La mécanique de l'évaporation^(*)

Mechanics of evaporation

(Thèse présentée devant la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble)

PAR MAURICE L. ALBERTSON

PROFESSOR OF CIVIL ENGINEERING AND HEAD OF FLUID MECHANICS RESEARCH (COLORADO A AND M COLLEGE)

- I. INTRODUCTION. — Définition de l'évaporation; notion de couche limite, son importance, son lien avec la diffusion.
- II. PHYSIQUE DU PHÉNOMÈNE DE L'ÉVAPORATION. — Théorie fondamentale de la diffusion, envisagée sous deux aspects : moléculaire; correspondant à l'écoulement laminaire, et molaire, correspondant à l'écoulement turbulent. — Diffusion appliquée à l'évaporation. — Echange de chaleur. — Définition des deux types d'écoulement : laminaire et turbulent. — Influence du gradient de densité. — Effets des corps dissous.
- III. RÉSUMÉ DES RECHERCHES ANTÉRIEURES. — Rappel de la loi de Dalton. — Théories relatives au bilan d'énergie et au transfert de masse. — Critique des recherches antérieures. — Programme des recherches à effectuer.
- IV. DÉVELOPPEMENTS THÉORIQUES. — Etude de la convection : 1. libre, laminaire et turbulente; 2. forcée. — Etude des écoulements laminaire et turbulent. — Analogie de Reynolds et ses extensions, dues à Taylor, Prandtl, Karman, Hoffmann, etc.; équations empiriques. — Leur discussion. — Application de l'analogie de Reynolds à l'évaporation. — Notion du mélange continu et équation théorique d'évaporation donnée par Sutton.
- V. RECHERCHES EN LABORATOIRE. — 1° Sur paroi plane d'évaporation, à Iowa; 2° sur paroi plane et soufflerie, au Colorado A. & M. College; 3° sur modèle réduit du lac Hefner, au Colorado Laboratory.
- VI. DISCUSSION DES RÉSULTATS des expériences précédentes. — Calcul de la vitesse de frottement.
- VII. CONCLUSIONS.
- I. INTRODUCTION. — Evaporation defined; the concept of a boundary layer, its importance and its connection with diffusion.
- II. PHYSICS OF THE EVAPORATION PHENOMENA. — Fundamental diffusion theory considered from two points of view: molecular diffusion corresponding to laminar flow and molar diffusion corresponding to turbulent flow. Diffusion applied to evaporation. Heat transfer. Two types of flow defined: laminar and turbulent. The effect of the density gradient. Effects resulting from dissolved matter.
- III. A SUMMARY OF EARLIER INVESTIGATIONS. — Dalton's law restated. Theories connected with energy distribution and the mass transfer. A criticism of earlier investigations. A research programme to be followed.
- IV. THEORETICAL DEVELOPMENTS. — An investigation of convection: 1) Free, laminar and turbulent convection, 2) Forced convection. An investigation of laminar and turbulent flows. Reynolds' analogy and extensions of it made by Taylor, Prandtl, Karman, Hoffmann, etc.; empirical equations and discussions of them. The mixing concept and Sutton's theoretical evaporation equation.
- V. LABORATORY INVESTIGATION. — 1) Of a plane evaporation boundary at Iowa, 2) of a plane boundary with a wind tunnel at Colorado A & M College. 3) of a scale model of Lake Hefner at the Colorado laboratory.
- VI. A DISCUSSION OF RESULTS of these experiments. Calculation of shear velocity.
- VII. CONCLUSIONS.

LISTE DES SYMBOLES — LIST OF SYMBOLS

Symboles	SIGNIFICATION		Dimensions
$2b$	largeur de la plaque,	width of plate,	L
e_s	pression de vapeur à la surface de l'eau,	vapor pressure at the surface of the water,	F/L ²
e_a	pression partielle de vapeur dans l'air ambiant,	partial pressure of the water vapor in the ambient atmosphere,	F/L ²
g	accélération due à la pesanteur,	gravitational acceleration,	L/T ²
k	constante de Karman et conductivité thermique de l'air,	Karman constant and thermal conductivity of air,	

(*) Cf. la Houille Blanche, n° 5, 1955, p. 704 et n° 1, 1956, p. 36.

Symboles	SIGNIFICATION		Dimensions
E	intensité (ou taux) d'évaporation,	evaporation rate,	L/T
F	résistance totale,	total drag,	F
Gr	nombre de Grashof,	Grashof number,	
L	longueur de la paroi,	length of evaporation boundary,	L
M_1	intensité globale de l'évaporation pour $x_0 \neq 0$,	total rate of evaporation, when $x_0 \neq 0$,	FT/L ²
M_2	intensité globale de l'évaporation pour $x_0 = 0$,	total rate of evaporation, when $x_0 = 0$,	FT/L ²
N	nombre de Nusselt, ou coefficient d'évaporation, ou intensité de diffusion,	Nusselt number or evaporation coefficient or rate of diffusion,	
Nu	nombre de Nusselt modifié pour l'évaporation,	modified Nusselt number for evaporation,	
Pr	nombre de Prandtl,	Prandtl number,	
R	$\frac{Ux}{\nu}$, nombre de Reynolds,	Reynolds number	
R_*	$\frac{U_*x}{\nu_e}$, nombre de Reynolds,	Reynolds number	
R(ξ)	coefficient de corrélation pour w' ,	correlation coefficient for w'	
T	température,	temperature,	
T'	fluctuation de la température locale instantanée autour de sa valeur moyenne,	fluctuation of local instantaneous temperature from the mean,	
T_0	température moyenne de l'air ambiant,	mean temperature of ambient air,	
T_p	température moyenne dans le temps pour une plaque donnée au cours d'un essai,	temporal mean temperature for individual plate during run,	
ΔT	$T_p - T_0$,		
U_0	vitesse ambiante du mouvement moyen,	ambient velocity of the mean motion,	L/T
U_*	vitesse moyenne de frottement à l'extrémité aval de la surface considérée,	mean shear velocity at the downstream end of the surface under consideration,	L/T
x_L	x'/x_0 ,		L
x_0	distance, comptée vers l'aval, à partir de l'extrémité de la paroi,	distance downstream from the beginning of evaporation boundary,	L
δ	épaisseur de la couche limite du mouvement,	thickness of momentum boundary layer,	L
ϵ	coefficient de diffusion turbulente,	eddy viscosity or turbulent diffusion coefficient,	
α	conductivité thermique,	heat conductivity,	
η	$\sqrt{\tau/\rho} (y/\nu)$,		
μ	viscosité dynamique de l'air,	dynamic viscosity of air,	FT/L ²
ν	viscosité cinématique de l'air (coefficient de diffusion moléculaire pour le transfert du mouvement, dans l'air).	kinematic viscosity of air (molecular diffusivity coefficient for momentum transfer in air),	L ² /T
ν_e	coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air,	molecular diffusivity coefficient for water vapor into air,	L ² /T
ρ	masse spécifique de l'air ambiant,	density of ambient air,	M/L ³
σ	ν/ν_e nombre de Prandtl,	Prandtl number,	
τ	effort tangentiel dans un plan horizontal et selon x ,	shearing stress in a horizontal plane in the direction of x ,	M/LT ²
τ_0	effort tangentiel sur la paroi et selon x .	shearing stress on the horizontal boundary in the direction of x .	F/L ²

