

LES MESURES EN METEOROLOGIE

par

l'Ingénieur en Chef de la Météorologie Nationale

V. MARC

(Conférence faite à Moscou le 23 Mars 1960
à l'Institut Polytechnique)

La Météorologie actuelle peut encore être considérée, au même titre que la médecine, comme une science expérimentale dans sa période de transition entre l'"ART" intuitif et l'utilisation rationnelle et purement logique de lois physico-mathématiques.

Les premières connaissances scientifiques ont donné naissance à des théories systématiques, mais idéalisées, simplifiées et par le fait même incomplètes, en raison de la complexité d'action des facteurs à considérer et de leurs innombrables combinaisons possibles.

Cette rationalisation a encore aujourd'hui pour but pratique principal de simplifier et d'étendre les problèmes d'exploitation toujours dirigés vers la prévision - prévision à des échelles de temps et d'espace très variables qui s'étendent de la prévision à des échelles de temps et d'espace très variables qui s'étendent de la prévision d'atterrissage sur un aéroport, détaillée, locale et à échéance de l'ordre d'une demi-heure, jusqu'aux prévisions à 12h pour les longs courriers modernes et même jusqu'aux prévisions de climatologie générale couvrant de vastes régions et de longues périodes (8 jours à un mois).

Entre la science théorique et l'exploitation pratique, prend place la technique de mesure des éléments météorologiques considérés comme fondamentaux, qui restent nombreux, divers et d'importance très variables, selon le but proposé et les échelles de temps et d'espace considérées.

Bref, les mesures météorologiques primordiales, qui peuvent être déterminées par la connaissance des lois théoriques, doivent d'abord être caractérisées en fonction de leur utilisation.

Pour la détermination précise des appareils de mesure à employer dans un réseau d'observation météorologique la seule méthode logique consisterait ainsi à procéder par étapes:

1 - Etudier la variabilité des divers éléments, dans le temps et l'espace,

2 - Apprécier la valeur représentative d'une Station Météorologique pour la région et l'élément considéré, et déterminer la densité du réseau de stations ainsi que la précision utile de l'appareil de mesure en fonction de la variabilité de l'élément dans l'espace, pour la région envisagée.

3 - Déterminer la fréquence des observations, l'exactitude des horaires et la constante de temps de l'appareil en fonction de la variabilité de l'élément dans le temps, au lieu envisagé,

4 - Déterminer enfin, les caractéristiques précises de l'instrument (gamme de mesure, sensibilité) et sa technologie en fonction des conditions locales, géographiques, climatiques et autres.

Cette méthode idéale ne peut généralement pas être appliquée pour le choix des réseaux de stations, par suite de considérations budgétaires déterminantes et des obligations liées aux transmissions aux accords internationaux, aux besoins de normalisation du matériel..., et souvent aussi à cause de l'insuffisance des études préliminaires nécessaires. Par contre, il est toujours possible de remédier partiellement à ces illogismes inéluctables par une recherche logique de la précision optimale des mesures à effectuer, et par la conception rationnelle des appareils de mesure.

Le point fondamental à étudier reste toujours et d'abord la précision nécessaire et suffisante de l'appareil de mesure. Dans ce but, deux types principaux d'erreurs possibles sont à considérer:

1°- l'erreur instrumentale proprement dite, inhérente à l'ensemble formé par l'organe sensible et l'indicateur. Cette erreur peut être envisagée sous deux formes: tantôt en valeur relative (comme pour la mesure de la vitesse du vent), tantôt en valeur absolue (comme pour la mesure de la température), selon l'élément, mais aussi selon le but de la mesure. Par exemple, une erreur absolue constante sur une altitude barométrique est liée à une erreur relative constante sur la lecture du baromètre;

2°- les multiples sources d'erreurs de natures diverses dues à la lecture de l'indicateur, aux méthodes d'interpolation, et surtout aux corrections et calculs indispensables pour obtenir la grandeur exploitée. Par exemple, les températures lues aux thermomètres sec et mouillé d'un psychromètre donnent des approximations très différentes aux diverses grandeurs qui ne découlent: humidité, point de rosée, tension de vapeur, etc...

