L'Assistance Météorologique dans la Lutte contre les Incendies de Forêts (Forêts Méditerranéennes)

PAR

**C. BORDREUIL, R. LOMBARDO
A. ORIEUX**

Ingénieurs de la Météorologie

AVANT-PROPOS

La présente Note a été rédigée en fonction de l'Assistance Météorologique pratiquée dans la Région Sud-Est dans la lutte contre les incendies de forêts. Toutefois, la notion de sécheresse fondée sur l'état des réserves en eau du sol (bilan hydrique), qui est la base de cette Note, peut aussi être appliquée en agriculture (irrigations notamment) et en hydrologie.

Chaque année et particulièrement au cours des mois d'été les feux font des ravages considérables dans les forêts des régions méditerranéennes, détruisant des dizaines de milliers d'hectares. Sans vouloir entrer ici dans des statistiques, sans doute difficiles à établir complètement, on peut dire, sans erreur grossière, que 1/5 sinon 1/4 des 1 500 000 hectares de forêts des régions méditerranéennes disparaissent chaque décennie. Ainsi en 40 ou 50 ans, si les incendies se propageaient également partout et s'il n'y avait pas reconstitution au moins partielle, le littoral méditerranéen serait complètement dénudé comme une terre de désolation.

TABLEAU I
FEUX DE FORÊTS

Département des Bouches-du-Rhône	STATISTIQUES (Marins - Pompiers de Marseille)			
—				
Années	1959	1960	1961	1962
	—	—	—	—
Nombre de Feux :				
Marseille	243	493	420	546
Département	400	411	469	661
Total	643	904	889	1 207
Superficies brûlées (en ha).	3 200	4 000	5 669	7 149

Cette image démontre l'ampleur et l'étendue des dégâts, ainsi que les dépenses considérables nécessaires de reconstitution dans certaines zones particulièrement touchées comme le littoral varois, celui des Bouches-du-Rhône ou des Alpes-Maritimes. Or, les rythmes de destruction prennent de telles proportions que les Pouvoirs

Publics admettent maintenant que le problème de la Forêt Méditerranéenne devient un problème national (Voir tableau I pour les B.D.R.). L'équilibre de la Provence, comme celui du Languedoc et du Roussillon, dépend en effet du maintien de cette forêt.

Puisque la modification artificielle du temps n'est pas encore à l'ordre du jour, du moins dans le domaine de l'exploitation, comment la Météorologie peut-elle fournir une assistance utile dans cet important domaine?

A. — LE RÔLE DE LA MÉTÉOROLOGIE

Le problème de la forêt méditerranéenne a deux aspects :

- un aspect actif : le reboisement,
- un aspect passif : la lutte contre les incendies.

En ce qui concerne l'aspect actif, l'importance de l'apport de la Météorologie est incontestable : études de climatologie statistique et dynamique à différentes échelles (micro-climats et meso-climats).

Pour l'aspect passif, tous ceux qui ont eu à lutter contre les incendies de forêts dans les régions méditerranéennes savent combien ce danger relève *tout d'abord du climat* :

- *Étés chauds et secs*, où le minimum pluvieux très marqué de juillet coïncide à peu près avec un maximum thermique relativement élevé.
- *Vents dominants de NW*, de type mistral, toujours secs et desséchants, souvent assez violents en été pour attiser les moindres foyers et propager ce fléau avec une surprenante rapidité.

Les faits eux-mêmes posent ainsi la question de l'assistance météorologique dans ce domaine. Il n'est évidemment pas question pour elle d'agir sur les causes du fléau qui lui échappent totalement. Mais l'expérience des années précédentes a mis en évidence le double rôle de la Météorologie en cette matière :

- Une assistance préventive à moyenne et courte échéance.
- Une assistance en cours d'incendies.

1° Assistance météorologique préventive à moyenne et à courte échéances.

C'est là, à notre avis, que le rôle de la Météorologie peut se révéler comme particulièrement efficace.

a) *Bilan hydrique (réserves en eau du sol) en fin de printemps :*

Fondée sur une notion de *sécheresse* définie dans les pages suivantes, la connaissance de ce *bilan* dès la fin du printemps est extrê-

mement importante car elle permet aux états-majors responsables de la lutte de :

- faire une première évaluation globale des forces nécessaires à la lutte d'été (les années diffèrent sensiblement l'une de l'autre) ;
- connaître au départ les *zones* les plus sensibles pour la répartition des premières forces d'intervention et la « pré-mobilisation » des forces secondaires locales.

b) *Assistance préventive à moyenne échéance :*

Dès la fin du printemps, le Centre Météorologique Régional de Marignane diffuse chaque semaine, le mardi, la *réserve* en eau du sol (échelle départementale). Il diffuse en outre tous les mardis et vendredis des bulletins concernant l'évolution du temps pour 3 ou 4 jours. Les Stations Météorologiques Départementales sont chargées d'adapter ces bulletins à l'échelle départementale.

Leur précision dépend évidemment des possibilités techniques de la prévision météorologique. Toutefois, en associant le bilan hydrique hebdomadaire aux bulletins de prévisions bi-hebdomadaires, les Etats-Majors responsables de la lutte dans *chaque zone* (départementale ou massif forestier) peuvent ainsi disposer d'informations utiles.

c) *Assistance préventive à courte échéance :*

Ici, le rôle de la Météorologie consiste à prévoir à l'échéance de 18 à 24 heures les conditions météorologiques favorables au déclenchement et à la propagation des incendies.

Etant entendu que dans la presque totalité des cas les causes du sinistre relèvent de facteurs humains qui n'ont rien à voir avec les éléments atmosphériques, l'utilité d'une telle prévention peut paraître discutable. En réalité, il n'en est rien, car, en matière de lutte contre les feux de forêts, la condition essentielle du succès dépend en tout premier lieu de *la rapidité d'intervention*. En ce domaine, ce ne sont pas les heures mais les minutes qui comptent : tel incendie qui a ravagé des centaines d'hectares aurait pu être limité à 100 m² de broussailles, si l'intervention des pompiers s'était produite 1/4 d'heure plus tôt.