Symboles	SIGNIFICATION		Dimensions
l	longueur de mélange,	mixing length,	L
n	exposant,	exponent,	
q	taux de transfert de chaleur par unité de surface et par unité de temps,	rate of heat transfer per unit area and per unit time,	F/LT
t	temps,	time,	T
u	composante de la vitesse locale instantanée selon l'axe des x ,	local instantaneous velocity in the direction of x ,	L/T
u'	fluctuation de la vitesse locale instantanée autour de sa valeur moyenne, dans la direction u ,	fluctuation of local instantaneous velocity from the mean in the direction of u ,	L/T
v	vitesse locale instantanée selon la direction horizontale normale à u ,	local instantaneous velocity in the horizontal direction perpendicular to u ,	L/T
v'	fluctuation de la vitesse locale instantanée autour de sa valeur moyenne dans la direction v ,	fluctuation of local instantaneous velocity from the mean in the direction of v ,	L/T
w	composante verticale de la vitesse locale instantanée,	local instantaneous velocity in the vertical direction,	L/T
w'	fluctuation de la vitesse locale instantanée autour de sa valeur moyenne dans la direction w ,	fluctuation of local instantaneous velocity from the mean in the direction of w ,	L/T
x	distance comptée vers l'aval, à partir de l'extrémité de la paroi expérimentale,	distance downstream from the beginning of evaporation boundary,	L
x'	distance comptée vers l'aval, à partir de l'arête-guide de la paroi,	distance downstream from the leading edge of boundary,	L
y	distance mesurée normalement à l'écoulement d'air,	distance measured cross-wind,	L
z	distance mesurée verticalement à partir de la surface de la paroi,	distance measured vertically from the surface of evaporation boundary,	L
z_1	hauteur de référence,	reference elevation,	L
A	constante,	constant,	
B	constante,	constant,	
C	coefficient,	a coefficient,	F/L ²
C_e	coefficient d'évaporation,	evaporation coefficient,	
C_f	$\frac{D_x}{x' \rho U_0^2/2}$ coefficient de frottement,	drag coefficient	
C_h	$\frac{q}{\rho U_0 C_p \Delta T}$ coefficient de transfert de chaleur,	heat transfer coefficient	
C_p	chaleur spécifique de l'air à pression constante,	specific heat of air at constant pressure,	L ² /T ² °F
C_s	tension de vapeur saturante à la température T_m ,	saturation water vapor concentration at temperature T_m ,	F/L ² (*)
C_0	tension de vapeur de l'air ambiant,	water vapor concentration of ambient air,	F/L ² (*)
D	coefficient de diffusion,	coefficient of diffusion,	
D_w	force de frottement pour une paroi de largeur et de longueur unité	drag force for boundary of unit width and length,	F/L

(*) Sauf dans les équations 27 et 28, où ce terme est sans dimension.

(*) Except in Eqs. 27 and 28, where it is dimensionless.

CHAPITRE V. — RECHERCHES EN LABORATOIRE

En partant des considérations théoriques présentées au chapitre IV et des investigations expérimentales brièvement décrites dans la dernière partie du chapitre III, on a construit des appareils d'expérimentation et de mesure pour notre étude :

- 1° Une paroi d'évaporation a été construite à Iowa Institute of Hydraulic Research [1];
- 2° Une soufflerie et une paroi d'évaporation ont été établies au Climatic Research Laboratory du département du génie civil du Colorado A and M College [6];
- 3° Une étude [5] spéciale sur modèle réduit du Lac Hefner a été élaborée à Colorado Laboratory. Les dispositifs expérimentaux employés dans ces études sont décrits ci-après.

Paroi plane à Iowa

L'ensemble des appareils employés dans cette étude comprenait une soufflerie, une paroi expérimentale, des surfaces d'évaporation, des instruments de mesure de vitesse, de concentration de vapeur et d'évaporation. On décrira séparément chaque appareil.

SOUFFLERIE :

En vue d'obtenir les données expérimentales pour déterminer les fonctions encore inconnues dans l'analyse précédente, on a employé la

grande soufflerie de l'Institut. La section d'essais de la soufflerie atteint 4 ft haut, 6 ft large et 20 ft long. L'air frais fourni par les fenêtres nord était aspiré par les auvents est et ouest. Un ventilateur de 7,5 ch donnait une vitesse maximum de 25 ft par seconde et les ouvertures, réglables à l'aval de la section d'essais, permettaient de régler les vitesses à des valeurs inférieures à 1 ft par seconde.

Du fait que l'entrée et les sorties de la soufflerie étaient placées sur des côtés différents du laboratoire, d'appréciables fluctuations momentanées de la vitesse moyenne se manifestaient. Des conditions atmosphériques instables créaient, en effet, une distribution de pression inégale autour du local. On a pourtant supposé que cette situation n'agissait pas sensiblement sur des mesures qui recherchaient d'ailleurs des moyennes plutôt que des valeurs instantanées.

PAROI EXPÉRIMENTALE :

Le taux de l'évaporation dépend du type de couche limite. Il faut donc que l'on puisse reproduire séparément ou simultanément les deux types (laminaire et turbulent), pour le vent à l'amont des surfaces d'évaporation. Pour cela, une paroi expérimentale (fig. 2) de 23 pouces de large et de 60 pouces de long, a été réalisée, munie d'un bec en plexiglass de 1/2 pouce d'épaisseur, 23 pouces de largeur et 12 pouces de long, dont l'extrémité amont, sur 6 pouces, taillée en biseau, se termine par une arête très vive.

WIND TUNNEL :

In order to obtain experimental data for empirical determination of the unknown functions in the foregoing analysis, use was made of the larger Institute wind tunnel, which had a test section 4 ft high by 6 ft wide by 20 ft long. Fresh air was drawn in through windows on the north end and exhausted through windows on the east and west sides of the laboratory. A 7 1/2-HP Clarage fan gave a maximum velocity of 25 fps, and adjustable louvers at the downstream end of the test section permitted a sensitive control of velocity to magnitudes less than 1 fps.

Because the entrance and exits of the tunnel were located on three different sides of the laboratory, appreciable momentary fluctuations from the mean velocity were sometimes encountered due to unsteady atmospheric conditions which created an uneven pressure distribution around the building. It was believed, however, that this situation did not materially affect the measurements, all of which involved average rather than instantaneous quantities.

EXPERIMENTAL BOUNDARY :

Because the rate of evaporation is dependent upon the type of boundary layer, it was necessary to be able to produce either

CHAPTER V

LABORATORY INVESTIGATIONS

On the basis of the theoretical relationships presented in Chapter IV and the experimental investigations briefly outlined in the last part of Chapter III, experimental equipment and instrumentation was fabricated to make the studies desired. First, an evaporation boundary was constructed at the Iowa Institute of Hydraulic Research. Second, a wind tunnel and evaporation boundary was built in the Climatic Research Laboratory of the Civil Engineering Department of Colorado A and M College [6]. Third, a special evaporation model study [5] was made of Lake Hefner in the same laboratory. The equipment and instrumentation used for these studies are described in the following pages

Plane Boundary at Iowa

The items of equipment and the instruments used for the Iowa study included the wind tunnel, the experimental boundary, the evaporation surfaces, and instruments for the measurement of velocity, the measurement of vapor concentration and the measurement of evaporation. Each of these items will be discussed.

FIG. 2
Appareillage
expérimental
d'évaporation
à Iowa.

Immédiatement, en aval du bec, on a disposé deux plaques d'aluminium de 8 pouces de large et de 48 pouces de long, de chaque côté de l'élément mobile d'évaporation. Celui-ci présentait lui-même 6 pouces de large et 12 de long (fig. 3). Pour empêcher l'écoulement latéral de l'air en travers de la paroi, une cloison en aluminium de $6 \times 3/16$ pouces, avec arête vive à l'amont a été fixée de chaque côté de la paroi. Celle-ci était tenue en avant par le bec en plexiglass et en arrière par une cornière en cuivre de dimensions $1/8 \times 1/2$ pouces. L'épaisseur de la paroi variait entre $3/8$ et $1/2$ pouces, les irrégularités étant sur le côté inférieur. La tenue de l'ensemble dans le centre de la partie d'essais du tunnel était assurée par 8 haubans en corde à piano accrochés à des tendeurs et des pitons à œil au fond et au plafond du tunnel

type (laminar or turbulent) upwind from the evaporating surfaces. To accomplish this an experimental boundary, 23 in. wide and 60 in. long, see Fig. 2, was made with a nose piece of $3/8$ -in. plexiglas 23 in. wide and 12 in. long, the upstream portion of which was faired over a distance of 6 in. to a very sharp edge. Immediately downstream from the nose piece were two sections of aluminum 8 in. wide and 48 in. long placed on each side of the movable evaporation unit, which in itself was 6 in. wide and 12 in. long, see Fig. 3. To prevent lateral flow of air across the boundary, a 6 in. by $3/16$ -in. aluminium side-shield, with a sharp leading edge, was screwed to each side of the boundary. The boundary was held together in front by the Plexiglas nose piece and in the rear by a $1/8 \times 1/2$ in. brass angle. The thickness of the boundary was from $3/8$ in. to $1/2$ in., the irregularities being on the under side. Supporting the entire boundary in the center of the tunnel test section were 8 piano-wire guys hooked to turn-

(fig. 2). On a réglé le niveau de la paroi au niveau de charpentier en agissant sur ces tendeurs.

