



Nappe de ruissellement sur une route.

Photo Sarlin.

ÉCONOMIE DE L'EAU ET TRAVAIL DU SOL DANS LES PLANTATIONS FORESTIÈRES DE ZONE SÈCHE APPLICATION A LA ZONE SAHELO-SOUDANAISE

par
Y. BIROT et J. GALABERT
Centre Technique Forestier Tropical
Niger, Haute-Volta

SUMMARY

WATER ECONOMY AND SOIL WORKING IN FOREST PLANTATIONS IN A DRY ZONE

In the Sahelian-Sudanese regions, deforestation and the low productivity of natural plant formations lead the forestry worker to have recourse to artificial replanting.

The main obstacle to these operations is a difficult climate whose various factors combine to produce an imbalance in the water supply of plant life. The authors analyse the climatic factors and their biological consequences ; the combination of these factors is seen in a demand for water : potential evapotranspiration.

On the basis of examples drawn in particular from research conducted by the C. T. F. T. in Haute Volta, they illustrate plant response to this climatic demand. Survival during the dry season and improvement in wood production depend on the extent to which real evapotranspiration (offer) approaches potential evapotranspiration (demand).

The authors conclude the necessity of working the soil, which should make possible an increase in the amount of water stored in the soil, and a better exploitation of these reserves by a more highly-developed radicular system.

RESUMEN

ECONOMIA DEL AGUA Y TRABAJO DEL SUELO EN LAS PLANTACIONES FORESTALES DE ZONA SECA

En las regiones Sahelo-Sudanesas la tala de los árboles y la reducida productividad de las formaciones vegetales naturales, conducen a las empresas forestales a recurrir a las repoblaciones artificiales.

El principal obstáculo para estas operaciones se deriva de un clima difícil, cuyos distintos factores contribuyen a un desequilibrio en la alimentación hídrica de los vegetales. Los autores analizan los factores del clima y sus consecuencias biológicas, y, a lo seguido, la combinación de estos factores, que se manifiesta por una demanda de agua, o sea, la evapotranspiración potencial.

A partir de ejemplos derivados, en particular, de las investigaciones llevadas a cabo por el C. T. F. T. en Alto Volta, se ilustra la respuesta de los vegetales a esta demanda climática. La supervivencia durante el transcurso de la temporada seca y la mejora de la producción leñosa quedan bajo la dependencia de la aproximación de la evapotranspiración real (oferta) a la evapotranspiración potencial (demanda).

Los autores llegan a la conclusión de la necesidad del trabajo del suelo, que debe permitir :

- Un aumento del almacenamiento del agua por el suelo.
- Un mejor aprovechamiento de estas reservas por un sistema radicular más desarrollado.

INTRODUCTION

Dans l'ensemble des climats tropicaux secs (classe III de Aubreville), la zone écologique sahélo-soudanaise est définie par cet auteur avec une pluviométrie allant de 400 à 1.200 mm (presque toujours inférieure à 1.000 mm). La saison des pluies est courte avec 2 à 4 mois très pluvieux maximum au mois d'août. La saison sèche est rigoureuse avec 6 à 8 mois secs, plus rarement 5. L'indice des saisons pluviométriques est, toujours d'après le même auteur, 4-2-6 (4 mois où $P > 100$ mm, 2 où $30 < P < 100$, 6 où $P < 30$ mm) le plus fréquemment ; c'est le cas par exemple de Ouagadougou, mais cet indice est susceptible de varier. Dori par

exemple a un indice de 2-2-8. Les températures moyennes sont élevées dans l'ensemble avec une saison fraîche marquée. Le déficit de saturation moyen est très élevé ; de faible valeur en saison des pluies, il atteint des valeurs excessives en saison sèche. Il est encore aggravé par l'harmattan, vent de secteur NE très fréquent en saison sèche. Cette aire climatique est une bande de largeur 3 à 4° de latitude légèrement inclinée sur les parallèles. La limite nord atteint au Sénégal 16° de latitude nord et s'abaisse dans la vallée du Nil vers 12 ou 13° de latitude nord. Cette zone englobe donc une partie du Sénégal, du Mali, de la Haute-Volta, du Niger et Nigeria, du Tchad, du Cameroun, etc..., son aire recouvre donc des superficies considérables (voir fig. 1).

Cette vaste zone de sayane, arborée ou arbustive et passant vers le nord à la steppe, dispose toutefois de ressources forestières qui, jusqu'à présent, ont permis tant bien que mal à l'homme de subvenir à sa consommation en produits ligneux, essentiellement le bois de feu ou de carbonisation, et le bois de service, gaulettes, perches de construction. Étant donné la sévérité du climat sahélo-soudanais, la productivité de ces formations naturelles est très faible. Quelques chiffres tirés des études réalisées par le C. T. F. T. Niger-Haute-Volta sont donnés dans le tableau n° 1.

En plus de ces rendements très faibles, il convient de remarquer que la qualité technologique des produits est loin d'être satisfaisante, en particulier en ce qui concerne les perches de construction, longueur et forme, étant donné l'anatomie des essences autochtones en général.

L'homme, en exploitant ces formations forestières, crée actuellement un déséquilibre dans un certain nombre de régions. Ce problème du déboisement et de la reconstitution trop lente des réserves se pose avec acuité dans les zones à forte densité de population, par exemple l'Ader Douchi-Maggia au Niger, le pays Mossi en Haute-Volta et d'une façon

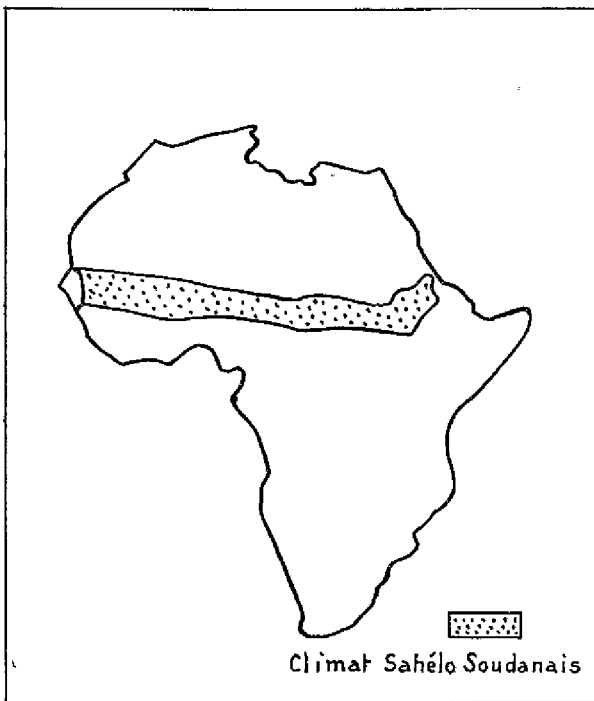


Fig. n° 1.

TABLEAU N° 1

Productivité de quelques formations naturelles

Stations	Pluviométrie mm	Productivité St/ha/an
Forêt cl. de Dinderesso (Bobodioulasso, Haute- Volta) *.....	1.180	2,7
Forêt cl. de Gonsé-Oua- gadougou, Haute-Volta	850	2,1
Formations forestières de la région de Ouahigouya Haute-Volta	730	1-1,5
Forêt cl. de l'Aviation Niamey, Niger	610	2
Peuplements forestiers de l'Ader Douchi, Niger..	500	1-1,5

* Cette station se trouve en limite nord de la zone soudano-guinéenne.

générale autour des centres urbains, Niamey, Ouagadougou, etc... En outre, les distances d'exploitation, donc les transports, s'accroissent exagérément. Les problèmes de conservation des sols, qui se posent dans la plupart des cas en zone sahélo-soudanaise, de même que les problèmes d'aménagement de l'espace rural, brise-vent, haies vives, bandes boisées, etc... sont également très importants à résoudre.

Pour faire face aux besoins en produits ligneux qui vont croissant avec l'expansion démographique, pour l'aménagement de l'espace rural, il est donc nécessaire de faire appel aux reboisements artificiels, qui devraient permettre d'obtenir dans des délais rapides, avec une certaine rentabilité, des produits technologiquement satisfaisants en bois de feu et de service.

Dans la réalité cette idée s'avère très difficile à appliquer et peu de tentatives ont été entreprises; c'est ainsi qu'au Niger les premiers reboisements non arrosés et installés dans des conditions moyennes en excluant certains bas-fonds ou bords de mare ont été réalisés en 1965. Même avec des objectifs limités qui excluent toute idée de production de bois d'œuvre, les difficultés du reboisement artificiel sont considérables. Quelles en sont les raisons? Quels sont les obstacles?

Savane soudanaise. Gonsé. Haute-Volta.

Photo Letourneux.

La brève définition du climat de la zone sahélo-soudanaise donnée plus haut laisse entrevoir que les facteurs climatiques seront le principal adversaire du forestier, ils se conjuguent pour limiter le facteur principal de la croissance, l'eau. Malheureusement, le climat est difficilement modifiable, tout au moins à court terme et dans l'état actuel de nos connaissances. Cependant, le facteur sol est lui plus facilement à notre portée. On peut lui faire subir des modifications dans ses propriétés physiques et chimiques, par des façons culturales, des amendements et des engrais, etc... C'est donc dans le sens d'une amélioration de ces propriétés qu'il faut agir, et en particulier dans les relations du sol et de l'eau puisque c'est le facteur limitant. Ces améliorations peuvent se faire surtout par la mise en œuvre de techniques culturales adaptées aux plantations forestières, en relation avec les caractéristiques des climats et des sols. On est porté à penser que plus un climat est aride plus des techniques élaborées permettant le stockage et l'économie de l'eau doivent être utilisées au maximum, autrement dit plus intensive doit être la sylviculture. Sylviculture veut dire culture de l'arbre, ce sens a vraiment toute sa valeur dans les plantations forestières en zone sèche si on veut les voir aboutir.