D'où l'intérêt primordial d'une telle prévision qui, intervenant dans la soirée du jour J—1 peut permettre pour le jour J :

- une *meilleure répartition* des forces disponibles, en les concentrant sur les zones sensibles,
- une *mise en état d'alerte* des pompiers de métier, et surtout, des pompiers bénévoles de petites villes ou villages qui seuls peuvent intervenir assez rapidement pour maîtriser un début d'incendie signalé dans les pinèdes voisines de leur agglomération.

2° Assistance météorologique en cours d'incendie.

Cette question se ramène presque essentiellement à une prévision à très brève échéance du *facteur vent* (très accessoirement une prévision de température et humidité pourra se révéler utile dans certains cas).

En cours de sinistre, les tâches et responsabilités du météorogiste peuvent se résumer ainsi :

Connaissance aussi précise que possible du vent en force et direction (et accessoirement de la température dans l'ensemble aussi bien que dans le détail de la Région).

D'où la nécessité pour le prévisionniste de posséder à fond la connaissance de l'orographie régionale et sa répercussion sur le régime des vents synoptiques, les interférences possibles entre ces derniers et les brises de mer ou de vallée, leurs variations diurnes, etc...

Enfin, en fonction de ces données, possibilités de définir à chaque instant et *dans une zone étroitement déterminée* l'intensité et la direction du vent ainsi que son évolution dans les prochaines heures.

Il va de soi que la constante connaissance de ces éléments est absolument indispensable à l'organisme de commandement qui dirige la lutte contre le sinistre ; elle est même doublement indispensable car un brusque changement de la direction du vent peut non seulement aggraver l'incendie, mais mettre en péril les sauveteurs eux-mêmes.

Les précédentes remarques impliquent, outre la vigilance du prévisionniste, l'établissement de contacts quasi permanents entre météorologie et service de lutte, avec échanges réciproques d'informations, échanges qui se sont révélés à l'expérience très fructueux pour l'une et l'autre partie.

Nous pensons en conclusion de cette première partie que c'est sur le rôle préventif que la Météorologie doit faire porter au maximum son effort d'assistance et dans les lignes qui suivent nous faisons le point de la situation actuelle et des méthodes utilisées dans la Région Sud-Est.

B. — CONDITIONS ET SEUILS D'ALERTE METEOROLOGIQUES

La confrontation des données climatologiques avec les statistiques des incendies de forêts conduit à la notion de seuils d'alerte. Il apparaît que les deux facteurs météorologiques prépondérants sont la sécheresse et le vent. La température et l'humidité apparaissent comme des facteurs secondaires. Il est donc nécessaire *d'évaluer*

le facteur *sécheresse*, ensuite d'examiner en fonction du facteur *sécheresse* le rôle des autres éléments météorologiques par ordre d'importance.

I. — Sécheresse

1° L'idéal est la mesure directe par des moyens appropriés de l'humidité réelle du sous-bois et des sols en place de la forêt. Le degré de sécheresse réel du sol peut ainsi être exprimé, suivant la nature du sol (sablonneuse, limoneuse, argileuse, etc...), grâce à la notion de potentiel capillaire.

2° Une telle méthode d'évaluation du facteur sécheresse ne peut être envisagée à l'échelle de la Région S.E. (11 départements) et de ses grandes zones climatiques, même si de telles mesures ponctuelles peuvent permettre des ajustements locaux fort précieux (notamment pour certaines forêts, Maures et Estérel par exemple).

Nous admettrons dans ces conditions, *une notion de sécheresse basée sur le déficit en eau du sol*, la sécheresse étant nulle lorsque la réserve maximale d'eau que peut contenir le sol est atteinte (sol saturé). Des degrés de sécheresse par zone climatique correspondent à des tranches décroissantes de réserve en eau.

3° Il s'agit donc de tenir à jour *un bilan quotidien de l'état des réserves en eau du sol* en tenant compte :

— d'une part, des apports dus aux précipitations qui viennent s'ajouter aux réserves en eau du sol.

— d'autre part, des retraits dus à l'évapotranspiration.

4° *Méthodes de travail pour l'établissement du bilan quotidien des réserves en eau du sol.*

4.1. Si la connaissance de l'apport des précipitations connu ponctuellement dans la zone considérée ne pose pas de problème délicat, il est nécessaire par contre de définir la notion d'évapotranspiration telle que nous allons l'utiliser.

4.2. *L'évapotranspiration potentielle* définit l'évapotranspiration *maximale* (évapotranspiration directe du sol et transpiration végétale), sous un climat donné, *le couvert végétal étant largement alimenté en eau*. On admet qu'elle dépend uniquement des facteurs climatiques (*).

(*) Dans les régions méditerranéennes où soufflent le mistral et la tramontane, l'influence du vent sur l'évapotranspiration n'est probablement pas négligeable. Toutefois, faute de mesures expérimentales (à notre connaissance), nous ne pouvons pas apprécier l'exacte importance de ce facteur. Il serait souhaitable que de telles mesures, bien que complexes, puissent être effectuées.

De toute façon, même si cette évaluation était possible, il n'en demeurerait pas moins très délicat d'en faire une application pratique. Il serait en effet difficile de définir un vent moyen à une échelle climatique quelconque, étant donné la variabilité du vent dans l'espace et dans le temps.

L'évapotranspiration potentielle quotidienne (ϵ_p) est calculée au C.M.R. de Marignane par la méthode de THORNTHWAITE étendue aux zones climatiques, méthode dont l'intérêt réside dans l'emploi de données météorologiques simples.