Pour établir la turbulence dans la couche limite, on a disposé à angle droit en travers de l'écoulement un ruban amovible de $1/4$ pouce de largeur. Ce ruban est placé 2 pouces en amont de l'arête vive amont. Il opère ainsi une détente et crée une perturbation initiale (voir fig. 2). On a fait un essai analogue avec des tiges de $1/8$ ou $1/4$ de pouce de diamètre, mais on a trouvé que pour les petits nombres de REYNOLDS, la couche limite avait tendance à demeurer laminaire, à moins qu'on employât le ruban.

ELÉMENTS D'ÉVAPORATION :

Pour simplifier la mesure du taux d'évaporation et pour empêcher la formation d'ondes su-

buckles and screw-eyes in the floor and ceiling of the tunnel. Fig. 2. Leveling of the plane was accomplished with a sensitive carpenter's level by adjusting the turnbuckles.

To make the boundary layer turbulent, a removable $1/4$ in. tape, which acted as a trigger by creating an initial disturbance, was fastened at right angles to the flow 2 in. upstream from the sharp leading edge, see Fig. 2. Rods of $1/8$ -in. and $1/4$ -in. diameter were also tried but it was found that for the lower Reynolds numbers the boundary layer tended to remain laminar unless the tape was used.

EVAPORATION SURFACES :

To simplify measurement of the rate of evaporation and to prevent formation of surface waves, the evaporating surfaces were made of porous porcelain having interstices, sufficiently small to

FIG. 3
Détail
d'un élément
d'évaporation

perficielles, on a réalisé des éléments d'évaporation avec de la porcelaine poreuse présentant des interstices suffisamment réduits pour donner lieu à une ascension capillaire considérable. Ces morceaux de porcelaine de 2 pouces de large avaient leurs arêtes soigneusement chanfreinées, puis étaient cimentés aux boîtes de cuivre, à la litharge et à la glycérine (voir fig. 3).

Dans la partie centrale de l'élément d'évaporation, de 2 pouces de large, on disposait les éléments montés sur des alvéoles rectangulaires de longueur variable, sur lesquels on effectuait les mesures d'évaporation. On pouvait déplacer ces boîtes longitudinalement jusqu'à la position désirée dans la partie centrale. Les côtés de l'élément étaient constitués par deux plaques de garde en porcelaine de 2×12 pouces. L'évaporation de ces parois diminuait au minimum l'effet de la diffusion latérale nette de l'humidité des surfaces centrales. Pour fournir l'eau distillée nécessaire à l'évaporation, on avait relié des

tubes de caoutchouc aux prises de cuivre au fond de chaque boîte.

MESURE DES VITESSES :

On a mesuré la vitesse de l'écoulement d'entrée au moyen d'un anémomètre à hélice de 5 pouces. Cet anémomètre était disposé sur un support entre la paroi du tunnel et la paroi expérimentale. On l'avait placé approximativement à 1 ft à l'amont de l'arête amont. L'anémomètre fut étalonné dans le tunnel en utilisant de la fumée pour les vitesses faibles et à l'aide d'un tube de Pitot pour les vitesses élevées.

Pour déterminer la distribution des vitesses dans la couche limite, un anémomètre à fil chaud en fil de tungstène, de 0,0004 pouce de diamètre et de 1/8 de pouce de longueur, était monté sur un support mobile. L'appareil de réglage vertical était un micromètre de marque BROWN et SHARP à graduation en 0,0001 pouce.

give considerable capillary rise. These porcelain pieces were 2-in. wide and had been beveled on the edges with a grinder before cementing with litharge and glycerine to the brass boxes as shown in Fig. 3. In the central 2-in. portion of the evaporation unit were surfaces mounted on boxes of varying length from which evaporation was measured. These boxes could be moved longitudinally to any desired position in this central area. The sides of the unit consisted of two 2-in. by 12-in. porcelain "buffer" surfaces, the evaporation from which reduced to a minimum the effect of net lateral diffusion of moisture from the center surfaces. To supply the distilled water for evaporation, rubber tubing was connected to a copper-tubing inlet in the bottom of each box.

MEASUREMENT OF VELOCITY :

The velocity of the incoming flow was measured with a 5-in. vane-type anemometer placed on a stand between the wall of the tunnel and the experimental boundary, and about 1 ft upwind from the leading edge. Calibration curves for the anemometer were obtained by rating it in the tunnel, using smoke at low velocities and a Pitot tube at high velocities.

To obtain the velocity distribution within the boundary layer, a 0.0004-in. tungsten hot-wire anemometer about 1/8 in. long was mounted on an adjustable stand. The vertical-adjustment device was a Brown and Sharp micrometer with 0.0001-in. graduations. Due to a continual drift in the velocity rating of the wire, it had

FIG. 4
Plan
de la
soufflerie.

A cause des changements continuels des caractéristiques du fil, il devait être étalonné avant et après chaque essai. La position du fil vis-à-vis de la surface a été déterminée avec un microscope gradué, du type binoculaire, au moyen duquel il était possible de connaître la distance entre le fil et son image réflétee dans la surface polie de la paroi (plexiglass et aluminium). Le microscope était calé à 20° par rapport à l'horizontale sur un châssis supporté par les côtés de la paroi. On a réalisé la mesure des vitesses au moyen d'une sorte d'ampèremètre du type température constante, avec un système électronique amplificateur étalonné éventuellement, lui aussi, avec un tube de PITOT et de la fumée.

MESURE DE CONCENTRATION DE VAPEUR :

Pour mesurer la concentration de vapeur d'eau

to be calibrated before and after each run. The location of the wire relative to the surface was determined with a graduated binocular microscope, from which it was possible to determine the distance between the wire and its image in the polished surface of the boundary (Plexiglas and aluminum). The microscope was mounted on a 20-degree angle with the horizontal, on a truss supported by the side-shields of the boundary. Velocity readings were taken from the ammeter of a constant temperature type of electronic amplifying system which also was calibrated with a Pitot tube and smoke.

MEASUREMENT OF VAPOR CONCENTRATION :

To measure the concentration of the water vapor in the ambient

dans l'air ambiant, on devait déterminer d'abord les températures humides et sèches. On y arrive par l'emploi de thermo-couples en cuivre-constantan, humides et secs, disposés dans la section d'essais près de la paroi. La différence de potentiel entre les thermo-couples était mesurée au potentiomètre de précision LEEDS-NORTHROP. On a effectué des contrôles préliminaires pour être sûr que la mesure du couple humide était indépendante de la vitesse dans tout l'intervalle utilisé.

Pour déterminer la température de l'eau à la surface en évaporation, les thermo-couples ont été placés dans des rainures situées très peu au-dessous de la surface. Ces rainures ayant approximativement 1/64 pouce de profondeur et 1/4 de pouce de longueur ont été rodées à la fraise de dentiste. Les thermo-couples de cuivre-constantan, n° 40, étaient fixés au plâtre de Paris (fig. 3).

air, it was necessary first to determine the wet- and dry-bulb temperatures. This was accomplished by use of wet and dry copper-constantan thermocouples placed in the test section beside the boundary, the potential difference between the thermocouples being measured with a precision Leeds-Northrup potentiometer. Preliminary checks were made to be certain that the wet-junction reading was independent of the velocity over the range employed.

To determine the water temperature at the surface of the evaporation pieces, thermocouples were embedded in grooves barely under the surface. The grooves, approximately 1/64-in. deep and 1/4-in. long, were cut in the surface with a dentist's drill, and number 40 copper-constantan thermocouples were cemented in place with plaster of Paris, as seen in Fig. 3.

FIG. 5
Vue intérieure
de la soufflerie
à
"Colorado A and M
College".

MESURE DE L'ÉVAPORATION :

Chaque tube de caoutchouc relié à une boîte d'évaporation d'eau était alimenté par des pipettes sérologiques de 1 à 5 millilitres, sur coulisse mobile. Cela permettait d'élever les pipettes selon la marche de l'évaporation pour obtenir une charge constante au-dessus de la surface en évaporation. Par ce moyen, le taux de l'évaporation a été mesuré par la hauteur à laquelle chaque pipette a dû être élevée pour qu'on y maintienne un niveau constant.