Bien plus même, il se peut que ces façons culturales soient la condition nécessaire non seulement de la productivité mais encore de la survie d'un peuplement forestier.

Les plantes cultivées sont annuelles pour la



plupart et ont une durée de vie ramenée à la saison des pluies, et sont l'objet de façons culturales : labours, binages, etc... Les arbres sont des plantes cultivées qui doivent passer les saisons sèches successives; des objectifs de rentabilité nous demandent une bonne reprise et une croissance rapide, utilisons donc les techniques les plus susceptibles de nous mener à ces objectifs. L'exemple des forestiers d'Afrique du Nord et d'Israël en est la meilleure preuve.

Le problème de la dynamique de l'eau nous est donc apparu très important pour la réussite des plantations forestières en zone sahélo-soudanaise, et une meilleure connaissance des phénomènes bioclimatologiques des relations eau-sol-plante-climat nous a semblé nécessaire. Nous avons été guidés dans ces recherches par R. CATINOT, Directeur des Recherches Forestières au C. T. F. T. qui, le premier, a saisi le caractère fondamental du problème. La présente étude étayée par les résultats

de nos recherches menées au C. T. F. T. Niger-Haute-Volta, vise à faire le point des difficultés qui s'opposent au forestier de zone sahélo-soudanaise. Nous avons en outre cherché à expliquer l'action simultanée de l'ensemble des facteurs, climat, sol, plante, et de leur relation entre eux, sur le développement des plantations forestières. Enfin, nous avons donné les résultats acquis sur nos stations grâce aux expérimentations en cours. Nous nous attacherons donc essentiellement aux problèmes d'économie de l'eau et de travail du sol vus sous un angle dynamique, à l'exclusion d'autres techniques sylvicoles : fertilisation dont certains aspects interfèrent avec l'économie de l'eau, traitements phytosanitaires, pépinières, etc...

Pratiquement bien des points évoqués au cours de cette étude débordent le cadre de la zone sahélo-soudanaise et sont susceptibles d'application dans d'autres zones tropicales sèches.

LES OBSTACLES BIOCLIMATOLOGIQUES AUX PLANTATIONS FORESTIÈRES

Introduction

Dans les nos 111 et 112 de *Bois et Forêts des Tropiques* des mois janvier-février et mars-avril 67, CATINOT dans son article « Sylviculture tropicale dans les zones sèches de l'Afrique » avait souligné l'importance du facteur eau dans les reboisements en zone sahélo-soudanaise, et surtout la sévérité du climat ; en le comparant à des régions réputées sèches : Afrique du Nord, Israël, il montrait au moyen des courbes ombrothermiques de GAUSSEN

que le déficit en eau était, à pluviométrie égale, deux à trois fois plus accusé en zone sahélo-soudanaise que dans ces régions méditerranéennes. Nous ne reviendrons pas sur ces grandes lignes déjà très bien décrites, mais nous voulons préciser certains points et les approfondir au moyen des observations d'ordre bioclimatologique qui ont pu être nouvellement conduites sur les stations du C. T. F. T., ou qui sont issues d'autres sources.

Les paramètres du climat Quelques conséquences biologiques

Nous allons examiner ici l'ensemble des facteurs climatiques et voir comment ils sont favorables ou défavorables au forestier, par leur action sur les végétaux.

La pluviosité.

La pluie est le facteur essentiel, son efficacité dépend de plusieurs paramètres :

— LA QUANTITÉ ANNUELLE : Pour la zone sahélo-soudanaise, elle varie de 1.000 à 400 mm, en deçà on passe à la zone sahélo-saharienne et au désert. Compte tenu des autres paramètres du climat, que

nous verrons plus loin (température et déficit de saturation), ces valeurs sont qualifiées par AUBREVILLE de « faibles » à « très faibles ». Ces quantités varient assez régulièrement en isohyètes disposées sensiblement selon les parallèles, au fur et à mesure que l'on remonte vers le Nord. C'est ainsi qu'en Haute-Volta, Fada a une pluviosité moyenne de 900 mm et Markoye sensiblement sur le même méridien une pluviosité de 498 mm. Au Niger, Birni N'Konni reçoit en moyenne 572 mm, Tahoua sensiblement sur le même méridien en reçoit 398.

Le phénomène de la rosée qui pourrait constituer dans certains cas un apport complémentaire

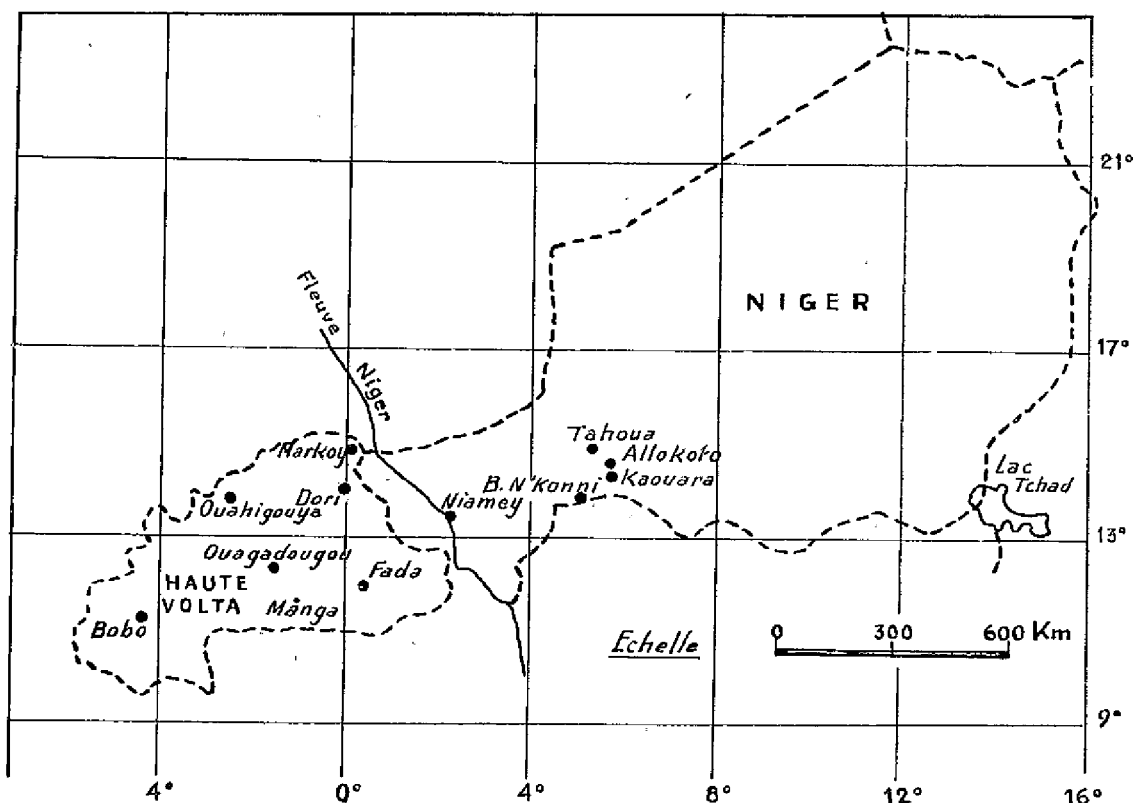


FIG. n° 2. -- Carte de situation.

précieux à la pluviosité, dans des climats secs, ne joue ici que pendant la saison des pluies. Ces faibles quantités de pluie constituent donc déjà en elles-mêmes des conditions défavorables à la vie végétale, qui elles aussi s'aggravent sensiblement en allant du sud vers le nord, mais d'autres facteurs entrent également en jeu.

— LA RÉPARTITION DES PLUIES : Comme nous l'avons vu, la pluviosité de la zone sahélo-soudanaise est définie par les indices de saison suivants : 4-2-6 assez fréquent, 2-2-8 indice valable pour le nord de cette zone. Ce qui frappe est donc bien sûr la longueur de la saison sèche, de 6 à 8 mois, et la brièveté de la saison des pluies qui est elle très humide ; 2 à 4 mois où la pluviométrie est supérieure à 100 mm par mois. Le graphique n° 12 donne la répartition et la quantité de pluies pour un certain nombre de stations. La saison des pluies est trop courte et trop pluvieuse, c'est-à-dire qu'une partie importante de l'eau est perdue par évaporation, ruissellement ou drainage suivant les types de végétation ou de sol. A égalité de pluviométrie, il apparaît donc que des pluies étalées sur une durée plus longue seraient beaucoup plus favorables au forestier. Pour cette raison il est possible que deux stations A et B sur des sols identiques, ayant des pluviosités PA et PB avec $PA > PB$ mais réparties sur

la même durée, aient finalement la même valeur pour le reboiseur si les précipitations supérieures de A ne sont pas stockées par le sol. Nous reparlerons de ce problème essentiel plus loin.

