologie

Raymond Gras
Directeur de recherches Inra (Antibes)

S. Hénin a apporté sa contribution dans beaucoup de domaines autres que ceux de la science du sol et de l'agronomie. C'est le cas de la climatologie, ce terme désignant ici aussi bien l'évaporation, les débits des cours d'eau, les besoins en eau des cultures que les potentialités climatiques. C'est L. Turc qui a été le collaborateur à l'Inra de S. Hénin dans ce domaine, et il eût été le plus compétent pour traiter de ce sujet. Comme il n'a pas souhaité le faire, pour des raisons personnelles, c'est, faute de mieux, moi-même qui m'y emploierai, afin qu'un autre des secteurs de l'activité de S. Hénin apparaisse lors de ce jubilé. Cette contribution dans le domaine de la climatologie est exposée en suivant l'ordre chronologique, parce que les résultats de ses travaux s'enchaînent étroitement. Schématiquement, on peut cependant distinguer dans ceux-ci deux grandes parties. L'une comprend l'évaporation et ses conséquences sur l'hydrologie et la production végétale, l'autre partie est une application aux potentialités végétales de certains des résultats précédents.

Evaporation et hydrologie

Schématiquement, au cours du cycle de l'eau, une partie des précipitations parvenant sur le sol se vaporise en consommant de l'énergie, l'autre partie s'écoulant vers la mer par les fleuves. Si la mesure des précipitations est simple, il n'en est pas de même pour l'évaporation E . On tente de la calculer en fonction des pluies P (puisque c'est une fraction de celles-ci), et d'une autre grandeur climatique, la température t , censée refléter l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau. Cela implique l'existence d'une relation $E = f(P, t)$, f étant une fonction de P et de t , dont LUGEON, au Congrès de géographie de Varsovie en 1934, déplorait ainsi l'absence : « *L'expression de cette formule pour le monde entier est encore à trouver* ». Les premiers travaux de S. Hénin concernent l'obtention d'une telle formule.

L'équation initiale, dite de drainage

Dans deux notes à l'Académie des sciences, présentées en 1944, sont données les bases des calculs de l'évaporation (HÉNIN et TERNISIEN, 1944 ; HÉNIN et GODARD, 1944). L'équation proposée est :

$$E = P/(1 + \gamma P^2),$$

la température intervenant par l'intermédiaire du coefficient γ :

$$\gamma = 1/(0,15 t - 0,13).$$

Avant de poursuivre, nous donnerons un bref aperçu du principe de la méthode ayant abouti à cette formule. Cette méthode, qui est basée sur l'emploi des mathématiques, consiste à établir la fonction $f(P, t)$ à partir des données que sont E , P et t .

Ces données ont deux origines : les bassins fluviaux et les cases lysimétriques. Pour un bassin fluvial, les précipitations P et la température t sont mesurées, mais il n'en est pas de même pour l'évaporation E . Celle-ci est calculée au moyen d'une équation de bilan de l'eau, le débit D du fleuve drainant le bassin fluvial étant connu. A cet effet, la couche de sol est considérée comme un système pour lequel, sur un intervalle de temps donné : intrants = extrants + variation d'état du système. Il vient $P = D + E + \Delta H$, ΔH étant la variation de l'humidité H du sol entre le début et la fin de la période considérée. L'évaporation E peut être calculée par la différence $P - D$, si l'humidité du sol est la même au début et à la fin de la période de bilan ($\Delta H = 0$). Si tel n'est pas le cas, et pourvu qu'on dispose d'un nombre n d'années assez grand, le bilan sur ces années s'écrit à partir des valeurs moyennes \bar{P} , \bar{D} , \bar{E} : $n\bar{P} = n\bar{D} + n\bar{E} + \Delta H$ ou $\bar{P} = \bar{D} + \bar{E} + \Delta H/n$; le terme $\Delta H/n$ devient rapidement négligeable lorsque n augmente.

Les cases lysimétriques sont des installations expérimentales constituées par des bacs en béton remplis de terre et placés dans le milieu naturel. La quantité d'eau D qui s'écoule à la base de la case permet de calculer E avec les mêmes contraintes que celles des bassins fluviaux pour les périodes longues. Le caractère expérimental des cases lysimétriques permet d'établir ce bilan sur des périodes beaucoup plus courtes, ce qui nécessite de prendre en compte la variation d'humidité du sol.

Dans un système d'axes E - P , on place les points représentatifs des valeurs mesurées de E et de P pour une température donnée, par exemple 10°C (fig.1). L'équation $E = f(P, t)$ doit être telle que sa courbe représente les points de coordonnées E , P , t ayant dans l'équation la valeur 10°C . Il va de soi que, pour l'ensemble des données, un faisceau de courbes est nécessaire, chacune correspondant à une valeur de la température t .