Paroi plane à Colorado

L'investigation préliminaire à Colorado [6] a consisté en une étude systématique d'une paroi d'évaporation. A cet effet, on a construit une

soufflerie qui sera décrite dans les paragraphes suivants. On décrira aussi la paroi expérimentale, l'alimentation en eau, les appareils de mesure de vitesse, de température, de l'humidité relative et un essai-type d'évaporation.

SOUFFLERIE :

La soufflerie était du type à circulation continue dans un seul sens avec une section d'essai carrée de 6 ft et de 28 ft de long. Bien qu'il fût possible d'employer à volonté la soufflerie à circuit fermé, l'air utilisé dans la présente étude n'était pas remis en circulation, car la quantité d'eau évaporée aurait pu augmenter continuellement l'humidité relative du courant d'air. La vue en plan de la soufflerie fait l'objet de la figure 4.

MEASUREMENT OF EVAPORATION :

Each rubber tube connected to an evaporation box was supplied with water from either a 1-ml or a 5-ml serological pipette mounted on an adjustable slide. This permitted the pipette to be raised as evaporation progressed, in order to keep a constant head on the evaporation surface. In this manner the rate of evaporation was measured by the amount the pipette had to be raised to maintain a constant water level in it.

Plane Boundary at Colorado

The initial investigation made at Colorado [6] was a systematic study of a plane evaporation boundary. For this purpose a wind

tunnel was constructed as will be described in the following paragraphs. Also described will be the experimental boundary, the water-feed and measuring system, the velocity measurements, the temperature measurements, the relative humidity measurements, and a typical evaporation run.

WIND TUNNEL :

The wind tunnel is of the non-recirculating type, with a test section 6 ft square and 28 ft long. Although the wind tunnel was constructed to operate as a recirculating tunnel if so desired, air for this study was not recirculated because the amount of water evaporated would have continuously increased the relative humidity of the ambient air stream. A plan view of the tunnel is shown in Fig. 4.

FIG. 6
Vue extérieure
de la soufflerie
à
"Colorado A and M
College".

La distribution de la vitesse axiale dans un plan normal à l'écoulement a été mesurée aux nœuds d'une grille à mailles carrées de 6 in. Cette distribution de la vitesse dans la section d'essai à 1 ft en avant de l'arête amont de la paroi à expérimenter a été trouvée très satisfaisante. Les variations de part et d'autre de la moyenne furent inférieures à 1 %, sauf dans la mince couche limite près de la paroi. Des écrans disposés au début du convergent créaient une turbulence uniforme et diminuaient l'intensité globale de la turbulence du courant d'air à environ 0,7 %, pour une vitesse moyenne de 8 ft par seconde.

L'air était aspiré dans la section d'essai par une hélice d'avion en bois, de 2,5 ft de rayon. La puissance était fournie suivant les besoins, soit par un moteur à essence de 92 ch., soit par un moteur Diesel de 182 ch, soit par l'un et l'autre.

The axial velocity distribution in a plane perpendicular to the flow was measured at points on a grid of 6-in. squares. This velocity distribution in the test section, 1 ft upstream from the leading edge of the test boundary, was found to be very good—not varying by more than 1 percent from the mean, except in the thin boundary layer along the wall. Screens at the beginning of the transition created a uniform turbulence and reduced the overall turbulence intensity of the ambient air stream to about 0.7 percent at a mean velocity of 8 fps.

Air was drawn through the test section by a wooden air-craft propeller with a 2½-ft. radius. Power for the propeller was supplied by either a 92-HP gasoline engine or by a 180-HP diesel engine or by both, depending upon power requirements.

PAROI EXPÉRIMENTALE :

Comme on le voit sur la figure 7, la paroi expérimentale était montée sur deux fers en I et deux cornières en acier. La surface d'évaporation était située à 13 pouces au-dessus du fond du tunnel. Cette surface se composait de porcelaine lisse poreuse de 1/8 pouce d'épaisseur. Le nivellement de la surface était assuré soit au moyen d'un niveau de topographe, soit au moyen d'autres instruments de nivellement de haute précision.

La surface d'évaporation comprenait 15 éléments centraux de 4 pouces de large, dont la longueur variait entre 1/2 et 12 pouces. Ces éléments s'appelaient plaques principales. Sur les deux côtés, le long de ces plaques principales, ont été disposées des plaques de garde de 12 × 12 pouces. On a employé ces dernières plaques pour éviter les effets de diffusion latérale.

EXPERIMENTAL BOUNDARY :

The experimental boundary, as shown in Fig. 7 was mounted on two I-beams and two steel-angles, the evaporation surface being 13 in. above the floor of the tunnel. The evaporation surface was made of smooth porous porcelain about 1/8 in. thick. Leveling of the surface was accomplished by the use of an engineers level and a sensitive machinists level.

The evaporation surface consisted of 15 central units 4 in. wide varying in length from ½ in. to 12 in. These units were called, "main plates." On both sides of the strip of main plates were strips of 12 in. by 12 in. "buffer plates." Buffer plates were used to reduce the effect of lateral diffusion,

FIG. 7. — Détails de l'équipement expérimental d'évaporation.

L'acier laminé à froid et le plexiglass ont été employés pour fabriquer le bec qui est profilé (fig. 7). Un générateur de turbulence consistait en un morceau de ruban d'arpenteur de 5/16 de pouce de large. Ce ruban a été installé avec sa face large perpendiculaire à la direction principale et à une distance de 1 ft à l'amont de l'arête. On employait ce perturbateur pour créer une couche limite turbulente sur la surface entière de l'évaporation.

On a construit les bacs d'évaporation en plaques et tiges d'aluminium. Pour éviter les fuites, on a recouvert chaque bac d'une feuille d'aluminium.

Cold rolled steel and "lucite" were used to fabricate the nose piece as shown in Fig. 7. A turbulence promoter, consisting of a piece of surveyors tape, 5/16-in. wide, was installed with its wide edge perpendicular to the main flow 1 ft. upstream from the leading edge to create a turbulent boundary layer over the entire evaporation surface.

The evaporation pans were constructed of aluminum plates and rods. For insurance against leakage the pans were covered with aluminum foil.

ALIMENTATION EN EAU ET APPAREIL DE MESURE :

L'alimentation en eau et l'appareil de mesure consistaient en des burettes de verre montées sur un cadre avec un tube pour chacune des surfaces d'évaporation. On pouvait mesurer facilement la quantité d'eau tirée d'une burette pour alimenter la plaque. Dans chacune des burettes, et dans la bouteille réservoir d'un gallon, plongeait un tube communiquant avec l'air ambiant pour contrôler la pression qui devait correspondre à celle régnant dans la soufflerie.

On remplissait les burettes, les bacs d'évaporation et les bouteilles avec un volume d'un gallon

WATER-FEED AND MEASURING SYSTEM :

The water feed and measuring system consisted of glass burettes mounted on a rack with one tube for each evaporating plate. As the water was drawn from the burette to feed the plate, the quantity used could be measured easily. Within each of the burettes and the one-gallon reservoir bottle was an "ambient air" pressure tube to control the pressure to that pressure within the tunnel.

avant de commencer l'expérience. Pendant celle-ci, les plaques de garde ont été alimentées par des bouteilles d'un gallon, et les plaques d'étude par des burettes. On n'a employé que de l'eau distillée pour tous les essais.

Au cours d'une expérience, on n'a pas modifié le système. L'alimentation automatique était assurée en arasant au niveau des plaques l'extrémité inférieure des tubes plongeant dans les burettes et les bouteilles. Les sections des tubes d'air plongeant dans les burettes ont été mesurées et, à partir de ces mesures, on a corrigé les volumes d'évaporation tels qu'ils résultaient des lectures des graduations des burettes.

MESURES DE VITESSE :

L'anémomètre à fil chaud a été employé presque toujours pour les mesures de vitesse. Cependant, les vitesses d'air ambiant, pour quelques essais avec des parois sèches, ont été contrôlées au moyen d'un tube de PITOT. On a trouvé un bon accord.

L'anémomètre était fabriqué avec du fil de tungstène de 0,0003 pouce de diamètre et 1/8 de pouce de longueur. On a employé un circuit à température constante.