Il convient de noter que cette répartition des pluies dans le temps est calquée par une répartition dans l'espace. Plus on monte vers le Nord plus l'hivernage commence tard et plus il finit tôt.

Enfin, on peut remarquer que le nombre de jours de pluie par an est faible, de 70 à 35. Cela augmente encore le caractère « concentré » des pluies et nous amène alors à envisager la structure unitaire des pluies, en particulier leur durée et leur intensité, leur hauteur unitaire.

— LA STRUCTURE DES PLUIES : Les observations pluviométriques figurent rarement dans les statistiques météorologiques, nous emprunterons nos exemples aux observations effectuées par le C. T. F. T. Niger-Haute-Volta sur ses stations de mesure de l'érosion.

Sans atteindre les intensités et les durées des pluies de Basse Côte par exemple, les pluies sont, en général, caractérisées par leur faible durée et leur violence.

Ce sont très fréquemment des pluies d'orage qui surviennent brutalement surtout en juin, juillet et septembre, les pluies d'août étant souvent du

TABLEAU N° 2

Station d'Allokoto, Fréquences des pluies par classes d'intensité maximale et de hauteurs unitaires
(Calculé sur 3 ans 1966 à 1968)

Intensité maximale mm/h	0-25	25-50	50-75	75-100	100-125	125-150	150-175
Fréquence % ..	51,64	17,21	11,48	12,3	4,92	1,64	0,82
Hauteurs mm ..	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
Fréquence % ..	58,2	22,3	11,48	4,92	2,46	—	0,82

type mousson. Les intensités maxima instantanées peuvent atteindre 200 mm/h et exceptionnellement les dépasser. Le tableau n° 2 donne pour la station d'Allokoto, le nombre de pluies par classe d'intensité (moyenne sur 3 ans). La figure n° 3 représente le hyéogramme, c'est-à-dire la variation de l'intensité d'une pluie en fonction du temps au cours d'une averse.

La violence assez fréquente de ces pluies fait que leur efficacité est diminuée dans la mesure où le sol ne peut absorber de telles intensités et où le ruissellement est déclenché, donc une partie de l'eau est perdue pour les végétaux. Nous étudierons et précisons ce phénomène du ruissellement un peu

plus loin. Intensité forte, ruissellement sont en outre la cause de l'érosion des sols.

— L'IRRÉGULARITÉ DES PLUIES : Comme dans tous les climats tropicaux, l'irrégularité des pluies dans leur répartition de même que quantitativement est extrême en zone sahélo-soudanaise où les années sèches à répartition mauvaise peuvent entraîner de véritables catastrophes. Voici quelques exemples qui montrent que les valeurs moyennes ne sont qu'indicatives. A Markoye où la pluviosité moyenne (sur 10 ans) est de 498 mm, on a noté en 1965 : 282 mm, en 1966 : 372 mm, en 1967 : 398 mm. Sur la station de Saba (15 km à l'est de Ouagadougou), on a noté 717 mm en 1965, 738 en 1966 contre une moyenne (10 ans) de 893 mm. En 1966 on n'obtint à Ouagadougou 673 mm au lieu de 859 en moyenne.

Le tableau n° 3 donne quelques exemples d'irrégularité. La figure n° 4 donne, pour la station de Manga qui peut être considérée en limite sud de la zone sahélo-soudanaise, l'image de ces phénomènes.

Il faut également remarquer que ces écarts de pluviométrie dans le temps peuvent également se produire dans l'espace.

FIG. n° 3. — Hyéogramme typique de précipitation orageuse.

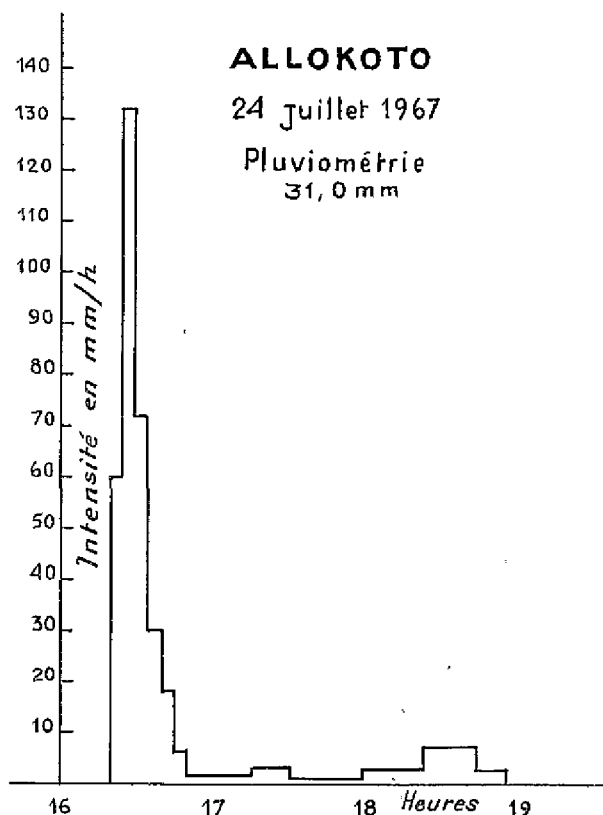


TABLEAU N° 3

Irrégularité de la pluviosité annuelle

Pays	Station	Valeur la plus faible mm	Moyenne mm	Valeur la plus élevée
N I G E R	Bitni N'konni...	354	598 sur 22 ans	990
	Madaoua	244	588 sur 22 ans	830
	Tahoua	210	399 sur 22 ans	545
H A U T E V O L T A	Ouagadougou ...	498	859 sur 30 ans	1.123
	Kaya	529	709 sur 30 ans	1.007
	Ouahigouya	418	734 sur 30 ans	940

Enfin, il faut noter que l'irrégularité affecte également la répartition. Août est habituellement le mois le plus pluvieux, mais parfois c'est juillet ou septembre.

Voici un exemple pour la station de Ouagadougou.

Mois	Pluviosité 1965	Moyenne sur 30 ans
Mai	145	80
Juin	46	112
Total	191	192

Si le total est le même, les conséquences agronomiques sont évidemment très différentes.

L'irrégularité pluviométrique très grande dans la répartition et quantitativement est un facteur extrêmement néfaste pour l'agronome et le forestier, peut-être plus que la faiblesse relative des quantités moyennes.

En effet, plus la pluviométrie est faible, plus aléatoires sont les chances de réussite des végétaux cultivés, les arbres en particulier. Alors qu'avec une pluviométrie faible mais normale et égale à la moyenne, on peut mettre en place des plantations forestières, une seule année sèche ou *a fortiori* plusieurs années sèches consécutives peuvent amener le déséquilibre dans le bilan de l'eau et conduire rapidement à la mort du peuplement. Nous avons pu constater ce phénomène en particulier sur notre station de Gonse en Haute-Volta : après 2 saisons de pluies 1965 et 1966 déficitaires, un dessèchement brutal allant jusqu'à la mort s'est produit sur certaines parcelles au cours de la saison sèche 66-67, pour des arbres ayant entre 2 et 4 ans.

Plus que la faiblesse relative d'une saison des pluies trop courte, c'est donc ce caractère d'irrégularité des pluies qui est le principal adversaire du forestier en climat sahélo-soudanais. La longue saison sèche est difficile à passer si les réserves en eau du sol sont trop faibles ou insuffisamment reconstituées. L'eau est bien le facteur limitant des plantations forestières en zone sahélo-soudanaise.

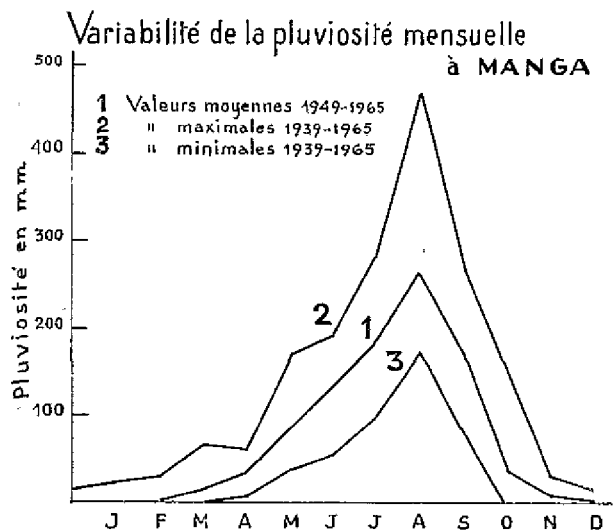


FIG. n° 4. — D'après J. C. KLEIN.

La température : La température agit sur les végétaux de plusieurs manières, directement par la température de l'air, à la surface du sol et dans le sol, indirectement par son influence sur le déficit de saturation et l'évapotranspiration potentielle. Nous n'envisagerons ici que les phénomènes température proprement dits.

— LA TEMPÉRATURE DE L'AIR : Les valeurs moyennes annuelles sont dans l'ensemble très élevées, à Ouagadougou 28°, 2, à Dori 28°, 5.

Les valeurs moyennes mensuelles données sur les graphiques ombrothermiques (fig. n° 12) montrent l'existence de 2 maxima, l'un en avril, l'autre en octobre et de 2 minima, l'un en janvier, l'autre en août qui correspondent respectivement à la saison fraîche et à la saison des pluies.