Les propriétés mathématiques de l'équation doivent être telles que toutes les situations, y compris les plus extrêmes, soient correctement représentées. Ces situations extrêmes sont particulièrement utiles pour préciser les conditions auxquelles l'équation doit satisfaire. Lorsque P est très petit, on se trouve en conditions désertiques. Des précipitations très faibles humectent une mince couche superficielle de sol, d'où elles sont complètement évaporées. Il en résulte $E \approx P$, ce qui implique une tangente à l'origine de 1 pour toutes les courbes $E = f(P, t)$ du faisceau. Pour les régions très humides, on pensait que l'augmentation de P s'accompagnait d'une augmentation du degré hygrométrique limitant l'évaporation, d'où une certaine décroissance de E lorsque P augmente beaucoup ; de ce fait, les courbes proposées présentent un maximum peu marqué.

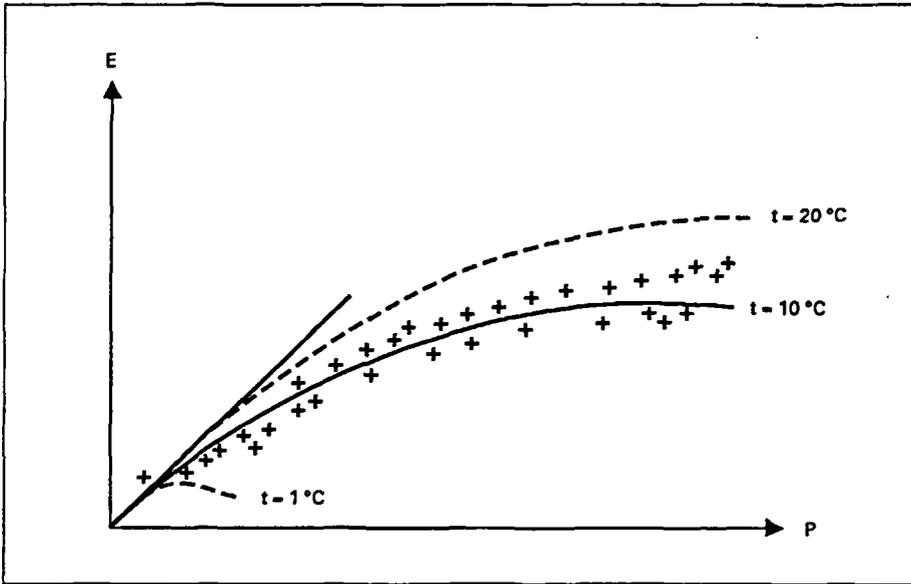


Figure 1. Principe de la méthode utilisée pour obtenir une relation $E = f(P, t)$.

Les valeurs mesurées de E et de P pour une température moyenne de 10 °C sont représentées par des points dans le système d'axes E-P. La courbe théorique (dessinée pour $t = 10\text{ °C}$) doit traduire la relation existant entre les valeurs mesurées. Les courbes $E = P/(1 + \gamma P^2)$, qui sont tracées pour trois valeurs de t, présentent un maximum peu accentué.

L'intérêt de ces premiers travaux est double. Le drainage peut être calculé par $D = P - E$, ce qui donne $D = \gamma P^3/(1 + \gamma P^2)$, c'est la formule de drainage de Hénin. Dans une note de 1945, AUBERT et HÉNIN modifient le coefficient γ en fonction de la texture, ce qui se traduit par son remplacement par un coefficient $\gamma' = \alpha \gamma$; α prend les valeurs 0,5 pour les sols argileux, 1 pour les sols limoneux et 2 pour les sols sableux. Ceci donne à l'échelle géographique la quantité d'eau D' percolant annuellement à travers le sol; on pouvait ainsi mettre en correspondance les grandes catégories de pédogenèse et les valeurs de D' . Par exemple, pour les sols désertiques, D' est inférieur à 30 mm et pour les sols latéritiques, les latérites, les podzols, D' est supérieur à 200 mm.

Un autre intérêt considérable de ce travail découle du fait qu'une méthode fructueuse d'exploitation mathématique des données a été mise en œuvre pour la première fois, ce qui va ouvrir la voie à d'autres travaux.

Poursuite des travaux sur le calcul de E

Comme on peut s'en douter, il est très difficile de représenter par une équation unique toutes les situations du globe. Par exemple, les bilans relatifs à l'île de Java, où les pluviométries annuelles varient de 2 000 à 5 000 mm, ont montré que l'évaporation ne diminue pas après être passée par un maximum, mais croît lentement avec les fortes précipitations. En effet, dans ces régions, les pluies sont intenses mais courtes, de sorte qu'il y a des périodes ensoleillées, et le degré hygrométrique est inférieur à ce qu'il serait s'il pleuvait tout le temps. Cette

diminution de l'évaporation avec les pluviométries élevées n'est pas non plus sensible pour les bassins des fleuves alpins sur lesquels les précipitations peuvent atteindre 2 500 mm.