4.3. *L'évapotranspiration* subit des limitations lorsque la diminution de l'humidité du sol réduit la quantité d'eau évaporable (augmentation des forces d'adhésion eau-sol). Divers auteurs ont étudié cette *évapotranspiration réelle*. Les formules employées pour son calcul ne peuvent fournir qu'une approximation. L'important est que, le choix de la méthode ayant été opéré, la continuité de l'application puisse apporter des éléments permanents de comparaison.

4.4. L'évapotranspiration réelle est calculée au C.M.R. de Marignane avec les tables établies par THORNTHWAITE, qui admet que *l'évapotranspiration quotidienne* (ϵ) est liée à *l'évapotranspiration quotidienne potentielle* (ϵ_p) par la relation.

$$\epsilon = \epsilon_p \cdot \frac{r}{R} \quad (1)$$

r : réserve d'eau contenue dans le sol.

R : réserve maximale d'eau que le sol peut retenir (fixée expérimentalement à 150 mm pour nos régions).

L'intégration de (1) permet d'établir l'équation résumant la table de THORNTHWAITE pour $R = 150$ mm :

$$\log_{10} r = \frac{752 - \Sigma \epsilon_p}{345} \quad (2)^*$$

$\Sigma \epsilon_p$ devenant l'évapotranspiration potentielle cumulée à partir du moment où R . commence à être entamée par l'évapotranspiration.

(2) * — En effet * $\epsilon = de$; e = évapotranspiration réelle.
 $\epsilon_p = de_p$; e_p = évapotranspiration potentielle.

d'autre part, $r = R - e = 150 - e$

$$\text{donc} \quad \frac{de}{150 - e} = \frac{de_p}{150}$$

$$\text{L'intégration donne finalement: } \log_{10} r = \frac{752 - e_p}{345}$$

$$\text{c'est-à-dire: } \log_{10} r = \frac{752 - \Sigma \epsilon_p}{345}$$

4.5. On peut donc chaque jour :

1) soit calculer l'évapotranspiration ε en fonction de ε_p en appliquant (1) et connaître r puisque :

$$r = R - \Sigma \varepsilon + P \quad (3)$$

P étant Σp ; p = précipitation quotidienne.

2) soit appliquer l'équation (2) par l'intermédiaire des tables de THORNTHWAITE et calculer r en fonction de $\Sigma \varepsilon_p$; mais l'apport des précipitations pose alors le problème suivant :

On admet que les précipitations sont totalement ajoutées à r jusqu'à la limite R (ici 150 mm) et que seule compte la relation :

$$\varepsilon = \varepsilon_p \cdot \frac{r}{R} \quad \text{pour l'obtention de } \varepsilon. \text{ Il faut alors appliquer de la}$$

manière suivante la table de THORNTHWAITE qui donne r en fonction de $\Sigma \varepsilon_p$; $\Sigma \varepsilon_p$ d'abord réelle (elle est calculée au départ avec R et $\Sigma \varepsilon_p = 0$), devient fictive à partir du moment où une précipitation est ajoutée à r , puisque dans les tables, à r ainsi obtenue, correspond une nouvelle $\Sigma \varepsilon_p$.

Jusqu'à une nouvelle précipitation, $\Sigma \varepsilon_p$ calculée quotidiennement comprendra donc la nouvelle valeur de $\Sigma \varepsilon_p$ augmentée des ε_p quotidiens. Le processus recommence à chaque nouvelle précipitation.

Malgré son apparente complexité, nous avons choisi cette deuxième solution pour obtenir r , car elle permet l'emploi aisé des tables de THORNTHWAITE.

4.6. En conclusion, nous aurons à notre disposition un bilan quotidien de l'état des réserves en eau du sol par *zone climatique*.

5° Degrés de sécheresse.

Nous avons défini schématiquement dans le paragraphe 1.2. la notion sécheresse-déficit en eau à l'échelle de la zone climatique.

Après plusieurs essais, certains degrés de sécheresse ont pu être fixés en fonction de la réserve d'eau du sol (r) par rapport à R (réserve maximale):

$$1^\circ - r \text{ compris entre } 150 \text{ et } 75 \text{ mm } (R > r > \frac{R}{2})$$

La sécheresse nulle pour $r = 150$ mm devient progressivement modérée lorsque r tend vers 75 mm.

$$2^\circ - r \text{ compris entre } 75 \text{ et } 50 \text{ mm } (\frac{R}{2} > r > \frac{R}{3})$$

(Sécheresse assez forte).

$$3^{\circ} - r \text{ compris entre } 50 \text{ et } 30 \text{ mm} \quad \left(\frac{R}{3} > r > \frac{R}{5} \right)$$

(Sécheresse forte).

$$4^{\circ} - r \text{ inférieur à } 30 \text{ mm} \quad \left(r < \frac{R}{5} \right)$$

(Sécheresse très forte).

Il faut bien entendu considérer que les limites indiquées forment le cadre dans lequel s'insère *progressivement* l'élément sécheresse, ce caractère progressif devant rester présent à l'esprit dans l'application pratique (il n'y a pas, par exemple, passage brutal de la sécheresse assez forte à la sécheresse forte).

II. — Le vent

Après la sécheresse, l'élément dominant est sans conteste le vent, élément à prévoir et non fonction cumulative du temps passé comme la sécheresse.

C'est un fait remarquable de constater que le mois de juillet présente en Provence un maximum relatif de fréquence de vent supérieur ou égal à 20 m/s, maximum dû au mistral. Ainsi à Marignane, la fréquence pour 1 000 des journées où le vent maximal a été supérieur ou égal à 20 m/s est la suivante :

Mai : 71 - Juin : 55 - *Juillet* : 84 - Août : 58 - Septembre : 39

Voir graphique (fig. 1).