Le maximum d'avril est situé en fin de saison sèche au moment le plus « critique » pour les végétaux. Il peut atteindre des valeurs considérables (cf. tableau n° 4).

L'examen de ce tableau fait apparaître des maxima élevés et des minima assez bas surtout en saison fraîche et d'autant plus que l'on monte vers le Nord (Dori). Les maxima absolus sont de 45°, 6 à

TABLEAU N° 4

Maxima et minima mensuels moyens sous abri (d'après ASEGNA)

Station	T°	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ouagadougou	Maxi .	34,3	36,7	38,6	39,1	37,0	33,8	31,6	30,3	31,8	35,7	36,7	34,3
	Mini .	16,5	19,2	22,9	25,7	25,1	23,1	22,4	21,5	21,6	22,2	20,3	17,1
Dori	Maxi .	33,6	36,5	39,1	41,3	40,8	37,8	33,9	31,9	34,0	38,0	37,7	33,8
	Mini .	13,6	15,9	19,8	23,9	26,3	25,0	23,2	22,3	22,6	22,0	18,0	14,2

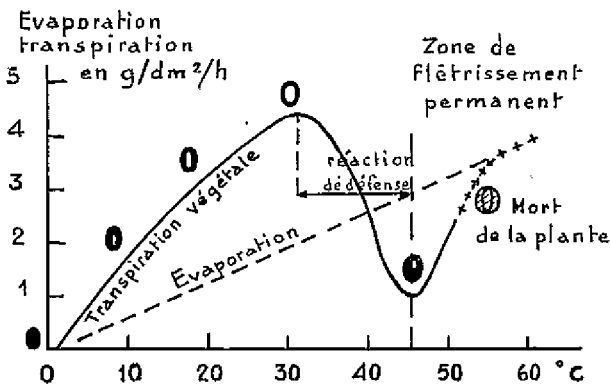


Fig. n° 5. — Variation de la transpiration en fonction de la température (d'après P. BINET-J. P. BRUNEL).

Dori, 42°, 6 à Ouagadougou au mois d'avril. Les amplitudes quotidiennes sont élevées particulièrement en saison fraîche.

Ces températures excessives jouent évidemment sur le déficit de saturation et l'évapotranspiration potentielle, comme nous le verrons plus loin, mais elles ont aussi un effet direct sur les végétaux puisqu'elles provoquent la fermeture des stomates, qui interdit du même coup transpiration et assimilation chlorophyllienne la photosynthèse s'annule même à 40 ° C (pour un végétal bien alimenté en eau), cf. figure n° 5.

En fait, l'action de la température est difficile à séparer de l'action du déficit de saturation et de la lumière.

— TEMPÉRATURE AU SOL : Cet élément est important à prendre en considération car il influe directement sur les organes végétaux placés à ce niveau : le collet en particulier. Le tableau n° 5 nous donne les valeurs maxima et minima des températures au sol pour les stations de Ouagadougou et Dori.

Ces températures sont très élevées en particulier aux mois d'avril et mai, d'autant plus que l'on monte

TABLEAU N° 5

Température au sol des moyennes, maxima et minima (d'après ASEONA)

Mois	Dori		Ouagadougou	
	Maxi	Mini	Maxi	Mini
J	41,2	10,3	39,1	12,7
F.	44,2	12,5	42,0	14,0
M.	49,9	16,5	45,2	19,5
A.	56,4	21,0	46,1	23,9
M.	56,0	23,2	43,9	24,4
J.	51,9	22,6	40,3	22,9
J.	46,0	21,6	38,0	21,1
A.	43,2	21,3	36,4	21,3
S.	45,6	21,7	38,1	21,3
O.	47,7	20,0	42,0	21,5
N.	45,3	15,6	42,0	17,5
D.	40,2	11,7	39,0	13,8

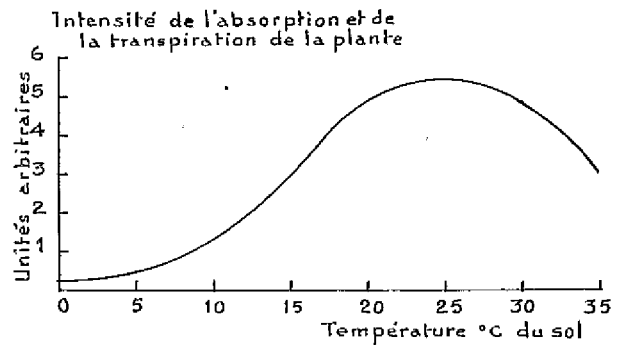


FIG. n° 6. — d'après P. BINET et J. P. BRUNEL.

vers le Nord. Elles peuvent être la cause de certains brûlures au collet dans le cas de microtopographie particulière ; elles peuvent occasionner au tronc des dessèchements intenses qui conduisent à un véritable éclatement du bois.

Sur le plan de la fertilité, ces températures au sol (et également dans le sol) provoquent une destruction rapide de la matière organique et un durcissement des horizons supérieurs, cas fréquent sur les sols ferrugineux tropicaux. Ces modes d'action tendent donc à une dégradation des propriétés physiques (et chimiques) du sol, de la structure en particulier. Dans certains cas le durcissement peut aller jusqu'au stade de la carapace. Le sol est alors perdu pour le forestier et l'agronome.

- LA TEMPÉRATURE DU SOL : Elle est importante à considérer car elle a une action directe sur l'absorption d'eau par les racines, donc sur la transpiration et l'assimilation chlorophyllienne, par conséquent sur la production de matière sèche (voir fig. n° 6).

Le taux d'humidité d'un sol étant constant, sa température peut donc influencer beaucoup sur l'absorption de l'eau par les racines.

Dans une certaine mesure des températures élevées par le fait qu'elles réduisent la transpiration peuvent donc être favorables pour des sols peu pourvus en eau ce qui est le cas général.

Par contre, il ne faut pas perdre de vue que les températures au sol et dans le sol ont une action directe sur le dessèchement de celui-ci par évaporation.

Le tableau n° 6 nous donne les températures moyennes dans le sol (0,30 m et 0,60 m) à 6 h 00. Les valeurs les plus élevées se situent en avril-mai. Les températures sont toutes supérieures à 25 °C, température qui pourrait être la plus favorable à l'absorption de l'eau par les racines. Ces températures élevées laissent également prévoir un dessèchement du sol important par le jeu des mouvements capillaires, par l'évaporation physique directe.

Notons pour terminer que la nature du sol peut influencer beaucoup sur sa température et surtout sur la vitesse des changements de température.

TABLEAU N° 6

Températures moyennes dans le sol à 6 h 00
(d'après ASEGNA)

Mois	Dori		Ouagadougou	
	0,30 m	0,60 m	0,30 m	0,60 m
J	24,8	26,2	26,2	28,3
F	27,0	27,9	28,2	29,8
M	30,9	31,4	31,8	32,9
A	34,7	34,6	34,5	35,4
M	36,2	36,0	34,1	35,3
J	34,3	35,3	31,3	32,9
J	31,1	32,5	29,4	31,0
A	29,5	31,0	27,7	29,2
S	30,3	31,9	28,3	29,6
O	32,2	33,5	31,2	32,4
N	25,2	30,9	30,6	32,3
D	25,8	27,8	27,0	30,3

Le déficit de saturation : Il exprime la différence entre la tension maximum de la vapeur d'eau à la température de l'air et la tension réelle (tension maximum de la vapeur d'eau à la température du point de rosée), alors que le taux d'humidité représente le quotient de ces deux valeurs. Cette grandeur caractérise donc le « pouvoir évaporant » de l'air.

La figure n° 7 donne l'évolution du déficit de saturation moyen mensuel, mesuré à 16 h 00 et 12 h 00 sur les stations de Dori et de Ouagadougou. On voit qu'à l'échelle de l'année les variations sont importantes, avec 2 maxima, l'un en mars-avril, l'autre en octobre-novembre et minimum en août, au plus fort de la saison des pluies.

En saison sèche, le déficit de saturation atteint à 12 h 00 des valeurs considérables, d'autant plus élevées que l'on se rapproche du Sahel. Pourtant 12 h 00 n'est pas l'heure où le déficit de saturation est maximum, ce n'est d'ailleurs pas non plus l'heure de température maximum. Des observations faites au C. T. F. T. sur la station forestière de Gonse montrent que le déficit de saturation peut atteindre jusqu'à 70 mb, ce qui est évidemment très élevé.

La figure n° 8 donne l'évolution de l'humidité relative et du déficit de saturation au cours d'une journée, sur la station forestière de Gonse, les mesures sont faites à l'intérieur d'un peuplement d'eucalyptus. Elle montre clairement l'extrême siccité de l'air, donc la forte « demande » d'eau qui est faite au sol et au végétal. Celui-ci même bien alimenté en eau peut réagir en fermant ses stomates. Ce facteur combiné à la température va jouer également sur l'évaporation du sol. Le déficit de saturation apparaît comme l'un des principaux facteurs du climat qui agissent sur la physiologie de la plante.

Le vent : Le régime des vents peut se diviser clairement en deux :

Un régime de saison des pluies, un régime de saison sèche.

La figure n° 9 (p. 38) donne la rose des vents pour les stations de Ouagadougou et Dori. Le tableau n° 7 (p. 38) donne la fréquence de la force des vents au sol pour ces 2 stations.