Il importait donc de reprendre ces premiers travaux pour améliorer la représentativité de l'équation dans les régions de pluviométrie élevée. HÉNIN et TURC (1945) ont donc cherché une autre formulation mathématique. Le corps des données a été étendu, puisqu'il comprenait 254 bassins versants répartis sur toute la surface du globe et 17 localisations de cases lysimétriques ; comme dans chaque site existent plusieurs sortes de cases variant avec la profondeur, la végétation portée, cela représentait de l'ordre de la trentaine de cases. Les travaux correspondants sont rassemblés dans la thèse de TURC, soutenue en 1953.

La forme générale des équations est telle que leurs courbes représentatives ont une tangente à l'origine de pente voisine de 1 (d'où $E \approx P$) et que, pour les grandes valeurs de P, une branche parabolique traduit le fait que E augmente encore lorsque P atteint des valeurs élevées (fig. 2).

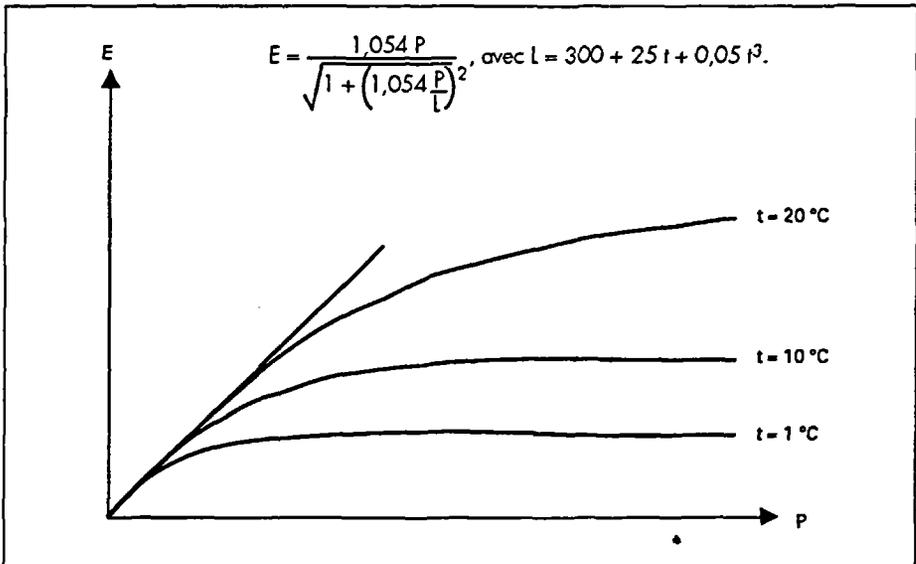


Figure 2. Courbes représentatives de l'équation traduisant la relation entre la valeur annuelle de E, P et t pour les bassins fluviaux.

Les branches paraboliques de ces courbes traduisent le fait que, pour les pluviométries élevées, E augmente encore avec P.

L'évaporation annuelle pour des bassins fluviaux est donnée par :

$$E_{an} = \frac{1,054 P}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,054 P}{L(t)}\right)^2}}$$

E et P étant exprimés en mm.

$L(t)$ est la valeur maximale de l'évaporation pour une température donnée, lorsque le milieu est largement approvisionné en eau : dans ce cas, c'est le pouvoir évaporant de l'air qui est le facteur limitant. Cette valeur maximale L s'exprime ainsi : $L(t) = 300 + 25 t + 0,05 t^3$, t étant la température moyenne annuelle. La présence dans la formule de l'évaporation maximale n'est pas fortuite, elle est une astuce méthodologique permettant de substituer au faisceau de courbes dépendant de la température une courbe unique dont il sera plus facile de trouver l'équation. Pour cela, les groupements sans dimension $E/L(t)$ et $P/L(t)$ sont substitués à E et à P ; ceci se retrouve sur l'équation précédemment citée qui peut s'écrire :

$$E/L = \frac{1,054 P/L}{\sqrt{1 + \left(1,054 \frac{P}{L}\right)^2}}$$

Pour l'évaporation décadaire (10 jours) des cases lysimétriques, deux formules ont été établies, l'une pour le sol nu, l'autre pour le sol cultivé.

Dans le cas du sol nu :

$$E_{10j} = \frac{P + a}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l}\right)^2}}$$

Cette équation diffère de l'équation « bassins fluviaux, valeurs annuelles » par l'adjonction du terme « a » et une expression différente de l'évaporation maximale désignée ici par l . Le terme « a » représente la lame d'eau directement évaporable au détriment de l'eau mise en réserve dans le sol ; de ce fait, l'évaporation peut ne pas s'annuler si aucune précipitation ne tombe durant la décade. Le calcul de « a » se fait en fonction de l'humidité du sol H et de sa capacité au champ C :

- si $C - H < 25$ mm, $a = 10$ mm ;
- $25 < C - H < 35$ mm, $a = 35 - (C - H)$;
- $C - H > 35$ mm, $a = 1$ mm.