Les sondes de l'anémomètre ont été étalonnées avant chaque série d'essais dans une chambre circulaire construite spécialement pour l'étalonnage.

Pour la détermination de la vitesse ambiante, un anémomètre à fil chaud a été suspendu à

1,5 ft à l'amont de l'arête amont et à 1,5 ft au-dessous du plafond. Deux thermo-couples, l'un sec, l'autre humide, ont été montés de chaque côté de l'extrémité de l'anémomètre.

Pour mesurer la vitesse moyenne et les profils de l'intensité de la turbulence, un anémomètre à fil chaud se déplaçait grâce au dispositif des figures 9 et 10. Les mouvements verticaux de l'extrémité de l'anémomètre pouvaient être contrôlés à 0,001 pouce. L'extrémité était réglée initialement avec une jauge de mécanicien.

Le mécanisme assurant la translation verticale était monté sur un trépied; deux pieds sur la paroi et un troisième sur le plafond. On pouvait déplacer ce trépied de sorte que des profils de vitesse pouvaient être mesurés en chaque point dans l'axe de la paroi.

Les profils au début de la paroi mouillée n'étaient pas mesurés au cours des essais d'évaporation, mais immédiatement avant ou après les essais pour éviter des perturbations dans cette évaporation.

L'anémomètre à fil chaud employé pour mesurer l'intensité de la turbulence a été construit pour le Colorado A and M College par M. P. G. HUBBARD, de Iowa Institute of Hydraulic Research.

MESURES DE TEMPÉRATURE :

Un thermo-couple en cuivre-constantan avec soudure à l'argent fabriqué par BROWN et SHARPE en fil n° 30 était disposé au centre de chaque plaque principale au niveau de la surface

The burettes and evaporation pans were filled from the 1 gallon bottles before commencing a run. During a run, buffer plates were fed from the 1 gallon bottles and main plates were from the burettes. Distilled water was used at all times.

The system was untouched during the run. Automatic feed was accomplished by setting the lower ends of ambient air tubes within the burettes and bottles at plate level. The cross-sectional areas of the ambient air tubes within the burettes were measured, and on the basis of these measurements, corrections were applied to the evaporation volumes as indicated by the graduated burette readings.

VELOCITY MEASUREMENTS :

The hot wire anemometer was used almost exclusively for velocity measurements; however, the ambient air velocities for some of the runs with dry boundaries were checked with a Pitot tube. Good agreement was obtained.

The hot-wire anemometer was made of 0.0003-in. tungsten wire, 1/8 in long. A constant temperature circuit was used.

The hot-wire anemometer tips were calibrated before each run in a specially-designed circular calibration tank.

For setting the ambient velocity, a forward tunnel hot-wire anemometer was suspended from the tunnel ceiling about 1 1/2 ft upstream from the leading edge and about 1 1/2 ft below the ceiling.

Thermocouples, one dry bulb and one wet bulb, were mounted on each side of the anemometer tip.

For measuring mean velocity and turbulence intensity profiles, a traversing hot-wire anemometer was mounted on the mechanism shown on Fig. 9 and 10. Vertical movements of the anemometer tip could be controlled to 0.001 in. The anemometer tip was initially set with a machinists "feeler" gage.

The vertical traversing mechanism was mounted on a tripod stand, having two legs resting on the boundary and one against the ceiling. The tripod stand could be moved so that velocity profiles could be taken at any point along the center line of the boundary.

Profiles at the front of the wetted boundary were not taken during evaporation runs, but rather directly before or directly after the evaporation runs so that no disturbance of the evaporation processes might occur.

The hot-wire anemometer used for turbulence intensity measurements was constructed for Colorado A and M College by P. G. Hubbard, Research Engineer, Iowa Institute of Hydraulic Research.

TEMPERATURE MEASUREMENTS :

A silver-soldered copper constantan thermocouple, made from Brown & Sharpe No. 30 wire, was located at the center of each

de la plaque pour mesurer T_p . Le circuit du thermo-couple comprenait une soudure de référence placée dans une bouteille thermos remplie de glace à l'eau distillée. Un potentiomètre de précision LEEDS et NORTHRUP servait pour les mesures de force électromotrice.

MESURES DE L'HUMIDITÉ RELATIVE :

L'humidité relative de l'air introduit était mesurée par un psychromètre rotatif placé entre les ailettes de guidage, avant la section d'essai. La température du psychromètre à sec s'accordait bien avec celle donnée par le thermo-couple à sec disposé sur le support de l'anémomètre aval. Mais le thermo-couple humide monté sur l'anémomètre donnait des mesures de température incompatibles avec celles enregistrées par le psychromètre.

Les profils d'humidité relative étaient mesurés en amont de la paroi mouillée au cours de chaque essai d'évaporation. Des thermo-couples secs et humides, placés près de l'extrémité de l'anémomètre mobile, ont été employés pour des mesures d'humidité relative. Le thermo-couple humide donnait aussi des mesures incohérentes.

ESSAI-TYPE D'ÉVAPORATION :

Un essai-type se déroulait de la manière suivante : les anémomètres à fil chaud disposés dans la partie aval de la soufflerie et transversale-

ment étaient étalonnés et placés dans les positions convenables. L'hélice était mise ensuite en mouvement et la vitesse dans le tunnel s'établissait à la vitesse ambiante voulue. Les plaques d'évaporation étaient inondées et épongées pour leur enlever les bulles d'air qui se formaient au-dessous de la surface des plaques. Après une heure d'essais, le régime d'équilibre obtenu, on procédait aux premières lectures sur les burettes puis au relevé de tous les thermocouples. Ces mesures étaient en général répétées toutes les 30 minutes. Aux instants correspondant à la moitié de cette période, on notait les lectures du psychromètre. A un instant donné dans le cours de l'essai, on a mesuré les profils de vitesse et de température en amont de la paroi mouillée. Les mesures du profil de vitesse en aval de la paroi ont été faites immédiatement avant ou après le cours de l'essai. Quant aux mesures de pression barométrique, elles ont été prises selon les besoins. Après avoir rassemblé les renseignements détaillés ci-dessus, le moteur était arrêté, ce qui signifiait : fin d'essai.

Modèle du lac Hefner

L'étude [5] sur modèle réduit faite dans la soufflerie à Colorado A and M College demandait un modèle aussi étendu que possible. On a donc construit (fig. 5) une chambre d'essai spéciale de section carrée (9 ft) et de 26 ft de long et introduite dans la soufflerie en remplacement de la chambre d'essai décrite précédemment. Comme auparavant, on a utilisé la soufflerie en circuit

main plate at plate surface elevation for measuring the plate temperature T_p . The thermocouple circuit included a reference junction located inside a thermos bottle which was filled with ice made from distilled water. A Leeds and Northrup precision potentiometer was used for taking e.m.f. measurements.

RELATIVE HUMIDITY MEASUREMENTS :

The relative humidity of the incoming air was measured with a sling psychrometer, located between duct turns upstream from the test section. The psychrometer dry bulb temperature agreed very well with that given by the dry bulb thermocouple on the forward tunnel hot-wire anemometer mount. The wet bulb thermocouple located on the anemometer mount gave inconsistent temperatures as compared to the sling psychrometer measurements.

Relative humidity profiles were taken at the rear of the wetted boundary during each evaporation run. Dry bulb and wet bulb thermocouples, located adjacent to the traverse hot-wire anemometer tip, were used for relative humidity measurements. This wet bulb thermocouple also gave inconsistent readings.

TYPICAL EVAPORATION RUN :

A typical evaporation run proceeded in the following manner. Hot-wire anemometers for the forward tunnel and traverse

positions were calibrated and then placed in their proper positions. The propeller was started and the tunnel velocity was set at the ambient velocity desired. The evaporation plates were flooded and sponged to remove air pockets which tended to form under the plate surface. After evaporation had proceeded for about one hour to obtain equilibrium, initial burette readings were taken and then all thermocouples were read. Burette and thermocouple readings were generally taken at 30-min. intervals. At the approximate mid-points of these 30-min. intervals, sling psychrometer readings were taken. At sometime during the run, velocity and temperature profile data at the rear of the wetted boundary were taken. The velocity profile data at the front of the wetted boundary were generally taken immediately before or immediately after the evaporation run, so that the traversing mechanism would not disturb the air flow over the plates. Barometric pressure readings were taken as needed.