Les prévisions de vent porteront donc principalement sur les régimes de NW de type mistral, prévisions qui d'ailleurs s'avèrent beaucoup plus délicates qu'en hiver. Aux irrégularités d'écoulement dues au relief viennent s'ajouter en effet la formation de minimums thermiques de pression parfois très accusés et les effets de brises côtières. Les prévisions exigent, même à très brève échéance, une grande prudence et une connaissance approfondie des évolutions régionales. Nous citerons comme exemple la région de l'Estérel. Le mistral s'y étant établi est suivi à plus ou moins brève échéance d'une rotation des vents au secteur E à SE et ceci d'E en W (retour d'E). Il s'agira donc de prévoir le moment où cette rotation s'établira, bouleversant l'organisation de lutte contre le feu dont la propagation deviendra toute différente (ce cas s'est effectivement produit en 1962).

La prédominance des régimes de NW ne doit pas cependant faire négliger la prévision des courants de S. à SE. Quoique généralement moins forts et plus humides, ils peuvent être localement

MARIGNANE

FRÉQUENCE POUR 1 000 DES JOURNÉES OU LE VENT
MAXIMAL A ÉTÉ ≥ 20 ms

PÉRIODE 1946-1960

FIG. 1.

accélérés par des effets de brise de mer. Précédant souvent le passage d'un thalweg circulant d'W en E, ils sont alors suivis d'un régime de mistral.

Il existe aussi un phénomène qui se produit généralement par vent faible ou modéré et qui est pratiquement imprévisible: c'est la « tornade locale » produite par le feu, véritable tourbillon présentant un danger grave pour les sauveteurs, le feu se déplaçant alors en sautes brutales dans des directions imprévisibles.

III. — Autres éléments météorologiques

1° La température.

La température intervient directement dans le calcul de l'évapotranspiration comme facteur climatique principal. A ce titre, son rôle est donc très important, l'évapotranspiration étant une fonction croissante de la température. Il apparaît par contre, à l'examen des statistiques d'incendies de forêts que son action directe sur le déclenchement ou l'extension des foyers est généralement minime, sauf dans les cas où, la sécheresse devenant extrême (r inférieur à 30 mm), des incendies se déclarent et s'étendent avec un vent faible si la température maximale est égale ou supérieure à 30°.

2° L'humidité.

L'humidité semble jouer un rôle négligeable pour nos régions. L'explication tient sans doute dans le caractère du climat méditerranéen. Par régime de mistral, c'est-à-dire en général lors des incendies, l'humidité et l'amplitude de sa variation diurne sont faibles, d'où le peu d'importance qu'on y attache comme facteur intervenant directement dans les risques d'extension d'incendies. Néanmoins, surtout en fin d'été, l'humidité semble avoir une importance non négligeable par l'apport de précipitations occultes (rosée, brumes et brouillards matinaux) et en permettant une alimentation directe en eau des plantes à partir de la vapeur d'eau atmosphérique.

IV. — Seuils d'alerte météorologiques

La considération d'une part des éléments météorologiques que nous venons d'examiner, d'autre part des statistiques d'incendies de forêts, permet de définir les *seuils d'alerte*, c'est-à-dire les conditions météorologiques *favorables aux extensions des foyers d'incendie*. Les valeurs indiquées sont des ordres de grandeur qui seront certainement dans l'avenir sensiblement précisés. Voici donc ce à quoi l'on aboutit actuellement:

1° — *r* compris entre 150 et 75 mm.

(Sécheresse nulle tendant à devenir modérée).

Risque d'incendie de forêt pratiquement inexistant, le risque apparaissant toutefois lorsqu'on approche la limite inférieure de la tranche dans des conditions exceptionnelles de vent (vent moyen (*) supérieur ou égal à 20 m/s).

2° — *r* compris entre 75 et 50 mm.

(Sécheresse assez forte).

Risque d'incendie s'aggravant d'autant plus que la sécheresse augmente, le vent moyen étant supérieur à 12 m/s.

3° — *r* compris entre 50 et 30 mm.

(Sécheresse forte).

Risque d'incendie existant dès que le vent moyen est supérieur à 8 m/s.

Risque sévère si le vent moyen est supérieur à 15 m/s.

4° — *r* inférieur à 30 mm.

(Sécheresse très forte).

Le risque d'incendie est quasi permanent.

Si $T^{\circ} \text{ max}$ égale ou supérieure à 30° , pas de conditions de vent.

Si $T^{\circ} \text{ max}$ inférieure à 30° , risque si le vent moyen est supérieur à 5 m/s.

Risque sévère si le vent moyen est supérieur à 10 m/s.

La sécheresse d'une part, le vent de l'autre sont donc, quant aux régions méditerranéennes, les deux éléments principaux dans la détermination des seuils d'alerte météorologiques.

L'aspect progressif de leur action conjuguée montre l'intérêt de l'action prévisionnelle du météorologiste.

V. — Zones climatiques

Les éléments du climat qui interviennent dans le problème des incendies de forêt ne sont pas exactement similaires au sein même de l'ensemble du « climat méditerranéen ». Chacun sait, par exemple, que le mistral souffle moins fréquemment sur la Côte d'Azur que sur la Provence. Il s'agit donc de définir les zones climatiques qui groupent leurs éléments déterminants de façon satisfaisante.

Noms de vieilles provinces (Languedoc, Provence...) ou zones géographiques (Côte d'Azur, Alpes du Sud, etc...) permettent aisément

(*) La vitesse moyenne du vent s'obtient par une intégration à vue de la courbe d'enregistrement (égalité des aires au-dessus et au-dessous de la valeur moyenne).

ment d'obtenir un premier classement quant à la température et au vent. Mais, l'élément dominant d'un bilan hydrique, la pluie, nécessite une étude approfondie.