Pour des intervalles de temps aussi courts que la décade, l'évaporation maximale ne dépend pas que de la température et

$$l = \frac{(t + 2) \sqrt{I_G}}{16}$$

I_G étant la radiation globale d'origine solaire (en petites calories/cm² de surface/jour).

Lorsque le sol porte une végétation, l'équation prend la forme :

$$E_{v10j} = \frac{P + a + V}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l} + \frac{V}{2l}\right)^2}}$$

Cette formule diffère de la précédente par l'adjonction du terme V , facteur végétation, qui représente la transpiration végétale ; de ce fait, E n'est autre que l'expression de ce que l'on commence à appeler l'évapotranspiration, puisque le mémoire de THORNTWAITE date de 1948. Plus précisément, il s'agit d'une

évaporation réelle maximale, puisque, comme on va le voir, le calcul de V prend en compte, décade par décade, l'état de la végétation et notamment la façon dont elle couvre le sol. Le terme V se calcule à partir de la masse totale de récolte M (matière sèche en quintaux par hectare), de la durée de la culture exprimée en décades et de la variation décadaire de la réserve en eau du sol.

Il est important de souligner que, pour calculer l'évaporation avec les formules qui viennent d'être présentées, les données nécessaires sont couramment disponibles. La pluviométrie et la température sont mesurées dans les stations météorologiques classiques. La radiation solaire globale, qui est mesurée seulement dans un nombre plus réduit de stations météorologiques, peut se calculer en fonction de la durée d'insolation disponible sur un plus grand nombre de stations. A défaut, les cartes de BLACK (1956) et de BUDYKO (1955) donnent les normales mensuelles de la radiation globale.

L'intérêt des travaux précédents a été considérable, tout d'abord dans le domaine hydrologique. Une formule $E = f(P, t)$ valable pour l'ensemble des situations du globe est disponible. Elle permet de calculer le débit de fleuves D à partir de la différence $P - E$ et ouvre en quelque sorte la voie à une hydrologie théorique qui a été mise en œuvre par Tamm en Suède et par Poncelet en Belgique. L'intérêt des hydrologues s'est manifesté aussi en France par le fait que L. Turc avait été pressenti pour remplacer M. Pardé à la chaire de potamologie de l'Université de Grenoble. La formule « bassins fluviaux, valeurs annuelles » permet, lorsque des mesures manquent, une interpolation spatiale bien meilleure que les formules empiriques $D/P = cte$ ou $D - P = cte$.

Ces travaux ont établi que les évaporations annuelles sont du même ordre de grandeur pour les bassins fluviaux et les cases lysimétriques, malgré les différences considérables d'échelle. Dans le domaine de l'agronomie, la formule « case cultivée » permet de calculer les doses d'irrigation. A cet effet, on attribue au facteur végétation V une valeur élevée a priori, ce qui fournit une évapotranspiration maximale. On irrigue dès que la quantité $E - P$ fournie par le sol dépasse 100 mm. Le bien-fondé de ce calcul a été vérifié sur des essais d'irrigation réalisés dans le Royaume-Uni, aux Etats-Unis et en Egypte. Les besoins en eau d'une vallée du Pakistan ont été calculés de cette façon par AHMAD (1962)

Le retentissement à l'étranger a été également important. La thèse de TURC, traduite en russe, a été utilisée pour l'enseignement et l'irrigation. Un bulletin technique du Département de l'agriculture des Etats-Unis signale l'intérêt de la thèse de TURC dans le domaine des cases lysimétriques.

Calcul de l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration est la somme des quantités d'eau évaporées par la surface du sol et transpirées par la végétation qu'il porte. Comme l'évapotranspiration dépend, en plus de facteurs atmosphériques, de l'humidité du sol et du développement de la végétation, les climatologues ont créé le concept plus opérationnel d'évapotranspiration potentielle. C'est l'évapotranspiration d'une culture couvrant bien le sol et correctement alimentée en eau.

L'évapotranspiration potentielle est déterminée par le climat au voisinage immédiat de la plante, c'est-à-dire par son microclimat. PENMAN (1968), en Angleterre, a calculé l'évapotranspiration potentielle, en utilisant le résultat d'un bilan d'énergie au niveau de la feuille et le pouvoir évaporant de l'air. Il a fourni une

formule en quelque sorte rigoureuse de calcul, mais au prix de la mesure de paramètres difficiles à obtenir. S. Hénin et L. Turc, mettant à profit la liaison microclimat-macroclimat, se sont engagés dans une voie différente, en calculant l'évapotranspiration à partir de données macroclimatiques faciles à obtenir.