L'examen simultané de ces 2 types de données montre que le régime de saison des pluies est de secteur S, SW, régime de mousson. Le régime de saison sèche fait apparaître des vents de secteur E à WE. Ce vent souvent assez fort est extrêmement sec, c'est l'harmattan en provenance de l'anticyclone Saharien, il souffle de novembre à avril. Sous son action, les nappes d'eau s'évaporent rapidement, les végétaux sont desséchés, parfois « grillés ». Ce vent souffle au moment où le déficit de saturation est maximum, il accroît donc encore la demande en eau.

Ce facteur est essentiel à connaître pour le forestier, et il faut y insister, car nous avons tendance trop souvent à ne parler que de la pluviométrie, pour établir des comparaisons entre 2 zones climatiques. Par exemple, il existe des différences fondamentales entre le climat sahélo-soudanais et certains climats sénégalais, à pluviosité égale, du fait de l'existence de déficits de saturation élevés et de l'harmattan dans un cas, de l'influence océanique dont l'action est à l'inverse des facteurs précédents, dans l'autre.

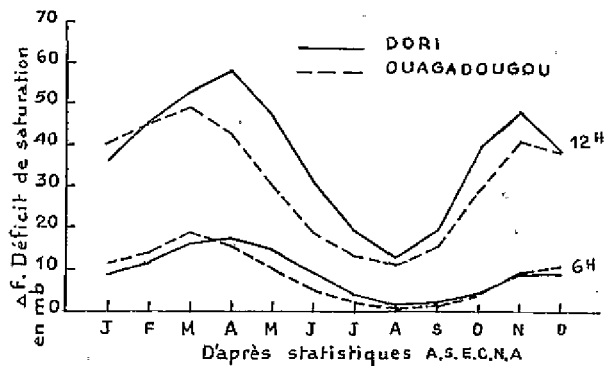


Fig. 7. — Déficit de saturation mensuel moyen à 6 h et 12 h.



Fig. 8. — Station forestière de Gonse, 27 février 1968.

TABLEAU N° 7

Fréquence des forces du vent en m/s à 12 heures

Mois	Ouagadougou						Dori					
	0-1	2-4	5-6	7-14	15-21	à 21	0-1	2-4	5-6	7-14	15-21	25
J.....	3	63	30	4			9	60	25	6		
F.....	2	60	28	10			9	53	28	10		
M.....	8	54	29	9			11	58	24	7		
A.....	9	67	17	7			17	67	11	5		
M.....	12	59	19	10			13	68	15	4		
J.....	7	59	27	7			12	65	19	4		
J.....	10	52	32	6			14	69	13	4		
A.....	14	51	31	4			22	72	4	2		
S.....	22	64	12	2			36	58	5	1		
O.....	25	68	7	0			38	56	5	1		
N.....	15	64	17	4			22	56	12	10		
D.....	3	66	28	3			10	66	17	7		

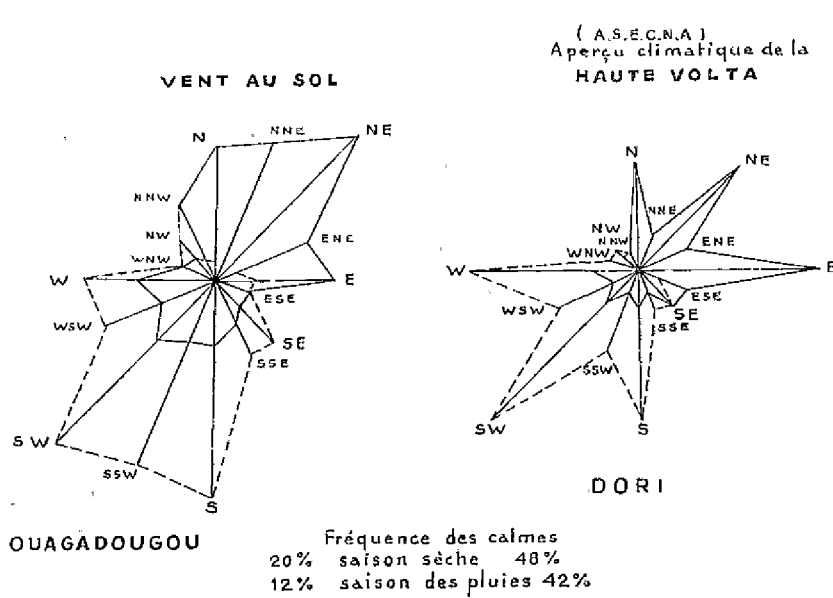
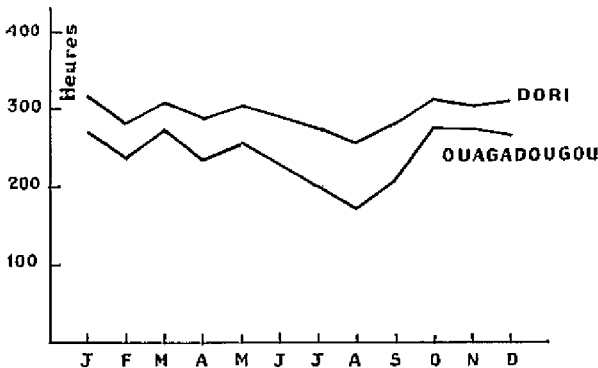


FIG. n° 9.

FIG. 10. --- Variation de la durée mensuelle de l'insolation.
Totaux annuels : Dori : 3.545 heures, Ouagadougou : 2.313 heures.



L'harmattan est donc un facteur des plus contraires au forestier, lorsqu'il est fréquent ou intense, *a fortiori* après une saison des pluies déficitaire, comme ce fut le cas en 1966. Il intervient sur les végétaux plus par son action sur l'élévation du déficit de saturation que par sa vitesse, facteur secondaire, comme nous l'ont montré les études bioclimatologiques menées sur la station forestière de Gonse.

Si on rapproche le tableau de la rose des vents on perçoit nettement l'influence de l'harmattan.

La durée d'insolation et le rayonnement global.

La figure n° 10] montre l'évolution de la durée mensuelle moyenne de l'insolation à Dori et Ouagadougou. Les minima observés s'expliquent par les formations nuageuses de saison des pluies ou les « brumes sèches » de saison sèche. Les valeurs annuelles montrent bien sûr que le climat est très ensoleillé.

Toutefois, il aurait été plus intéressant de connaître la radiation globale, facteur énergétique influant également sur la demande pour l'eau. Aucune station en Haute-Volta n'est équipée de pyranomètre. Nous avons tenté toutefois de connaître le rayonnement global en utilisant la formule de GLOVER et MAC CULLOCH.

$$\frac{RG}{\bar{R}\bar{A}} = 0,29 \cos \alpha + 0,52 \frac{n}{N}$$

où RG = rayonnement global (sur une surface horizontale au niveau du sol).

Fig. n° 11. — Etablie d'après les statistiques A.S.E.C.N.A.

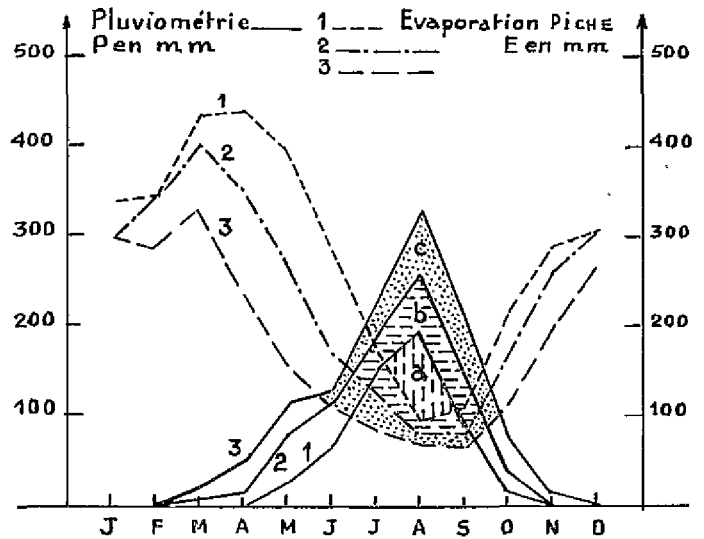
RA = rayonnement extraterrestre = A cal/cm²/min.
 λ en degré de latitude de la station (12° 30 pour Ouagadougou).
 n nombre d'heures d'insolation observées à l'héliographe.
 N nombre maximal possible d'heure d'ensoleillement suivant la latitude et la date.
 Les calculs donnent les résultats suivants qui montrent des valeurs élevées.

TABLEAU N° 8
 Rayonnement global à Ouagadougou

Mois	Rayonnement global cal/cm ² /jour
J	721
F	670
M	699
A	571
M	623
J	588
J	466
A	347
S	490
O	724
N	771
D	668

Ce rayonnement intervient à plusieurs titres :

- par son flux thermique qui sera la cause principale de l'évaporation si on se place à une échelle assez vaste;
- par la radiation lumineuse dont l'action sur l'ouverture stomatique des feuilles et l'assimilation chlorophyllienne est importante à considérer pour la production de matière sèche ; ceci jouera donc également sur la consommation en eau des plantes. Les valeurs instantanées de l'intensité lumineuse peuvent être très élevées ; l'intensité lumineuse sera rarement le facteur limitant, et les stomates se fermeront devant des évaporations instantanées intenses et à cause de la mauvaise alimentation en eau.