En fonction de ces impératifs, il reste ensuite à concevoir un ensemble possédant la constante de temps désirée, et répondant aux conditions de facilité d'entretien, de robustesse et de simplicité d'exploitation indispensables pour conserver la fidélité de l'appareil dans les limites de la précision requise, ceci en tenant compte des nécessités liées aux conditions normales d'exploitation de l'instrument en réseau, c'est-à-dire pour un fonctionnement permanent et l'exposition possible à toutes les intempéries.

En deuxième partie de cet exposé, nous allons passer rapidement en revue les divers appareils utilisés dans le réseau météorologique français de manière courante, sans évidemment tenir compte du matériel spécial d'études ou de recherches.

Tout d'abord, nous examinerons la catégorie des grandeurs mesurées directement, c'est-à-dire exploitables sans calcul autre que celui de la correction instrumentale éventuelle déterminée par étalonnage préalable de l'instrument de mesure:

1°- La Température de l'air sous abri est appréciée généralement à l'aide de thermomètres de verre, à mercure ou à toluène, graduée en degrés Celsius, et permettant facilement une précision de lecture de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ par interpolation à vue. L'erreur instrumentale maximale est de $0,1^{\circ}\text{C}$ également, et la constante de temps de l'ordre de la demi-minute en moyenne. L'erreur normale finale est d'environ $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond à une précision plus que suffisante dans la plupart des cas. Un thermographe à bilame est utilisé conjointement, donnant une précision de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, et possédant une constante de temps de quelques minutes.

- La température dans le sol à diverses profondeurs était mesurée à l'aide de thermomètres de caractéristiques similaires, mais ce mode de mesure a laissé apparaître des erreurs possibles de contact thermique atteignant $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Actuellement, l'utilisation de thermomètres à résistance correctement étudiées permet une précision absolue de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, avec une constante de temps inférieure à la minute. La faible variabilité de ces températures exige au moins cette précision.

- La température de l'air en altitude est mesurée par l'intermédiaire d'une bilame et d'un système radio-transmetteur, permettant une précision de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, avec une constante de temps variant de 20 secondes au sol à plus d'une minute vers 16.000m. Malheureusement, les erreurs systématiques dues au rayonnement solaire peuvent atteindre plusieurs degrés en fin de sondage. Aussi, une thermosonde de référence à fil vibrant a été conçue pour déterminer les écarts réels, avec une constante de temps de quelques secondes, une précision d'environ 1/10ème de degré, et une erreur de rayonnement du même ordre de grandeur.

2°- Les Précipitations sont évidemment d'abord mesurées à l'aide des pluviomètres classiques permettant une erreur de $\pm 0,1\text{mm}$ pour les pluies dépassant 2mm. Mais les erreurs liées à l'exploitation (éclaboussures, évaporation, turbulence) ne permettent guère de compter sur une précision supérieure à $\pm 0,3\text{mm}$, d'ailleurs largement suffisante en général.

Les pluviographes de système variés permettent des précisions de l'ordre de $\pm 0,5\text{mm}$ sur les hauteurs de pluie, mais très variables sur les intensités. Il semble nécessaire de pouvoir mesurer les hauteurs de pluies à $\pm 0,2\text{mm}$, et apprécier les intensités sur un intervalle d'une minute.

La mesure des intensités reste d'ailleurs encore très délicate par suite des constantes d'intégration très diverses selon les pays et les modèles, et des difficultés habituelles d'explo-

tation des instruments. Actuellement, la tendance générale correspond à une orientation vers la pesée mécanique ou la différentiation électronique pour des intensités moyennes sur des durées à la minute, et vers les augets basculeurs lorsque la durée d'intégration dépasse la minute.

3°- La direction et la vitesse du vent au sol restent toujours indiquées par des girouettes à contacts électriques et des anémomètres électromagnétiques.

Les précisions sont d'environ $\pm 15^\circ$ pour la direction, donnée par 18 directions possibles, et de $\pm 3\%$ pour la vitesse, dans la gamme de 0 à 50m/sec. Plusieurs perfectionnements ont concerné la robustesse du matériel, son utilisation dans les climats rigoureux par installation d'un dégivrage automatique, et l'enregistrement immédiat de la vitesse moyenne du vent sur des périodes consécutives de 10 minutes.