Pour cela, ils n'ont eu qu'à suivre la direction déjà tracée pour établir l'équation « case cultivée ». Cette équation a été simplifiée en tenant compte des conditions de l'évapotranspiration potentielle, la plante jouant le rôle d'une mèche mettant en relation la surface évaporante qu'est le couvert végétal et l'eau mise en réserve dans le sol. L'évapotranspiration atteint une valeur plafond lorsque la culture est largement alimentée en eau et couvre bien le sol. Le résultat est l'équation suivante (TURC, 1961) :

$$ETP \text{ (mm/10 jours)} = \frac{t}{t + 15} (I_G + 50) \cdot f(h)$$

t : température moyenne de l'air pendant la décennie, en degrés centigrades.

I_G : radiation globale d'origine solaire, en petites calories/cm² de surface/jour.

$f(h)$ est une fonction de l'humidité relative h , c'est la plus grande des deux expressions :

$$1 \text{ et } 1 + \frac{65 - h}{120} \quad (\text{TURC, 1981}).$$

De ce fait, h n'intervient que lorsque sa valeur est inférieure à 65 %. Cette formule soutient la comparaison avec celle de Penman, considérée comme référence, ce qui justifie a posteriori l'utilisation des données macroclimatiques.

Ce résultat est arrivé à point nommé compte tenu du développement de l'irrigation, parce qu'il permettait d'évaluer les besoins en eau des cultures pour calculer les dimensions des ouvrages d'amenée d'eau et les doses d'irrigation. En France, de nombreux documents ont été réalisés à partir de cette formule par le Service de l'hydraulique du ministère de l'Agriculture : cartes mensuelles d'évapotranspiration (TURC *et al.*, 1963), étude fréquentielle des besoins en eau d'irrigation de la France (DARVES-BORNOZ *et al.*, 1965). Dans ce dernier document, on donne plusieurs valeurs à la réserve facilement utilisable (RFU, quantité d'eau que le sol peut fournir à la plante sans que l'évapotranspiration devienne inférieure à sa valeur potentielle) : 50, 100, 150 et 200 mm. Les besoins sont de fréquence biennale, quinquennale et décennale. Ce document comprend 14 cartes pour diverses cultures et des bilans de l'eau établis sur un cycle annuel comprenant des séquences sol nu-sol cultivé non irrigué-sol cultivé irrigué.

Cette équation a été aussi utilisée par le Service d'hydrologie du BRGM pour calculer un index physique de réserves d'eau.

Du fait de son universalité, cette formule a permis de calculer les besoins en eau hors de France, notamment en Algérie, en Iran, au Liban.

Indice de potentialité climatique

La potentialité climatique est la valeur de la production végétale lorsque le seul facteur limitant est le climat. L'indice est destiné à relier des productions végétales annuelles à des données macroclimatiques dans les meilleures conditions de production. Cela exclut l'intervention comme facteurs limitants de la nutrition minérale, des excès d'eau éventuels, des ennemis des cultures et, ce qu'on oublie souvent, d'une exploitation insuffisante du sol par les racines.

L'attitude adoptée pour obtenir cet indice est la même que celle qui a été choisie pour l'évapotranspiration : utiliser la liaison entre le microclimat de la plante qui en détermine la production et le macroclimat, plus facile à caractériser.

Les facteurs climatiques pris en compte sont l'énergie lumineuse reçue par la plante, la température et l'alimentation en eau.

La photosynthèse est proportionnelle à la quantité d'énergie lumineuse disponible. Le facteur solaire traduisant ce fait est donné par la plus petite des deux expressions :

$$0,03 (I_G - 100) \text{ et } H - 5 - \left(\frac{\lambda}{40} \right)^2$$

H étant la durée astronomique du jour (en heures) et λ la latitude (en degrés).

La première expression correspond au cas où la durée du jour n'est pas limitante et la seconde à la situation inverse. Cette formulation alternative permet donc ici de traduire les effets de facteurs limitants. Le terme 100 dans $(I_G - 100)$ traduit le fait que, à cause de la respiration, une partie des assimilats provenant de la photosynthèse sont oxydés, « brûlés » en quelque sorte, pour fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement de la plante. La production de matière végétale s'annule donc avant que l'intensité de la radiation incidente soit nulle, ce qui correspond au point de compensation lumineux pour lequel l'effet de la photosynthèse est égal à celui de la respiration.

Le facteur thermique représente les effets de la température par le produit de deux expressions. L'une exprime que la production végétale passe par un maximum lorsque la température moyenne augmente ; l'autre expression, calculée à partir de la moyenne des minima quotidiens, est proportionnelle au nombre mensuel de jours de gelée.