On peut distinguer en effet dans la région SE huit types principaux de normales mensuelles de précipitations, présentant tous d'ailleurs un minimum de juillet. Entre le type Languedoc occidental où l'influence atlantique est nette (maximums de mai et de décembre, minimum de juillet moins important), d'une part, et le type Corse (maximum de novembre et décroissance progressive au printemps), d'autre part, les types intermédiaires s'intercalent régulièrement.

Citons à titre d'exemples :

- le type Languedoc oriental (maximum principal en septembre).
 - le type Cévennes (maximums de septembre et de mars).
 - le type Provence (maximum de novembre, minimum relatif de février, maximum relatif de mai).
- (fig. 2).

Il importait donc de définir les zones climatiques en tenant compte de ces données : de telle façon que d'un ordre général, les précipitations d'une zone climatique varient dans un même sens (maximum ou minimum le même mois).

Nous avons défini au total 11 zones climatiques principales, les renseignements fournis *quotidiennement* par 41 postes météorologiques nous permettant de calculer, jour par jour, un bilan hydrique de ces zones.

Tableau des zones climatiques

ZONES CLIMATIQUES	STATIONS ET POSTES METEOROLOGIQUES
ROUSSILLON	Perpignan - Cap Béar - Prades - Céret - Rodès.
LANGUEDOC OCCIDENTAL	Carcassonne - Castelnaudary - Limoux.
BAS LANGUEDOC	Montpellier - Sète - Narbonne.
SUD-CÉVENNES	Mont-Aigoual - Alès - Saint-Etienne - Vallée française.
BAS RHÔNE	Nîmes - Orange - Avignon.
PROVENCE OCCIDENTALE	Marignane - Salon - Istres - Aix.
ALPES DU SUD	Embrun - Saint-Auban - Luz-la-Croix-Haute - Fours - Saint-Etienne-en-Devoluy - Les Claux (Pelvoux).
PROVENCE ORIENTALE	Toulon - Le Luc - Saint-Raphaël - Cap Camarat - La Ciotat.
CÔTE D'AZUR	Nice - Cannes - Antibes - Saint-Dalmas-de-Tende.
CORSE OCCIDENTALE	Ajaccio - Calvi - Pertusato.
CORSE ORIENTALE	Bastia - Cap-Corse - Solenzara.

NORMALES DE PRÉCIPITATIONS

FIG. 2.

Il sera toujours possible de fournir une analyse plus détaillée du bilan hydrique (réserves en eau du sol) dans une même zone à condition d'augmenter le nombre de postes météorologiques; ceci semble souhaitable et pourrait permettre d'établir notamment un bilan plus spécifiquement attaché à certains grands massifs forestiers (Maures, Estérel, etc...).

C. — PRATIQUE DU CALCUL DU « BILAN HYDRIQUE » QUOTIDIEN ET EVALUATION DES RESERVES EN EAU DU SOL

I. — Bilan hydrique

Calculé pour chaque jour pour chacun des sous-climats tels que nous les avons définis plus haut, le bilan quotidien que nous appellerons b est ainsi défini :

$$b = p - \epsilon_p$$

p , étant la précipitation moyenne sous-régionale du jour J ,
 ϵ_p , l'évapotranspiration potentielle relative à ce même jour.

L'évaluation de p est immédiate et correspond à la moyenne des hauteurs d'eau recueillies en 24 h (de J à 06 HTU à $J + 1$ à 06 HTU) dans les différentes stations sous-régionales. Le nombre de stations actuellement utilisées varie de 3 à 6 par sous-climat. Une telle densité permet en général une assez bonne estimation de la lame d'eau moyenne lorsqu'il s'agit de pluies d'automne généralisées; elle est par contre nettement insuffisante pour apprécier l'importance réelle des averses orageuses de l'été et du printemps dont la répartition est souvent très irrégulière même à l'échelle sous-régionale.

Le calcul de ϵ_p est plus complexe et ne peut être abordé sans que soit bien précisé au préalable le point suivant :

La méthode de THORNTHWAITE, ici employée était, au moins à l'origine, purement mensuelle (Voir N.I.T. ARLERY GARNIER LANGLOIS), il peut donc sembler abusif de l'utiliser pour une évaluation journalière du facteur évapotranspiration. En fait, devant l'intérêt évident d'une telle utilisation, l'auteur lui-même n'a pas hésité à adapter sa méthode mensuelle aux nécessités du calcul quotidien.

Le principe de cette adaptation est le suivant :

Soit au cours du mois A un jour J dont la température moyenne $M + m$

est figurée par t_j . On substitue à ce jour un mois fictif

à température moyenne constante et égale à t_j . L'indice i de ce mois correspond donc à la table n° 1 (voir annexe I) à la température t_j . On obtient l'indice I_j relatif au mois fictif en ajoutant i_j à la somme $\Sigma_{11} i$ des indices correspondant aux 11 mois précédant le mois A.

$$I_j = \Sigma_{11} i + i_j$$

En utilisant par exemple l'abaque proposé par THORNTHWAITE avec la valeur I_j et la température t_j , on détermine immédiatement l'évapotranspiration non corrigée relative au mois uniforme de 30 jours à température constante t_j ; on la corrige suivant la date et la latitude et en divisant par 30 on obtient ϵ_p = évapotranspiration potentielle du jour J.

Pratiquement, ces calculs sont simplifiés grâce à une série de tables établies par THORNTHWAITE, et qui permettent d'obtenir l'évaluation quotidienne directement, sans passer par la valeur mensuelle (Voir annexe I).

On utilise d'abord la table II dans laquelle on entre avec I_j tel que nous venons de le calculer et avec la température moyenne t_j du jour considéré. On lit en regard l'évapotranspiration potentielle non corrigée. A l'aide de la table III, on fait alors subir à cette valeur les 2 corrections de date et de latitude pour obtenir ϵ_p = évapotranspiration du jour J.