1. DORI 2. OUAGADOUGOU 3. BOBO-DIOULASSO
 a : Excédent théorique à DORI
 a+b id à OUAGADOUGOU
 a+b+c id à BOBO-DIOULASSO

L'évaporation : Elle est la synthèse des facteurs du climat en particulier, température, déficit de saturation, vitesse du vent, etc... et traduit la demande climatique pour l'eau. Les chiffres qui sont donnés ci-dessus concernent des observations faites à l'évaporomètre PICHE sous abri. La figure n° 11 donne l'évolution au cours de l'année de l'évaporation mensuelle moyenne pour 3 stations de Haute-Volta. Les valeurs sont énormes, et d'autant plus que l'on va vers le Nord. Les déficits théoriques par rapport à la pluviométrie sont également très élevés.

A l'échelle journalière, les évaporations peuvent être très élevées et dépasser 20 mm parfois.

Cette forte demande pour l'eau, qui excède largement la pluviométrie donc a fortiori les possibilités d'offre, laisse prévoir de graves difficultés pour la vie des végétaux ou tout au moins de mauvais rendements.

La combinaison des paramètres du climat, l'évapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle :

L'évapotranspiration est la quantité d'eau perdue par une surface de sol donnée sous végétation, pendant un temps donné. Il s'agit donc à la fois de la quantité d'eau transpirée par les plantes et de la quantité d'eau évaporée par le sol.

L'évapotranspiration réelle E. T. R. est l'eau

réellement perdue par la surface considérée, alors que l'évapotranspiration potentielle E. T. P. est l'eau susceptible d'être perdue dans les mêmes conditions, quand elle est en abondance dans le sol. Cette dernière valeur est en principe, dans des conditions données, indépendante de la nature du couvert végétal : elle exprime donc la demande climatique.

DIAGRAMMES OMBROTHERMIQUES (Statistiques A.S.E.C.N.A)

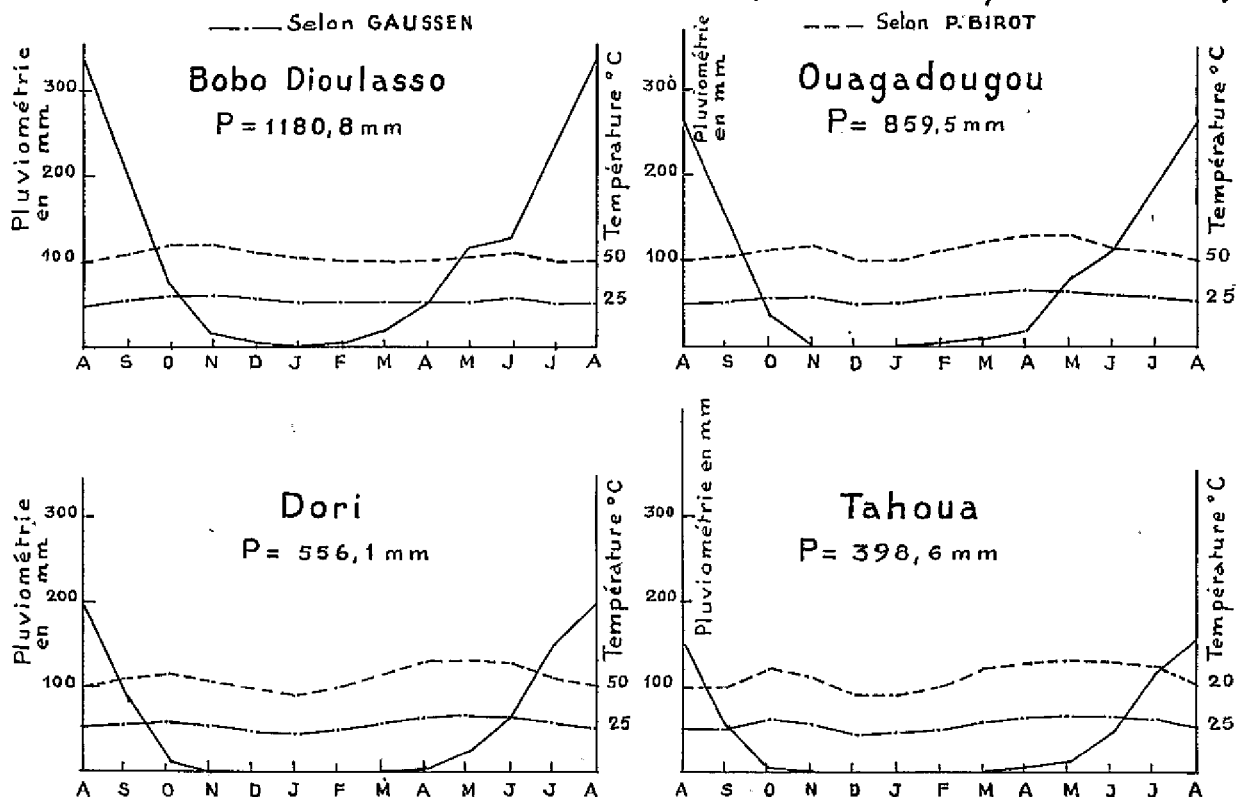


Fig. n° 12.

On peut également formuler ces définitions de la façon suivante. L'évapotranspiration comprend l'évaporation du sol, la transpiration cuticulaire et stomatique du végétal.

L'évapotranspiration potentielle (E. T. P.) est un facteur climatique qui correspond à l'énergie disponible pour la vaporisation ; elle dépend des éléments du climat : rayonnement net, déficit de saturation, température, vent ; elle est égale pendant un temps donné à la perte d'eau maximale en phase gazeuse d'un couvert végétal abondant, continu, en pleine croissance, très largement alimenté en eau.

L'évapotranspiration réelle (E. T. R.) fait intervenir d'autres facteurs limitants tels que l'énergie : facteur eau, physiologie et morphologie du végétal, etc..., elle est inférieure ou au plus égale à E. T. P.

Plusieurs auteurs ont proposé des formules climatiques de E. T. P.

Nous avons représenté sur la figure n° 12 les courbes ombrothermiques de GAUSSEN pour quelques stations du Niger et de la Haute-Volta, cet auteur considère comme arides les mois où la pluviométrie P exprimée en mm est inférieure à deux fois la température moyenne exprimée en °C. En utilisant l'échelle de 1° pour 2 mm on voit qu'en traçant sur

la même figure la pluviométrie, le bilan hydrique apparaît immédiatement. On voit donc nettement des déficits importants, qui vont en augmentant du sud vers le nord, où ils atteignent des valeurs considérables. CATINOT avait utilisé cette méthode pour montrer qu'à pluviométrie égale les conditions écologiques de la zone sahélo-soudanaise étaient beaucoup plus sévères que celles d'Afrique du Nord, ou d'Israël. Nous n'y reviendrons pas.

P. BIROT estime, pour sa part, qu'en climat tropical, il faut considérer comme arides les mois où la pluviométrie est inférieure à $4 T$, T étant la température moyenne mensuelle exprimée en degrés centigrades ; cette approximation est certainement plus voisine de la réalité. Dans ces conditions, l'aridité de la zone sahélo-soudanaise apparaît de façon encore plus évidente.

Se plaçant à une échelle plus restreinte et se fondant sur des considérations théoriques sur le bilan d'énergie, BOUCHET a défini une formule dite du « Piche corrigé » qui, à partir des valeurs journalières relevées à l'évaporomètre Piche, permet le calcul d'E. T. P. Nous avons fait ce calcul pour l'année 1968 (les valeurs données sont les moyennes décennales), pour la station de Ouagadougou. Pour ce calcul nous avons utilisé les résultats acquis sur la station IRAR de Mogtiedo (70 km à l'est de Ouaga-

ougou) où des batteries d'évapotranspiromètres permettent de mesurer E. T. P. (la fig. n° 13 reproduit ces résultats pour 1967 et 1968) et de déterminer les paramètres de BOUCHET. Nous voyons ici encore que l'évapotranspiration atteint des valeurs importantes qui sont toutefois atténuées par la proximité d'une retenue d'eau importante.

Expérimentant à une échelle encore plus fine, au niveau de la feuille dans un peuplement d'*Eucalyptus crebra*, sur la station forestière de Gonse, nous avons pu mettre en évidence des E. T. P. instantanées dépassant 2 mg/cm²/min en saison sèche ; en saison des pluies on a affaire évidemment à des E. T. P. plus réduites.

En résumé, il apparaît que durant une très longue période d'aridité, la demande climatique en E. T. P. est très forte ; comment les végétaux vont-ils répondre à cette demande ?

L'évapotranspiration réelle.

Fort heureusement les plantes et le sol ne suivent pas E. T. P. dans leur déperdition en eau, sinon on aboutirait à un dessèchement absolu du sol et à l'impossibilité d'une végétation pérenne. La plante intervient en réduisant sa transpiration, c'est la régulation stomatique ; quant au sol, le dessèchement initial des horizons superficiels constitue une sorte d'écran qui empêche une trop forte évaporation des horizons sous-jacents, c'est le self mulching dont nous reparlerons plus loin. L'évapo-transpiration réelle E. T. R.

Steppe arbustive à épineux.

Photo Sarlin.