Pour le vent en altitude, la poursuite des ballons de radio-sondage par des radiothéodolites a été récemment automatisée et permet l'inscription directe des relevés à intervalles fixes en autorisant une précision d'angle meilleure que le demi-degré. Mais surtout, l'utilisation des radars réduit maintenant cette erreur en dixième de degré, en donnant un élément complémentaire; la distance oblique connue à $\pm 150\text{m}$ près. Des calculateurs électroniques devraient permettre d'ici peu le calcul et l'affichage du vent pour chaque niveau, en supprimant les erreurs humaines souvent graves et encore fréquentes dans ce domaine.

A côté de ces mesures directes prennent place les mesures semi-directes, nécessitant l'intervention de calculs ou de corrections multiples pour obtenir la valeur de l'élément demandé:

1°- La pression au niveau du sol est toujours calculée à l'aide de baromètres à mercure, du type Fortin ou à large cuvette. La nécessité des diverses corrections habituelles ne permet guère une précision supérieure à $\pm 0,2\text{mb}$ pour la pression à la Station, et l'arbitraire du système de réduction au niveau de la mer augmente cette erreur possible à $\pm 0,4\text{mb}$ environ.

Les barographes, fonctionnant avec les capsules de Vidi normales, sont dotés d'une précision équivalente.

En altitude, les coquilles barométriques et l'ensemble radiotransmetteur ne laissent apprécier les pressions qu'à $\pm 2\text{mb}$ près, et même $\pm 3\text{mb}$ en tenant compte des corrections de température. L'utilisation générale des pressions pour le calcul des altitudes entraîne actuellement l'adoption systématique de coquilles logarithmiques permettant une erreur relative constante de l'ordre de 0,4%.

2°- La tension de vapeur d'eau est déduite généralement de la température du thermomètre sec, comme à $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ près, et d'un autre facteur: soit la température du thermomètre mouillé, avec le psychromètre, soit l'humidité, avec l'hygromètre à cheveux.

Dans le premier cas, l'utilisation des mousselines et l'irrégularité de la ventilation permettent souvent des erreurs de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ sur la différence de température vraie des deux thermomètres.

Dans le deuxième cas, les mèches de cheveux ne permettent pas une fidélité supérieure à $\pm 3\%$ de taux hygrométrique, et ceci seulement pour des humidités supérieures à 20%. Les constantes de temps sont très variables avec la température, et de l'ordre de la demi-minute vers 15°C .

L'hygromètre à point de rosée, du type ALLUARD mais entièrement électronique, autorise par contre la connaissance du point de rosée à $0,1^{\circ}\text{C}$ en laboratoire, et à mieux que $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ en réseau, dans la gamme - 20 à $+ 60^{\circ}\text{C}$.

Pour les mesures en altitude, l'emploi de la baudruche limite la précision absolue de mesure de l'humidité à $\pm 5\%$, avec des constantes de temps passant de 10 secondes à 4 minutes vers -30°C .

Ainsi, dans le domaine de la vapeur d'eau atmosphérique, les précisions atteintes sont médiocres, et devraient être améliorées d'autant plus que le facteur "eau" possède une importance fondamentale dans tous les échanges énergétiques qui régissent l'intensité des phénomènes atmosphériques.

Télé-météorographe.

En troisième lieu, nous décrirons rapidement quelques mesures auxiliaires destinées à compléter l'observation ou à préciser l'estimation subjective de divers éléments:

- La description générale du temps voit son domaine considérablement élargi par l'emploi des radars panoramiques, détectant pratiquement toutes les précipitations dans un rayon de 200km, pouvant atteindre 350km, avec une précision de localisation de l'ordre de 500 mètres.

- La hauteur de la base des nuages était normalement mesurée à l'aide de ballons à vitesse ascensionnelle assez mal déterminée et d'ailleurs troublée par les précipitations. L'usage actuel de projecteurs classiques, la nuit, ou de projecteurs à lumière modulée, le jour et la nuit, permet une appréciation plus sûre par des mesures de hauteurs angulaires.

Enfin et surtout, l'extension du réseau de télémètres à impulsions lumineuses, basés sur le même principe que le radar, donne des indications constamment valables à ± 20 mètres près, dans l'une des gammes de 30 à 400 mètres ou de 50 à 1500 mètres selon le type d'appareil utilisé.