On peut alors évaluer le bilan quotidien qui correspond :

$$b_j = P_j - \epsilon_p$$

A partir du 1^{er} de chaque mois, ce bilan est ajouté algébriquement aux valeurs cumulées des jours précédents :

$$\Sigma b = \Sigma (p - \epsilon_p)$$

Il faut donc au début de chaque mois réévaluer la somme $\Sigma_{11} i$ relative aux 11 mois précédents qui, ajoutée à l'indice i de chaque jour, nous donne la valeur de I . Comme nous connaissons déjà Σp calculé pour l'élaboration du graphique « précipitations », il nous suffit de déterminer $\Sigma \epsilon_p$ pour avoir notre bilan cumulé journalier.

A la fin du mois

$$\Sigma b = B \quad (\text{bilan mensuel})$$

Qu'il s'agisse du calcul quotidien ou mensuel, la méthode employée demeurant la même, les valeurs obtenues pour le mois doivent être sensiblement égales : c'est ce que l'on vérifie effectivement.

ϵ_p étant l'évapotranspiration potentielle mensuelle :

$$\Sigma \epsilon_p \neq \epsilon_p$$

(les écarts relatifs entre les deux valeurs sont généralement inférieurs à 1 %).

En conséquence :

$B \neq P - e_p$ (P étant la précipitation mensuelle).

La méthode d'évaluation quotidienne, quoique demandant beaucoup plus de travail, présente toutefois sur l'évaluation mensuelle des avantages suffisamment nets pour lui être préférée toutes les fois que son emploi est possible.

1° Elle permet une connaissance constante du bilan hydrique sans qu'il soit nécessaire pour cela d'attendre la fin du mois.

2° Elle donne une idée des fluctuations, parfois relativement importantes, du bilan au cours du mois et permet notamment de déterminer les périodes critiques où la saturation du sol est atteinte ou cesse de l'être.

3° Elle serre de plus près la réalité, ce qui est particulièrement nécessaire dans nos régions où la répartition des précipitations dans le temps est souvent très irrégulière. Un bilan mensuel $P - e_p$ théoriquement équilibré, peut en effet donner une idée absolument fautive de la réalité si la précipitation P , au lieu d'être uniformément répartie dans le temps est par exemple tombée tout entière dans les 3 premiers jours du mois. Le sol étant supposé voisin de la saturation, la quasi totalité de la pluie aura été en fait perdue pour la végétation avec déséquilibre marqué en fin de mois et nécessité d'irrigation.

II. — Calcul de la réserve

Dans tout ce qui précède, il a été question d'*évapotranspiration potentielle*, donc d'une valeur un peu théorique et qui présente surtout un intérêt agricole, puisque supposant la fourniture par irrigation de quantités d'eau constamment suffisantes pour maintenir le sol au voisinage de la saturation.

S'il s'agit d'évaluer la réserve, qui va nous fixer sur le degré de sécheresse du sol, il n'est évidemment plus question d'utiliser les valeurs potentielles mais une valeur plus proche de la réalité et qui tiendra compte de la rétention croissante des plantes et du sol à l'égard de l'eau quand la sécheresse croît.

Nous avons admis avec THORNTHWAITE (voir § B. 1.4.4.) et faute de mieux que « l'évapotranspiration réelle » ε diminue par rapport à sa valeur potentielle ε_p comme la réserve r par rapport à sa valeur maximale R .

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} = \frac{r}{R}$$

Ceci étant, la façon la plus logique et *théorique* (voir § B.I. 4.51.) de procéder au calcul quotidien est la suivante :

Pour un jour J où l'évapotranspiration potentielle a atteint la valeur ε_p , on détermine tout d'abord l'évapotranspiration réelle d'après

$$\varepsilon = \varepsilon_p \cdot \frac{r_{j-1}}{R}.$$

r_{j-1} étant la réserve de la veille.

On retranche alors la valeur trouvée pour ε de r_{j-1} pour avoir la réserve r_j du jour qui servira le lendemain au calcul de l'évapotranspiration réelle de $J + 1$ et ainsi de suite...

Lorsqu'une précipitation intervient dans les 24 h (de J à 06 H TU à $J + 1$ à 06 H TU) on peut procéder de deux manières, suivant que l'adjonction de p à la réserve précède ou suit le calcul de ε du jour.

1^{re} méthode: On commence à ajouter à la réserve r_{j-1} de la veille la totalité de la précipitation p_j ; on obtient ainsi une nouvelle réserve r'_{j-1} qui sert au calcul de ε du jour j . La différence $r'_{j-1} - \varepsilon$ nous donne alors la réserve r_j du jour considéré.

Cela revient à admettre que la précipitation a été totalement absorbée par le sol et qu'elle s'est produite en début de journée; comme elle se répartit en fait au hasard sur les 24 h, on commet ainsi une erreur systématique qui, exagérant ε , tend à diminuer r .

Cette erreur négligeable dans la plupart des cas, ne devient appréciable (de l'ordre du mm) que dans le cas de fortes précipitations après période de sécheresse.

2^e méthode: On calcule tout d'abord ε et la réserve r_j du jour J comme s'il n'avait pas plu et l'on ajoute alors à cette réserve la précipitation p_j ; on obtient r_j qui servira le lendemain à la poursuite du calcul. On suppose ainsi que toute la précipitation absorbée par le sol est tombée après le coucher du soleil et l'on commet une erreur systématique en sens inverse.

Cette manière de faire peut paraître plus logique car il va bien ainsi, au moins théoriquement, dans le cas des pluies nocturnes, fréquentes en été. On peut, à la rigueur, procéder de cette façon lorsqu'il s'agit de pluies importantes et totalement recueillies entre 06 et 18 h dans une sous-région donnée.