Le facteur sécheresse, qui prend en compte l'alimentation en eau, est calculé en confrontant les besoins évalués par l'évapotranspiration potentielle à l'offre constituée par les pluies et l'eau fournie par le sol. Ce facteur prend la valeur 1 lorsque la culture est convenablement irriguée.

Les facteurs précédents ayant été calculés pour un mois donné, leur produit donne l'indice mensuel de ce mois :

$$i = \text{facteur solaire} \times \text{facteur thermique} \times \text{facteur sécheresse.}$$

Le produit du facteur solaire par le facteur thermique est le facteur héliothermique.

L'indice annuel I résulte de la sommation des indices mensuels de janvier à décembre :

$$I = \sum_{J \rightarrow D} i$$

L'indice annuel varie de 1 à 35 en France métropolitaine et de 0 à 75 dans le monde.

Une fois établie la formulation de l'indice, il fallait vérifier sa validité en examinant s'il était proportionnel à la masse végétale produite. C'est la totalité de celle-ci qu'il faut considérer et non la masse récoltable, qui serait par exemple seulement le grain dans le cas d'une céréale. Ceci a conduit à utiliser des productions comme la canne à sucre, les plantes fourragères... Ce sont ces dernières plantes qui ont été retenues par l'intermédiaire de résultats d'essais réalisés selon un protocole commun de l'OECE dans 11 pays européens, s'étendant en latitude de la Suède à la Grèce et au

Portugal. La proportionnalité entre la valeur de l'indice et la production végétale est bonne, un point d'indice correspondant à 0,6 t par hectare et par an de matière végétale produite. Cet indice fournit donc la production de cultures entièrement récoltables, les coefficients étant sensiblement les mêmes, 0,63 (au lieu de 0,60) pour la canne à sucre. Mais l'intérêt de cet indice ne se limite pas aux cultures entièrement récoltables, comme on le verra.

Une des caractéristiques de cet indice est que les données nécessaires à son calcul sont faciles à obtenir. Il est discriminant à cause de son calcul à partir de 12 composantes mensuelles. Il peut fournir les potentialités en conditions naturelles ou irriguées ; dans ce dernier cas, il suffit de donner au facteur sécheresse la valeur 1. Enfin, quoique cet indice ait été « calé » sur la production fourragère, il présente un grand intérêt pour les cultures dont toute la masse produite n'est pas récoltable (céréales, fruits...), parce qu'il ne provient pas d'un simple ajustement à des données expérimentales, mais analyse les effets sur la production des principaux paramètres climatiques.

Cet indice de potentialité est susceptible d'utilisations variées. L'indice annuel est un instrument de planification. A ce titre, L. Turc l'a calculé pour près de 200 stations de l'Europe occidentale et centrale. Il permet aussi des comparaisons entre stations en France et à l'étranger (Espagne, Maroc).

C'est aussi un élément de diagnostic pour préciser l'origine de différences de production entre deux régions a et b. S'il n'y a aucun facteur limitant, autre que le climat, entre les productions P_a et P_b de ces deux lieux et les indices correspondants I_a et I_b , existent les relations $P_a = K \cdot I_a$ et $P_b = K \cdot I_b$, d'où $P_a/P_b = I_a/I_b$; on remarquera qu'il n'est pas nécessaire de connaître le coefficient K de proportionnalité. Si P_a/P_b est différent de I_a/I_b , au moins un autre facteur limitant que le climat est en cause. FRITZ et AUDUREAU (1968) ont ainsi déterminé à la Réunion les causes non climatiques de différences de production fourragère.

Une carte représentant des classes de 5 points de l'indice de potentialité a été dressée en utilisant les normales des pluviométries mensuelles et une réserve facilement utilisable de 70 mm (TURC et LECERF, 1972) ; ceci correspondrait à une réserve de 100 mm si on utilisait les précipitations mensuelles réelles pour le calcul. Les valeurs les plus faibles de l'indice sont celles des régions méditerranéennes à cause de la sécheresse, tandis que les valeurs les plus élevées apparaissent dans l'extrême sud-ouest du fait de l'abondance des pluies et de la douceur des hivers. Les potentialités sont relativement élevées dans les zones de montagne comme le Jura et le Massif central. Les régions de Lille et de Toulouse ont le même indice annuel, alors que certains indices mensuels sont différents, la sécheresse faiblement marquée à Lille étant plus accentuée à Toulouse (fig. 3).

Cette carte qui peut servir à la planification est aussi un fond de plan utile dans beaucoup de domaines de la production végétale. La longévité d'une plante ligneuse à parfum cultivée sans irrigation, le lavandin, est liée aux zones de potentialité climatique (GRAS, 1975). Cette carte est aussi un moyen de faire apparaître les interactions technique-climat. Pour la culture précédente, l'influence défavorable sur la longévité de la densité de plantation est accentuée dans les régions à faible potentialité (GRAS, 1989).