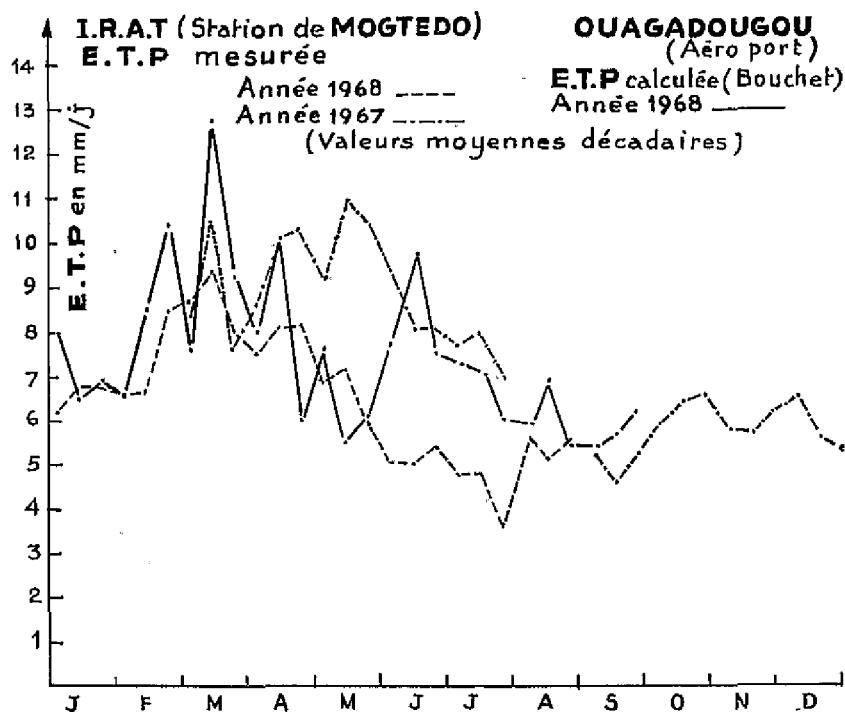


Fig. n° 13.

met donc en jeu le facteur sol et le facteur plante.

Une expérimentation en cours à la station forestière de Gonse sur la dynamique de l'eau dans une plantation d'*Eucalyptus* va nous permettre au moyen de quelques exemples de préciser ces points. Lorsqu'un végétal dispose d'un sol bien alimenté



Evaporation, transpiration et transpiration relative

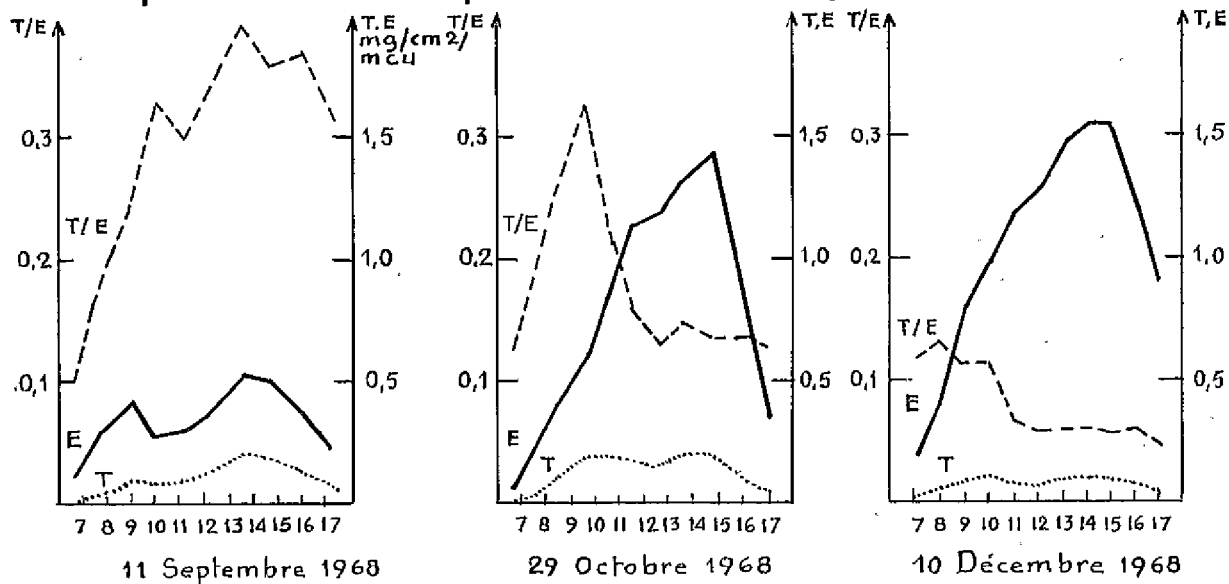


FIG. n° 14

Evaporation, transpiration et transpiration relative chez *Eucalyptus crebra* en fonction de l'eau du sol.

FIG. n° 15.

en eau, s'il est dans de bonnes conditions d'éclaircissement et si l'E. T. P. n'est pas trop forte, ses stomates sont largement ouverts ce qui permet les échanges gazeux et l'assimilation chlorophyllienne donc la production de matière sèche. Durant cette phase la plante perd de l'eau à travers les cellules cuticulaires — c'est la transpiration cuticulaire — mais surtout à travers les ouvertures stomatiques, c'est la transpiration stomatique. Inversement, si le sol a une quantité d'eau disponible faible ou si E. T. P. est trop forte, la plante réagit en fermant ses stomates pour limiter sa déperdition en eau, c'est la régulation stomatique qui limite ou interdit les échanges gazeux donc l'assimilation chlorophyllienne; durant cette phase E. T. R. ne suit pas E. T. P.

La figure n° 15 montre un aspect de cette régulation stomatique. Pour les journées du 29 octobre et du 10 décembre 1968 nous avons fait figurer E. T. P. ponctuelle instantanée (mesurée au niveau de la feuille) représentée par la lettre E, la transpiration végétale T mesurée sur les feuilles d'*Eucalyptus* elles-mêmes, enfin la transpiration relative, c'est-à-dire le

rapport T/E. L'ouverture stomatique augmente lorsque ce rapport augmente, et inversement. Pour ces deux journées dont l'E. T. P. est très voisine on voit tout d'abord que la transpiration est plus élevée le 29 octobre que le 10 décembre, ce qui peut être dû à une différence dans les profils hydriques. Le 29 octobre la fermeture des stomates apparaît nettement à 9 h 20; au-delà la transpiration relative diminue rapidement, la transpiration stomatique cesse (donc l'assimilation chlorophyllienne aussi), seule la transpiration cuticulaire continue. Le 10 décembre, ce décrochement de la transpiration par rapport à E. T. P. est moins net et surtout plus rapide, pratiquement seule la transpiration cuticulaire est en jeu. Il faut dire que ce jour, le sol est au point de flétrissement théorique sur l'ensemble du profil. Durant toute la saison sèche les courbes sont donc du type du 10 décembre. Il n'y a donc transpiration stomatique en saison sèche qu'aux heures de la journée où E. T. P. est suffisamment basse pour mettre en jeu des débits instantanés faibles permettant des mouvements capillaires sans rupture du « lien capillaire »

FIG. n° 16. — Schéma des différentes évolutions possibles de la transpiration selon les conditions d'équilibre ou non de l'alimentation en eau.

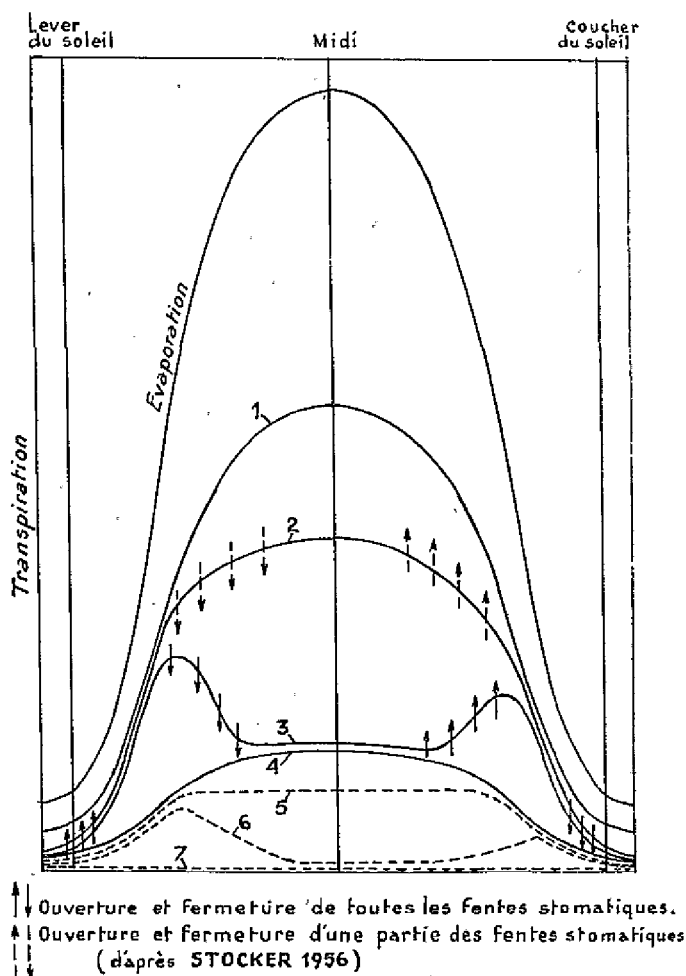
- 1) Stomates constamment ouverts ; la transpiration suit l'évaporation.
- 2) Dépression de midi due à la fermeture des stomates. Stomates fermés la nuit.
- 3) Fermeture complète des stomates au milieu de la journée.
- 4) Fermeture complète. Transpiration cuticulaire proportionnelle à l'évaporation.
- 5) Accroissement de la résistance cuticulaire au milieu de la journée.
- 6) Résistance cuticulaire très forte au milieu de la journée.
- 7) Mauvaise alimentation en eau. Transpiration presque nulle. Résistance cuticulaire constamment forte.