Dans le cas général et comme il fallait faire un choix, nous avons retenu la première méthode; cela pour les deux raisons suivantes :

a) Lorsqu'il pleut, et surtout de façon intense, il est abusif d'admettre que la totalité de la précipitation puisse être absorbée par le sol (pertes par ruissellement et évaporation de l'eau qui n'a pas eu le temps de s'infiltrer). La vraie réserve est donc inférieure à r .

b) Dès que le couvert végétal est suffisamment mouillé, les mécanismes physiques et physiologiques permettant la rétention de l'eau se relâchent et la transpiration devient rapidement plus active, donc supérieure à sa valeur théorique.

L'erreur systématique par défaut que l'on commet dans l'évaluation de r en utilisant la 1^{re} méthode semble donc aller dans le sens des faits réels et plaide en faveur de son emploi.

Pratique du calcul.

Dans la pratique, et bien que la manière que nous venons d'indiquer soit plus logique, un tel calcul appliqué à chaque sous-climat se révèle assez long et fastidieux. Pour gagner du temps, nous utiliserons donc les tables dressées par THORNTHWAITE pour différentes valeurs de R (la valeur de R retenue pour nos régions étant 150 mm) (Voir § B.I. 4.5.2.).

On entre donc dans la table 150 mm (N° IV) (voir annexe I) avec l'évapotranspiration potentielle cumulée $\Sigma \epsilon_p$ déterminée chaque jour pour l'évaluation du bilan hydrique; on lit immédiatement en regard de cette valeur la réserve r correspondante.

En cas de précipitation, comme nous avons convenu d'employer la 1^{re} méthode, on ajoute d'abord à la réserve r_{j-1} de la veille la totalité de la précipitation p_j du jour; on obtient ainsi r'_{j-1} et on cherche dans la table la réserve la plus voisine du chiffre obtenu; à cette réserve correspond une nouvelle évapotranspiration potentielle cumulée $\Sigma' \epsilon_p$ à laquelle on ajoute la valeur de ϵ_p du jour. On obtient $\Sigma'' \epsilon_p$ en regard de laquelle on lit finalement la réserve r_j du jour.

Ce processus qui peut paraître long et quelque peu alambiqué a l'avantage de ne nécessiter aucun calcul et devient très vite automatique quand on en a saisi le mécanisme.

S'il est assez difficile de l'explicitier logiquement, c'est qu'en faisant appel pour des raisons pratiques à la table IV de THORNTHWAITE on introduit dans les calculs une valeur purement fictive: l'évapotranspiration potentielle cumulée (voir § B.I. 4.4. et B.I. 4.5.2.); cette dernière qui ne joue qu'un rôle intermédiaire dans la détermination de r , n'a évidemment aucune existence réelle puisque dans l'hypothèse même de notre calcul, la saturation n'étant pratiquement jamais atteinte ($r \leq R$), l'évapotranspiration réelle est toujours inférieure à sa valeur potentielle (Voir annexe II un exemple du mois d'août 1962).

N. B. — Bien entendu, on peut utiliser également la table IV suivant la 2^e méthode (cas des pluies nocturnes très importantes), il suffit d'ajouter à la valeur $\Sigma \epsilon_p$ de $j - 1$ la valeur de ϵ_p du jour J ; on obtient $\Sigma' \epsilon_p$ à quoi correspond la réserve r_j du jour en l'absence de pluie. On ajoute alors à r_j la totalité de la précipitation recueilli-

lie et on obtient une nouvelle réserve r'_j à laquelle correspond dans la table une nouvelle valeur $\Sigma''\epsilon_p$ de l'évapotranspiration potentielle cumulée qui sera utilisée le lendemain pour la poursuite du calcul.

III. — Application à la Provence occidentale

Les normales de précipitations de Marignane, période 1951-1960, présentent pour les mois d'avril à août un maximum relatif en mai et un minimum absolu annuel en juillet.

Avril : 36 mm - Mai 50 mm - Juin : 26 mm - Juillet : 12 mm - Août : 34 mm

Cependant, les années peuvent être fort diverses. Ainsi, pour la même période (1951-1960), on a enregistré les maximums suivants de précipitations : Avril 1957 : 91 mm - Mai 1951 : 94 mm - juin 1953 : 88 mm - Juillet 1958 : 61 mm - Août 1955 : 41 mm. Notons d'autre part qu'en 1952, moins de 1 mm de pluie fut totalisé pour les deux mois de Juin et Juillet (Fig. 3).

En regard de cette allure irrégulière des précipitations, apparaît tout l'intérêt du bilan de l'eau effectué quotidiennement et régulièrement toute l'année. Il intègre toutes les anomalies, permet de connaître dès la fin du printemps, avant la période estivale de sécheresse habituelle, l'état des réserves d'eau du sol (printemps sec ou humide), ensuite d'évaluer l'état de sécheresse estival malgré l'apport irrégulier en eau des précipitations.

MARIGNANE ELEMENTS DE COMPARAISON

	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
	—	—	—	—	—
<i>Hauteur de précipitations en mm :</i>					
1952	33	68	0,1	0,3	31
1956	46	23	48	33	8
1962	28	21	39	0	0,6
<i>Maximum de précipitations en mm :</i>					
1951-1962	1957-91	1951-94	1953-88	1958-61	1955-41
Normales en mm	36	50	26	12	34

FIG. 3.

A titre d'exemple, nous allons examiner les bilans hydriques (réserves en eau du sol) de la Provence occidentale pour les années 1961 et 1962 (Fig. 4). Il apparaît immédiatement que l'été 1962 a été plus sec que l'été 1961.

Quelles en sont les raisons ?