Une carte plus précise des potentialités de la France a été dressée, avec les réserves facilement utilisables dominantes des diverses régions de France (MORI et TURC, 1983).

Les composantes mensuelles de l'indice permettent de suivre l'évolution de la production fourragère au cours de l'année au plan local (FELIX et RAUZY, 1971). Dans les Pyrénées centrales, l'hivernage de troupeaux ovins est une période souvent délicate, la mise au pâturage précoce au printemps ne palliant pas toujours l'insuffisance des réserves de foin. Dans une simulation de ce problème, l'indice de potentialité permet de calculer la pousse de l'herbe (CHARPENTEAU et DURU, 1983).

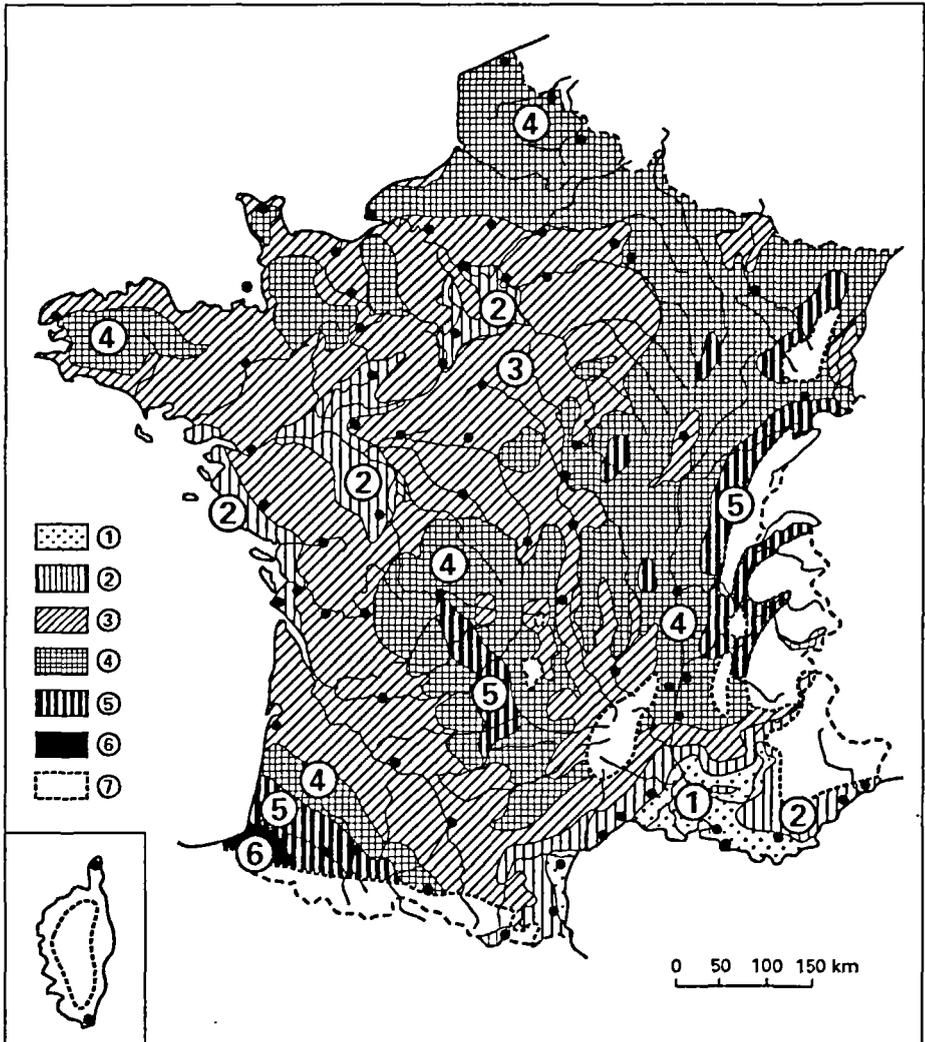


Figure 3. Carte représentant 6 classes de 5 points d'indice de potentialité climatique. 1 : < 15 ; 2 : 15 à 20 ; 3 : 20 à 25 ; 4 : 25 à 30 ; 5 : 30 à 35 ; 6 : > 35. La réserve en eau facilement utilisable du sol est de 100 mm pour le calcul avec les données mensuelles réelles de la pluviométrie. Potentialités de zones montagneuses non calculées, en blanc sur la carte. (TURC et LECERF, 1972.)