Lake Hefner Model

The Lake Hefner model study [5], which was also made in the wind tunnel at Colorado A and M College, required a model as large as it was possible to obtain. Therefore, a special test section 9 ft square and 26 ft long, see Fig. 5, was fabricated and inserted in the wind tunnel in place of the test section previously described. Again the wind tunnel was operated as a non-recircu-

FIG. 8
Modèle du lac Hefner, vue d'amont.

ouvert à cause de l'humidité que l'évaporation du modèle introduirait dans l'air.

La plupart des appareils de mesure employés pour cette étude étaient les mêmes que dans l'étude précédente d'une paroi plane.

Modèle : On a choisi pour ce modèle l'échelle unique de 1 : 2.000 horizontale et verticale pour le terrain actuel autour du lac (fig. 8). On s'est servi de clous fixés dans du contreplaqué de 1/2 pouce d'épaisseur à des hauteurs correctes, pour jalonner et aider le modelé du relief. Une mixture de ciment et de persolite a été employée avec succès pour le modelage; enfin, la surface a été lissée et peinte. Le modèle a été

lating tunnel because of the change in the moisture content of the air due to the evaporation from the model.

Much of the equipment and instrumentation used for this study was the same as that used for the study of the plane boundary just described.

The Model—The terrain surrounding the lake, see Fig. 8, was modeled to a scale of 1/2 000 both horizontally and vertically. Nails driven into 1/2-in plywood to the proper height along the contour lines served as a means of vertical and horizontal control for modeling purposes. A Persolite-cement mixture served satisfactorily as a modeling material to fill the voids between the nails. The Persolite-cement surface was sanded smooth and

FIG. 9
Appareil de mesure mobile.

disposé dans la soufflerie de sorte que l'air venant sur lui simulait un vent du sud.

Le lac Hefner lui-même a été modelé à l'échelle horizontale de 1/2.000. On n'a pas reproduit à l'échelle les profondeurs réelles. La superficie du lac modèle était de 25,01 sqft, ce qui correspondait à la superficie réelle de 2.296,8 acres à la cote 1.193.6 ft dans le lac. On n'a pas employé de surface libre d'eau à cause de l'importante quantité d'eau qui se serait dissipée par ondes et éclaboussures. A la place, on a utilisé une surface d'évaporation en plâtre de 1/2 pouce d'épaisseur figurant la rugosité réelle. La surface d'évaporation a été placée dans un bac de métal

painted. The model was oriented in the tunnel in two different directions so that the air passing over it simulated both a south wind and a north wind.

Lake Hefner itself was modeled to a scale of 1/2 000 in the horizontal direction. No attempt was made to scale the actual depth of the lake. The area of the modeled lake was 25.01-sq ft which corresponded to a prototype area of 2296.8 acres at a lake stage of 1193.6 ft. A free water surface was not used in the model because of the various problems which would have been encountered from waves and splashing. Instead, a plaster of Paris evaporating surface, 1/2-in. thick, was utilized. The surface was made very smooth in an attempt to scale the prototype

FIG. 10

Sonde et capot de l'anémomètre à fil chaud

contenant du gravier pour supporter la surface. On a rencontré certaines difficultés à cause des zones sèches qui se maintenaient dans cette surface d'évaporation.

MESURES DE VITESSE :

On employait deux anémomètres à fil chaud pour mesurer la vitesse moyenne de l'air dans le tunnel. La sonde d'un anémomètre était dis-

roughness. This evaporating surface was placed in a metal pan which contained gravel used to support the evaporating surface. A small amount of difficulty was experienced with dry spots developing on this evaporating surface. Cognizance was taken of this fact when treating the data.

VELOCITY MEASUREMENTS :

Two hot wire anemometers were to measure the mean air velocity in the tunnel. The sensing element of one hot wire anemometer was located so as to measure the ambient air velocity in the tunnel. The other was mounted on a traversing mechanism, Fig. 9, which permitted measurement of velocity profiles above the modeled terrain and lake. Tungsten wire was used for the sensing elements of the hot-wire anemometer which were calibrated on a revolving-arm in a circular tank.

TEMPERATURE MEASUREMENTS :

Copper-constantan thermocouples were used to measure the temperature at the various locations. Thirteen thermocouples were placed at the surface of the evaporating surface. Five thermocouples rested on the bottom of the pan containing the evaporating surface. Four were spaced at equal distances between the top of the evaporating surface and the bottom of the pan so that

FIG. 11

Papier de verre rugueux déterminant la couche limite turbulente.

posée pour mesurer la vitesse de l'air ambiant. L'autre, se déplaçant sur une traverse mobile, (fig. 9) permettait les mesures des profils de vitesse au-dessus du terrain et du lac dans le modèle. Du fil de tungstène a été utilisé pour les sondes des anémomètres et ceux-ci étaient étalonnés par les méthodes du bras tournant.

MESURES DE TEMPÉRATURE :

Des thermocouples en cuivre constantan ont été utilisés pour mesurer les températures en divers points. On a disposé :

- 1° 13 thermocouples à la surface d'évaporation;
- 2° 5 sur le fond du bac contenant cette surface;
- 3° 4 régulièrement répartis de la partie supérieure de la surface d'évaporation au

any temperature gradient present might be measured. Ten thermocouples were located at various points on the tunnel walls and the terrain. One thermocouple was used to measure the temperature of the water being fed to the lake. Four thermocouples were used to form two psychrometers. One psychrometer was so situated as to indicate the temperature and humidity of the ambient air in the tunnel. The other was mounted on the same traversing mechanism as the hot-wire anemometer. This latter psychrometer was used to measure temperature and humidity profiles above the modeled terrain and lake.

WATER SUPPLY :

Two water supply systems were incorporated in the model. One was of an automatic type which fed water automatically to the lake when the level of the water in the lake dropped below some predetermined level. The other was of the manual type, and consisted of a valve-controlled burette. When the water dropped below a specified level as indicated by means of an electrical hook gage, water was fed to the lake by opening the burette valve. The manual system was used during the course of a test to measure accurately the amount of water which was evaporated from the model. Distilled water was used at all times.

fond du bac pour qu'on puisse mesurer le gradient de température;

4° 10 en des points différents des parois du tunnel et du terrain;

5° 1 pour mesurer la température de l'eau d'alimentation du lac.

En outre, 4 thermo-couples constituaient deux psychromètres. L'un de ces derniers était disposé de façon à indiquer la température et l'humidité de l'air ambiant dans le tunnel.

L'autre était monté sur la même traverse mobile que l'anémomètre à fil chaud. Ce dernier psychromètre fut utilisé pour mesurer la température et les profils d'humidité au-dessus du terrain et du modèle du lac.

ALIMENTATION EN EAU :

Le modèle comprenait deux systèmes d'alimentation : un du type automatique fournissant l'eau au lac, dès que le niveau de celui-ci était inférieur à une certaine cote prédéterminée; l'autre, actionné à la main, comprenait une burette à contrôle par robinet. Quand le niveau tombait au-dessous d'un niveau déterminé indiqué au moyen d'une jauge électrique, l'eau coulait vers le lac grâce à l'ouverture du robinet. Le système manuel était employé au cours de l'essai pour mesurer exactement la quantité d'eau évaporée du modèle. Comme auparavant, on employait de l'eau distillée.

CHAPITRE VI. — DISCUSSION DES RÉSULTATS

On a décrit les études expérimentales du chapitre V, en partant des développements théoriques du chapitre IV. L'objet du présent chapitre est de présenter les résultats de ces études expérimentales, en même temps que leur analyse et leur comparaison avec les relations théoriques. Nous allons considérer aussi les études d'évaporation sur modèle réduit, compte tenu des deux types d'écoulement : laminaire et turbulent.