1° *Printemps 1961 plus humide que celui de 1962.* Au 1^{er} juin 1961, le sol est encore saturé. En 1962, la réserve du sol n'est alors que de 100 mm. Cependant, au cours du mois de juin 1962, des pluies (la dernière, le 15 juin), ont compensé en partie l'évapotranspiration. A la fin de juin, la différence de réserve en eau du sol entre les deux années n'est que de 14 mm (1961 : 74 mm - 1962 : 60 mm).

2° *Pas de précipitations en 1962 pendant 80 jours* (15 juin - 4 septembre) à l'exception d'une pluie de l'ordre du millimètre le 15 août).

Aussi le seuil de la très forte sécheresse ($r < 30$ mm) est franchi le 24 juillet 1962 et seulement le 8 août en 1961.

1962 est une année de sécheresse exceptionnelle.

IV. — Action de la météorologie en 1962

Nous avons examiné les données fondamentales qui interviennent pour fixer des seuils d'alerte et la façon de les évaluer. A cette climatologie active, l'association de la prévision assurée en permanence permet d'organiser *l'assistance météorologique à la lutte contre les incendies de forêts.*

En 1962, cette assistance a été la suivante :

1° *Des bulletins techniques*, destinés aux stations météorologiques responsables à l'échelle départementale, ont été diffusés tous les mardis par le C.M.R. de Marignane, dès le mois de juillet. Ils précisaient la réserve en eau du sol, donc l'état de sécheresse ;

2° Des B.M.S. (bulletins météorologiques spéciaux) ont été diffusés par le service prévision du C.M.R. chaque fois que les seuils d'alerte étaient prévus (soit 34 bulletins). Ces bulletins étaient destinés aux services de la protection civile de chaque département et aux Marins Pompiers de Marseille (voir *annexe III* les tableaux statistiques des Bouches-du-Rhône).

3° Des prévisions quotidiennes (3) étaient destinées aux Marins Pompiers de Marseille. Elles précisaient les conditions météorologiques du jour et donnaient une évolution pour le lendemain.

4° De très nombreux contacts ont été assurés avec les services responsables de lutte contre l'incendie soit par le C.M.R. de Marignane, soit par les stations météorologiques départementales.

D. — CONCLUSIONS

S'il fallait apprécier l'assistance météorologique dans la lutte contre les incendies de forêts, nous dirions qu'il faut avoir vu, dans

les collines méditerranéennes, le combat des hommes contre ce fléau. En effet, le concours de la Météorologie entre comme facteur important de « rentabilité » dans l'utilisation du potentiel et des forces humaines qui restent en fin de compte le capital le plus précieux.

Les liaisons Météorologie - Etats-Majors et Postes de commandement de lutte doivent donc être établies et développées encore plus étroitement aussi bien à l'échelon régional qu'à l'échelon local.

L'amélioration des méthodes et conditions d'assistance météorologique dépend de ces liaisons.

Marignane, le 1^{er} octobre 1962.

BIBLIOGRAPHIE

1. — Application des méthodes de THORNTHWAITE à l'esquisse d'une description agronomique du climat de la France par ARLERY - GARNIER - LANGLOIS. *La Météorologie*, octobre-décembre 1954.
 2. — L'évapotranspiration réelle — mesure et interprétation dans les conditions naturelles par HALLAIRE. *La Météorologie*, octobre-décembre 1951.
 3. — Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évaporation potentielle, par TURC. *Annales agronomiques*, 1961, n° 1.
 4. — Signification et portée agronomique de l'évapotranspiration potentielle, par BOUCHET. *Annales agronomiques*, 1961, n° 1.
 5. — L'Hydrologie de l'Ingénieur REMENIERAS (Collection du Laboratoire national d'hydraulique).
-

ANNEXES

RÉSUMÉ

La confrontation des statistiques des incendies de forêts et des données climatologiques ont conduit les auteurs à déterminer des seuils d'alerte pour la région méditerranéenne. Ils ont retenu comme facteurs prépondérants la sécheresse et le vent.

La notion de sécheresse a été basée sur le déficit en eau du sol calculé quotidiennement (selon une relation de THORNTHWAITE) par zones climatiques. Ils ont admis pour leur région la saturation du sol à 150 mm. Un bilan quotidien de l'état des réserves en eau du sol est ainsi tenu à jour.

L'action conjuguée des « degrés » de sécheresse et du vent a permis de définir des seuils d'alerte que l'expérience, pour la région étudiée, semble confirmer.

SUMMARY

The collation of forest fire statistics with climatological data has induced the authors to determine danger levels for the mediterranean area. They consider drought and wind as the main responsible factors.

The notion of drought has been based on water deficiency of the soil from daily computations (thanks to THORNTHWAITE's relationship) for each climatic area. For their region they have estimated soil saturation to 150 mm. A daily estimate of the level of groundwater reserves is thus kept up to date.

The joint action of drought « degrees » and wind made possible a determination of danger levels which seem to be verified by experimentation for the studied area.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Gegenüberstellung von Waldbrandstatistiken und klimatologischen Angaben haben die Verfasser zur Bestimmung von Gefahrenstufen geführt, dies für die Mittellandgegend. Die überwiegende Grundfaktoren wurden der Trockenheit und dem Wind zugeführt.

Der Begriff von Trockenheit wurde auf den alltäglich ausgerechneten Fehlbetrag im Wasserstand des Bodens — in klimatisch abgegrenzten Zonen — (nach einer Formel von THORNTHWAITE) begründet. Eine Bodensättigungsziffer von 150 mm wurde für diese Zonen bestimmt. Eine tägliche Bilanzzahl an Wasservorrat des Bodens wurde auf diese Weise geführt.

Die doppelt zusammenarbeitende Wirkung der « Gradzahl » von Trockenheit und Wind, genehmigte Alarmszustände aufzuzeichnen, welche die Erfahrung in der erprobten Gegend, zu bestätigen scheint.