Conclusion

Les recherches que S. Hénin a conduites ou dirigées dans le domaine de la climatologie sont très variées. Une des caractéristiques de ces travaux est aussi leur extension. Il s'agit d'abord d'une extension spatiale, puisqu'on passe du bassin de la Volga avec 625 000 km² aux cases lysimétriques de Versailles avec 1 m². Mais c'est surtout la dimension intellectuelle en quelque sorte qui retiendra notre attention. Elle résulte de la largeur de vue avec laquelle les problèmes ont été posés et les recherches conduites. Le problème de l'évaporation, par exemple, a été posé dans toute son ampleur, dans toute sa généralité et sans se soucier, en apparence du moins, de la nature scientifique ou appliquée des résultats.

De ce fait, il n'existe pas dans ce travail de césure entre la recherche pure et la recherche appliquée, si tant est que ces distinctions aient un intérêt. Il s'agit d'abord de recherche et les applications en découlent automatiquement comme pour toute recherche de qualité.

C'est pourquoi, tout naturellement, les résultats de ces recherches concernent aussi bien le savant que l'ingénieur, le géographe que l'agronome. C'est là un signe de l'ampleur avec laquelle elles ont été menées.

Bibliographie

- AHMAD (M.S.), 1963. « Water requirements of plants in the Quetta Valley, West Pakistan ». In *Plant water relationship in arid and semi-arid conditions*. Paris, Unesco.
- AUBERT (G.), HÉNIN (S.), 1945. Relations entre le drainage, la température et l'évolution des sols. *C.R. Acad. Sci.*, 220 : 330.
- BLACK (J.N.), 1956. The distribution of solar radiation over the earth's surface. *Arch. Meteor. Geoph. Bioclim.*, 5 B, 2, 4 (University of Adelaïde).
- BUDYKO (M.L.), 1955. *Atlas Teplovogo Balansa*. Leningrad.
- CHARPENTEAU (J.L.), DURU (M.), 1983. Simulation of some strategies to reduce the effect of climatic variability on farming systems. The case of the Pyrénées mountains. *Agric. Syst.*, 11 : 105-125.
- DARVES-BORNOZ (R.), LECARPENTIER (C.), BESANVAL (G.), 1965. *Etude fréquentielle des besoins en eau d'irrigation en France métropolitaine*. Paris, Ministère de l'Agriculture, Direction générale du génie rural et de l'hydraulique agricole, 3 tomes.
- FELIX (L.), RAUZY (G.), 1971. Contribution à la prévision de la production de plantes cultivées au moyen d'un indice agroclimatique local. *Fourrages*, 45 : 71-91.
- FRITZ (J.) AUDUREAU (M.), 1968. *Applications de l'indice climatique de potentialité agricole à différents climats de la Réunion*. IRAT Réunion.
- GRAS (R.), 1975. Climat, production et longévité du lavandin. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 61 : 865-869.
- GRAS (R.), 1989. Influence sur la longévité du lavandin de la densité de plantation, interaction avec le climat. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 75 : 60-62.
- HÉNIN (S.), GODARD (M.), 1944. Relation entre l'évaporation, la température et l'indice d'aridité. *C.R. Acad. Sci.*, 219 : 559.
- HÉNIN (S.), TERNISIEN (J.), 1944. Sur une relation entre la pluviosité, le drainage et l'évaporation. *C.R. Acad. Sci.*, 219 : 80.

- HÉNIN (S.), TURC (L.), 1945. Comparaison entre diverses formules reliant l'écoulement et les précipitations. *C.R. Acad. Sci.*, 221 : 760.
- LUGEON (J.), 1934. Congrès international de géographie, Varsovie.
- MORI (A.), TURC (L.), 1983. Carte de France de potentialité fourragère annuelle (en absence d'irrigation), d'après un indice climatique (L. Turc, 1967) et cartes des R.U. (réservoir du sol pour l'eau utilisable) et notice explicative. Inra, 26 p., 2 cartes.
- PENMAN (H.L.), 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc.*, 193, A.
- THORNTHWAITE (C.W.), 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, p. 55-94.
- TURC (L.), 1953. *Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. Thèse, Paris.
- TURC (L.), 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, 12 (1) : 14-49.
- TURC (L.), 1967. Incidence des facteurs macroclimatiques sur les productions végétales. *Fourrages*, 31.
- TURC (L.), 1981. Mémoire sur les travaux. Inra (non publié).
- TURC (H.), HLAVEK (R.), GOBILLOT (T.), LECARPENTIER (C.), 1963. Cartes d'évapotranspiration potentielle. Interprétation et utilisation. *Bull. Tech. Génie Rural*, 60, 20 p., 9 cartes.
- TURC (L.), LECERF (H.), 1972. Indice climatique de potentialité agricole. *Sci. Sol*, 2 : 81-102.
- ZAHEDI (F.), 1966. *Etude sur les besoins en eau d'irrigation de l'Iran*. Thèse docteur-ingénieur, Paris.