Écoulement laminaire

On a traité l'écoulement laminaire dans le chapitre VI où les équations (27) et (28) ont été résolues pour le cas d'une paroi d'approche en amont de la surface en évaporation. Les résultats des expériences à Iowa [1] englobent l'écoulement laminaire et peuvent s'exprimer sous la forme :

CHAPTER VI

DISCUSSION OF RESULTS

On the basis of the theoretical developments in Chapter IV, the experimental studies were made as described in Chapter V. In this chapter, the results of these experimental studies will be presented together with an analysis of and a comparison with the theoretical relationships. Consideration will be given to both laminar and turbulent flow and to the problems of model studies of evaporation.

$$C_e = \varphi \left(R', \frac{x}{x'} \right) \quad (84)$$

Par analogie et par la méthode d'adaptation de la dispersion des points d'une courbe (voir fig. 12), on peut obtenir la formule :

$$C_e = 1,03 \left(\frac{1}{R'} \right)^{(1/2) (x/x')^{1/5} - 1} \quad (85)$$

où $R' = (U_x/\nu)$ et x et x' ont été définis dans la figure 1. L'équation (27) se combine avec la précédente et donne :

$$C_e = F(x_L) S^{-1/2} \quad (86)$$

où $\sigma = 0,6$.

La figure 13 montre une comparaison des résultats expérimentaux avec l'équation (86). L'écart systématique semble décroître quand R'

Laminar Flow

Consideration has been given to laminar flow in Chapter IV where Eqs. 27 and 28 have been solved for the case of an approach boundary upstream from the evaporating surface. The data taken at Iowa [1] include laminar flow and can be represented by :

Through analogy and a process of curve fitting (see Fig. 12) it is possible to obtain :

where $R' = U_x/\nu$ and x and x' are as defined in Fig. 1. Eq. 27 may be combined with this equation to give :

where $\sigma = 0.6$;

FIG. 12
Variation de C_e en fonction de R'
pour la couche limite laminaire (expérimentale).

FIG. 13
Variation de C_e en fonction de R'
pour la couche limite laminaire (théorique).

FIG. 14
Variation de C_e en fonction de R'
pour la couche limite turbulente.

FIG. 15
Variation
de N
en fonction
de R_* .

augmente. Cet écart peut être dû à l'influence de la convection libre. L'équation (28) se transforme pour donner :

$$C_e = (0,6)^{-1/2} (0,552) S^{-1/2} = 0,723 S^{-1/2} \quad (87)$$

et constitue la limite du second membre de l'équation (86) quand $x' - x = 0$. Avec l'équipement utilisé pour ces expériences, il n'était pas possible d'obtenir des résultats pour ce cas particulier.

Les résultats, qu'il s'agisse de couche limite laminaire ou turbulente, sont indiqués dans la figure 15 où $N = \varphi(R_*)$. On a employé un système de représentation qui évite les variables telles que la vitesse ambiante et la longueur d'approche, qui n'ont pas de correspondance dans la nature. Voir chapitre IV pour une discussion détaillée sur ce point.

A comparison of the data with Eq. 86 is given in Fig. 13. The systematic deviation seems to decrease as R' increases. This deviation may be due to the influence of free convection. Eq. 28 may also be arranged to give :

which is the limit of Eq. 86 where $x' - x = 0$. With the equipment used for these experiments, it was not possible to obtain data for this special case.

The data taken for both the laminar boundary and the turbulent boundary have been plotted in Fig. 15 where $N = \varphi(R_*)$. This system of plotting has been arranged to eliminate the unnatural ambient velocity and approach length as applied to nature. See the discussion later in this chapter for more detail on this point.

Ecoulement turbulent

On a vu dans le chapitre IV qu'il y a plusieurs méthodes pour l'étude de l'évaporation d'une paroi située dans une couche limite turbulente. On considérera la méthode d'analogie de REYNOLDS et ensuite celle de SUTTON.

L'extension de KARMAN de l'analogie de REYNOLDS a été présentée au chapitre IV sous la forme des équations (73), (74) et (75). La figure 14 représente les résultats des expériences et les courbes de ces équations. Bien que ces points présentent une dispersion, il est intéressant de voir que cette dernière n'est pas systématique par rapport à x/x' . Il ressort de ce graphique que l'extension de KARMAN peut être appliquée à l'évaporation d'une paroi plane. De plus, l'in-

Turbulent Flow

As discussed in Chapter IV there are several approaches possible to a consideration of evaporation from a boundary into a turbulent boundary layer. The Reynolds analogy approach will first be discussed and then the approach of Sutton.

The Karman extension to Reynold's analogy has been presented in Chapter IV as Equations 73, 74, and 75. Fig. 14 shows the data plotted together with these Equations. Although the data have some scatter, it is interesting to note that the scatter is not systematic with respect to x/x' . From this plot it is evident that the Reynold's analogy as extended by Karman may be applied to evaporation from a plane boundary. Furthermore, the influence

fluence de la distance x' , comptée à partir de l'arête amont de la paroi jusqu'au bout de la surface en évaporation, peut être assez bien représentée par la racine carrée du produit xx' .

Bien que le graphique démontre clairement qu'on peut appliquer l'analogie de REYNOLDS à l'évaporation, la présence de deux variables dans les équations résultantes (73), (74) et (75) fait que cette application à l'évaporation dans la nature est extrêmement difficile : ces deux variables U et x' représentent respectivement la vitesse ambiante et la distance.

Dans les conditions d'évaporation dans l'atmosphère, la vitesse ambiante varie avec la hauteur au-dessus de la surface en évaporation, à cause de l'existence de la couche limite. Il devient donc très difficile d'indiquer une seule valeur significative de la vitesse ambiante qui serait indépendante de la hauteur.

De même, dans les conditions atmosphériques naturelles, la couche limite enveloppant la surface en évaporation ne se développe que rarement en fonction de x' , mais plutôt en fonction du temps. Pour une région déterminée de la surface terrestre, le mouvement de l'atmosphère au-dessus de cette région peut être considéré comme ayant commencé en n'importe quel point de la même façon et au même moment. De plus, avec la progression du temps, l'épaisseur de la couche limite continue d'augmenter pourvu que les conditions d'écoulement ambiant demeurent les mêmes. On ne peut guère savoir pendant combien de temps ce développement continuera, car les conditions atmosphériques de l'écoulement ambiant changent

constamment. Un écoulement permanent ne peut exister que pour de courts intervalles de temps.

En raison des difficultés précédentes, on a essayé de trouver un moyen pour éliminer les deux paramètres : vitesse ambiante U et distance x' des équations d'évaporation.

S'appuyant sur le principe d'analogie, on peut dire que l'effort tangentiel à la paroi est un reflet direct de la capacité de l'écoulement en ce qui concerne le transfert de la quantité de mouvement et ainsi pour le transfert de vapeur. Il semble donc possible d'employer la vitesse de frottement dans le nombre de REYNOLDS et de changer le coefficient d'évaporation pour éliminer la vitesse ambiante [1].

La relation entre N et C_e s'exprime sous la forme :

$$N = \sigma C_e R \quad (88)$$

où C_e et R sont exprimés en fonction de la vitesse ambiante U_0 . Pour obtenir R en fonction de R_* , on doit se référer à la distribution verticale de la vitesse en un point choisi sur la surface de l'eau ou près d'elle. Comme R dépend de la vitesse U_0 , les relations existant entre R et R_* seront indiquées dans les paragraphes suivants.

Pour les valeurs de R_* comprises dans l'intervalle $10^3 \leq R_* \leq 10^5$, la relation de puissance $1/7$ est une approximation assez bonne pour le calcul de la distribution des vitesses; cela nous donne :

$$\frac{U_z}{U_*} = 8,16 \left(\frac{zU_*}{\nu} \right)^{1/7} \quad (89)$$

La valeur de U_z devient U_0 quand z est égal à l'épaisseur δ de la couche limite. Cette épaisseur

of the distance x' from the leading edge of the boundary to the downwind end of the evaporating surface may be considered adequately by the square root of the product xx' .

Although the foregoing plot clearly demonstrates that the Reynold's analogy may be applied to evaporation, there are two variables in the resultant relationship Equations 73, 74, and 75, which make its application to evaporation under natural conditions extremely difficult. These variables are the ambient velocity U and the distance x' .

Under conditions of natural evaporation into the atmosphere there is an ambient wind velocity which varies with altitude above the evaporating surface because of the boundary layer which exists. Therefore, it is extremely difficult to assign a single significant value to the ambient velocity which is independent of elevation.

Likewise, under natural atmospheric conditions of evaporation, the boundary layer covering an evaporating surface seldom, if ever, develops with respect to a distance (such as x'), but rather with respect to time. For a particular area of the earth's surface the movement of the atmosphere over the surface may be considered to begin everywhere in the same way at the same time. Furthermore, as time increases, the thickness of the boundary layer will continue to increase, provided the ambient

flow conditions remain the same. For how long a time this development would continue is not known, because the atmospheric conditions of ambient flow are almost continuously changing—steady flow prevailing only for relatively short periods of time.