- La visibilité est généralement appréciée par un observateur humain, essayant de distinguer un certain nombre de repères plus ou moins régulièrement échelonnés dans des directions variées. L'utilisation d'un transmissiomètre, mesurant le coefficient d'extinction réel de l'atmosphère, permet la mesure objective du facteur principal déterminant la visibilité. Les autres facteurs, tels que la brillance de fond, entraînent évidemment des variations de la visibilité réelle autour de la valeur déduite du transmissiomètre, mais les variations possibles sont du même ordre de grandeur que celles dues aux facteurs humains d'appréciation.

Citons enfin des mesures diverses effectuées dans des conditions malheureusement encore mal définies internationalement, faute d'études suffisantes ou d'appareils facilement utilisables:

- l'évaporation, mesurée à l'aide d'évaporomètres de type variés, sous abri ou en plein air, ou de bacs de formes diverses, enterrés ou non. Les mesures peuvent en être très précises, mais ne sont rattachables à l'évaporation réelle des surfaces d'eau libre, ou à l'évapotranspiration, que par des artifices pseudo-théoriques et des corrections encore assez arbitraires rendant illusoire toute précision accrue des mesures de base.

- Il y a lieu de citer ici, les travaux importants de DANILIN (Léningrad 1957), sur l'utilisation des radiations nucléaires en hydrométéorologie - pour la mesure de l'humidité dans le sol, et que la Météorologie Française a inscrit à son programme d'étude.

La durée d'insolation, mesurée à l'aide des héliographes les plus disparates (photochimiques, photoélectriques, thermiques ou autres). Une normalisation internationale préconise l'emploi des héliographes type CAMPBELL, simples et robustes, utilisés avec des bandes d'enregistrement de couleur parfaitement définie.

- Le rayonnement solaire global sur une surface horizontale, enregistré par des solarigraphes de principes très différents (bimétalliques, à thermopiles, par distillation, etc...). Toutes corrections faites, et dans de bonnes conditions d'exploitation d'un réseau actinométrique, les sommes horaires ou quotidiennes du rayonnement ne peuvent guère être calculées actuellement à mieux que $\pm 5\%$ près.

Des appareils plus fidèles, mais surtout plus robustes et plus simples d'emploi, seraient évidemment très souhaitables et deviennent de plus en plus nécessaires, surtout si les mesures pouvaient porter sur le rayonnement total, sur le bilan énergétique au sol.

Ce rapide exposé montre clairement l'évolution actuelle de la technique de mesure en météorologie vers une rationalisation accrue et une meilleure objectivité. De plus, la généralisation des méthodes électriques ou électroniques permet une plus grande sécurité d'exploitation, et dans les meilleures conditions, grâce aux facilités de télécommande et de téléindications. La réalisation de stations automatiques permet même une extension remarquable du réseau d'observations: elles transmettent sur demande (par radio ou téléphone), ou à heures fixes, les valeurs de la température (à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), de l'humidité (à $\pm 1\%$), de la pression (à $\pm 0,5\text{mb}$), de la hauteur d'eau depuis l'observation précédente (en code de 10 valeurs) et de la vitesse moyenne et de la direction du vent (10 valeurs de vitesse - 18 directions).

Je ne citerai que pour mémoire diverses réalisations simples, mais d'une utilité incontestable pour l'accroissement de la sécurité d'exploitation, par exemple: l'avertisseur de précipitation, l'avertisseur de verglas, et tous les systèmes d'avertissements variés adaptables aux mesureurs de plafond ou de visibilité.

En conclusion, je voudrais insister sur les conséquences pratiques de cette évolution concernant les techniques de mesures météorologiques.

L'ancien observateur se fiant à son intuition laisse peu à peu la place au Technicien placé devant des tableaux de mesure de plus en plus nombreux, issus de techniques de plus en plus complexes: ce fait est indiscutable, et souvent même souhaitable. Mais il s'ensuit immédiatement que le constructeur d'appareils se doit d'étudier ses instruments en évitant toute complexité inutile et toute précision superflue ou illusoire, en recherchant la fidélité, la sécurité d'emploi, la facilité d'entretien et de contrôle, mais aussi en soignant la commodité d'utilisation, la sûreté de lecture et même l'esthétique fonctionnelle.

Car il y aura toujours un homme pour contrôler ces cadrans, pour dépouiller ces courbes, pour interpréter ces indications...