(voir également plus loin les phénomènes de dessèchement). En saison des pluies, où E. T. P. est faible et le sol mieux alimenté en eau, la transpiration reste toujours peu élevée mais les stomates sont alors largement ouverts et les échanges gazeux sont permis. (Cf. fig. n° 14.)

Dans une certaine mesure il pourrait sembler que les valeurs élevées de E. T. P. instantanées ne sont pas si défavorables dans la mesure où elles obligent les plantes à une forte régulation stomatique donc à une réduction importante de la transpiration et surtout à un étalement de la consommation en eau, et certes ce facteur n'est pas négligeable étant donné les faibles réserves en eau du sol. Cependant on a pu observer que la réserve en eau du sol est rapidement épuisée après la saison des pluies. Inversement, en fin de saison sèche, l'abaissement du déficit de saturation avec l'arrivée d'air humide et le début des premières pluies provoque le débouffrage et une transpiration accrue, alors que les réserves en eau du sol sont toujours faibles. Si les pluies ne surviennent pas rapidement, la consommation excessive peut aller jusqu'au dépérissement brutal des arbres, fait observé en mai 1967 après une saison des pluies déficitaire en 1966.

STOCKER cité par de PARCEVAUX (1964) a donné le schéma de l'évolution de la transpiration journalière en fonction de l'évaporation (E. T. P.) suivant les conditions d'équilibre ou non de l'alimentation hydrique (fig. n° 16). L'expérimentation en cours sur la station forestière de Gonse confirme bien ce schéma. Les courbes de transpiration sont la plupart du temps du type 7, 6, 5 ou 4 traduisant donc un déséquilibre dans l'alimentation en eau comme on peut par ailleurs le constater par l'étude des profils hydriques (voir fig. n° 14). Le facteur eau du sol, est donc lui aussi un facteur limitant.

Un exemple emprunté à AUDRY (1967) nous montre toute l'importance qu'il faut attacher à ce problème. Cet auteur a calculé E. T. R. pour une formation naturelle arbustive sur sol ferrugineux tropical faiblement lessivé à Dilbini au Tchad, au moyen de profils hydriques relevés périodiquement (fig. n° 17). Même en année à pluviométrie excédentaire 1964, toute l'eau du sol est consommée dès le 15 novembre, la pluviométrie est donc égale à l'éva-



potranspiration réelle ; de plus, celle-ci est impossible du 15 novembre au 15 avril. Cette étude concernait une formation naturelle peu dense à base de *Sclerocarya birrea*, *Combretum glutinosum*, *Boscia senegalensis*, *Guiera senegalensis*, espèces qui sont toutes à feuilles caduques. Le forestier qui utilise parfois des espèces à feuilles persistantes, comme les *Eucalyptus* par exemple, doit y songer et l'on voit apparaître là toute l'importance du problème de la densité de plantation ; quitte à avoir une production ligneuse diminuée, tout en ayant une meilleure survie par un étalement de la consommation en eau au cours de la saison sèche, le forestier devra choisir des espèces à fort pouvoir régulateur stomatique ; il y a là un aspect génétique à ne pas négliger.

HALLAIRE (1963) montre que le taux d'humidité du sol pour lequel la plante ferme ses stomates et qui constitue donc un seuil est d'autant plus élevé que E. T. P. instantanée est plus forte. Pour assurer la survie et une certaine croissance de nos peuplements forestiers, l'accroissement des réserves en eau du sol semble donc la voie vers laquelle il faut se diriger en priorité.

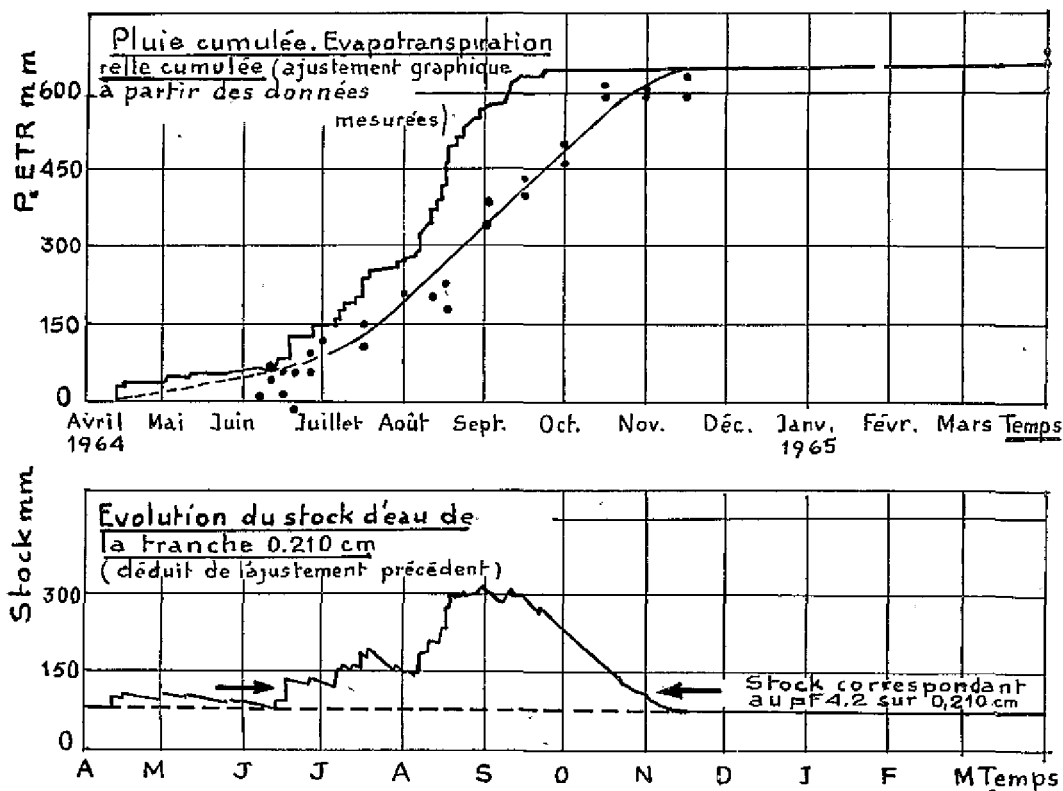


FIG. n° 17.

Conclusions

L'élaboration de matière sèche par les végétaux est sous la dépendance de leur transpiration, au moins dans une certaine mesure. Les recherches entreprises par de nombreux auteurs montrent que cette production est maximale lorsque les besoins en eau « demandés » par les facteurs climatiques (= évapotranspiration potentielle E. T. P.) sont satisfaits. Au contraire, cette production diminue lorsque l'évapotranspiration réelle (E. T. R.) est inférieure à E. T. P.

Ce « décrochement » de E. T. R. par rapport à E. T. P. se produit soit sous la trop forte demande climatique, soit par la trop faible disponibilité de l'eau du sol, ou par ces deux facteurs agissant simultanément. Ce décrochement intervient par la régulation stomatique et cuticulaire du végétal qui réduit la diffusion de la vapeur d'eau mais limite du même coup les échanges gazeux donc l'activité photosynthétique. Ce phénomène peut donc en zone sèche limiter considérablement les rendements, voire interdire la vie végétale elle-même. En effet, dans les régions sahélo-soudanaises, l'E. T. P. est très élevée pendant une grande partie de l'année et les ressources en eau du sol sont faibles.

Le but pour l'Agronome et le Forestier est donc de rendre la plus voisine possible de la demande E. T. P., « l'offre » définie par le débit maximal

Q max. (HALLAIRE 1963). Ce débit est fonction de l'espèce végétale considérée, de son état physiologique et directement des quantités d'eau disponibles dans le sol et de la vitesse d'utilisation de cette eau. Pour cela on peut agir soit sur E. T. P., soit sur Q max., soit sur les deux.

Pratiquement, on abaisse E. T. P. par l'utilisation de brise-vent, mais ceci est plus valable en agriculture qu'en sylviculture encore que l'on puisse l'envisager.

Le forestier agira donc surtout sur les paramètres qui commandent Q max., c'est-à-dire **développement racinaire, humidité du sol, vitesse de dessèchement**. Ceci peut être obtenu soit par le travail du sol et l'irrigation (le forestier utilisera rarement ce deuxième mode d'action, du fait de son coût trop élevé et de la rareté de l'eau), soit par l'élimination de la concurrence herbacée qui est une consommatrice d'eau « parasite » par la pratique du binage.

C'est pourquoi il nous a semblé indispensable de rappeler les relations de l'eau et du sol, puisque ce sont finalement ces réserves en eau qui vont conditionner la vie et la croissance des peuplements forestiers.

(A Suivre)