In view of the foregoing difficulties, an attempt was made to find a means of eliminating both the ambient velocity U and the distance x' from the evaporation equations.

Because of the analogy principle, it may be reasoned that the shear at the boundary is a direct reflection of the momentum transfer ability of the flow system, and hence a direct reflection of the vapor transfer ability. Therefore, it should be possible to use the shear velocity in the Reynolds number and rearrange the evaporation coefficient to eliminate the ambient velocity [1].

The relationship between N and C_e is : (88) where both C_e and R are expressed as functions of the ambient velocity U_0 . To obtain R in terms of R_* , reference must be made to the vertical distribution of velocity at a selected point on or near the water surface. Since R is based on the ambient velocity U_0 , the relationships between R and R_* are presented in the following paragraphs.

For values of R_* in the range $10^3 \leq R_* \leq 10^5$, the $1/7$ -power relationship is a close approximation for calculation of the velocity distribution and gives : (89)

The value of U_z becomes U_0 when z is equal to the boundary

peut être évaluée au moyen de l'expression :

$$\delta = \frac{0,377 x}{(U_0 x/\nu)^{1/5}} \quad (90)$$

où δ est l'épaisseur de la couche limite et x la distance à partir de l'arête amont de la surface en évaporation jusqu'au point où l'on mesure le profil des vitesses.

Quand z de l'équation (89) est égal à δ donné par l'équation (90), la relation entre R_* et R s'exprime suivant :

$$R = 11,85 (R_*)^{10/9} \quad (91)$$

En utilisant cette relation dans l'équation (88), on obtient :

$$N = 7,11 C_0 (R_*)^{10/9} \quad (92)$$

expression qui est valable dans l'intervalle $10^3 \leq R_* \leq 10^5$.

Pour une surface lisse et pour l'intervalle ci-dessus, $10^3 \leq R \leq 10^5$, SCHLICHTING [25] donne le coefficient de traînée :

$$C_f = \frac{0,074}{R^{1/5}} \quad (93)$$

En substituant l'équation (93) dans (54) et en employant (91) et (92), nous obtenons d'après CERMAK [4] [6] :

$$\frac{1}{N} = \frac{6,23}{R_*^{8/9}} - \frac{3,79}{R_*} \quad (94)$$

L'équation (94) doit fournir le coefficient d'évaporation N pour $10^3 \leq R_* \leq 10^5$ dans le cas d'une surface d'eau hydrodynamiquement lisse.

Pour des parois rugueuses, on doit employer la distribution logarithmique de la vitesse pour la corrélation entre R et R_* :

layer thickness δ . The thickness of the boundary layer may be evaluated through use of the expression :

where δ is the thickness of the boundary layer and x is the distance from the leading edge of the evaporating surface to the point at which the velocity profile is measured. (90)

When z of Eq. 89 is considered to be equal to δ expressed by Eq. 90, the relationship between R_* and R becomes :

Eq. 88 may now be changed through use of Eq. 91 to : (91)
with validity in the range $10^3 \leq R_* \leq 10^5$, (92)

For a smooth surface and for the range $10^3 \leq R_* \leq 10^5$, Schlichting [22] gives the drag coefficient :

Upon substitution of Eq. 93 into Eq. 54 and making use of Eqs. 91 and 92, see Cermak [4] [6], the equation : (93)
results. Eq. 94 should yield the proper evaporation coefficient N for $10^3 \leq R_* \leq 10^5$ under the conditions of a hydrodynamically smooth water surface. (94)

For rough boundaries the logarithmic velocity distribution should be used to correlate R and R_* : (95)

$$\frac{U_z}{U_*} = 5,75 \log \frac{z}{z_0} + 8,75 \quad (95)$$

Mais quand la paroi est rugueuse, l'équation d'évaporation n'est pas si simple parce qu'il faut évaluer le paramètre de la rugosité. SUTTON a constaté que la couche limite planétaire s'étend sur une hauteur de près de 1.000 m (3.280 ft). En employant l'équation de SCHLICHTING [25] :

$$\frac{1}{C_f} = \left(1,89 + 1,62 \log_{10} \frac{x}{\epsilon_w} \right)^{2,5} \quad (96)$$

où $(U_* \epsilon_w)/\nu > 70$ et ϵ_w est la rugosité de surface, on peut obtenir, en combinaison avec les équations (25), (95) et (88) :

$$N = \frac{2,875 R_*}{[1,89 + 1,62 \log_{10} (x/\epsilon_w)]^{2,5}} \log \frac{3,280}{z_0} \quad (97)$$

pour des parois rugueuses avec $R_* > 10^5$.

Calcul de la vitesse de frottement

Puisque la traînée de la paroi n'est pas mesurée directement dans des essais, les vitesses de frottement sont calculées à partir des profils de vitesse. Dans le cas d'un écoulement complètement turbulent dans des conditions météorologiquement neutres, un procédé commode consiste à appliquer les équations de KARMAN-PRANDTL de la distribution de vitesse. Ce procédé pourtant ne peut pas être appliqué quand la couche limite se trouve dans la zone de transition entre les écoulements laminaire et turbulent. On s'appuie, dans ce cas, sur l'équation de KARMAN de la quantité de mouvement pour l'écoulement dans la couche limite.

When the boundary is rough, however, the evaporation equation is not as simple to develop because the roughness parameter must be evaluated. Sutton has stated that the planetary boundary layer extends to a height of about 1,000 meters (3,280 ft), and by using the Schlichting [25] equation :

where $U_* \epsilon_w/\nu > 70$ and ϵ_w is the surface roughness, it is possible to combine with Eq. (25), Eq. (95), and Eq. (88) to obtain : (96)

for rough boundaries (having a roughness ϵ_w) where $R_* \leq 10^5$. (97)

Computation of Shear Velocity

As the boundary drag is not actually measured in the tests, shear velocities are computed from the velocity profiles. In the case of fully turbulent flow under essentially neutral conditions, a convenient procedure is to apply the von Kármán-Prandtl equations of velocity distribution. When the boundary layer is in transition from laminar to turbulent flow, this procedure cannot be applied. Resort is then made to the von Kármán momentum equation for boundary layer flow.

En employant le premier procédé, on peut calculer la vitesse de frottement en partant du gradient de vitesse et en adoptant une certaine valeur pour la constante de KARMAN. D'après les expériences de NIKURADSE sur l'écoulement d'eau en conduites, cette valeur est égale à 0,4. D'après SCHULTZ-GRUNOW [26] qui ont mesuré la traînée de la paroi et les profils de vitesse dans un courant d'air le long d'une paroi plane, la valeur de la constante de KARMAN est égale à 0,38.

On emploie cette dernière valeur pour la présente étude. Il est à noter qu'on suppose k égal à 0,38, d'abord parce que les expériences de SCHULTZ-GRUNOW couvrent la même gamme de nombre de REYNOLDS que celle de notre étude, c'est-à-dire approximativement $R_x < 10^7$, et parce qu'il s'agit dans nos expériences d'une paroi plane plutôt que d'une conduite. D'après les profils de vitesse obtenus dans cette étude pour l'écoulement turbulent produit par un ruban, l'exposant dans l'équation de la distribution de la vitesse :

$$\frac{U}{U_1} = \left(\frac{z}{z_1}\right)^{1/m}$$

est en général supérieur à 1/7 quand $R_x < 10^7$. Cela correspond au domaine dans lequel la distribution de vitesse KARMAN-PRANDTL (avec $k = 0,4$), ne donne pas, comme on le sait, de résultats satisfaisants. Le faible écart entre les deux valeurs de k n'est donc pas nécessairement dû à la différence de la géométrie de la paroi.

Dans les essais de notre étude, il y avait souvent une différence supérieure à 10° F entre les températures de la paroi et l'écoulement am-

biant, la paroi étant plus froide. Puisque la vapeur est plus légère que l'air ambiant, il y a une petite compensation pour la condition d'inversion causée par la surface froide. SHEPPARD [28] a trouvé que, dans les conditions d'inversion, k décroît. Comme on ne peut pas estimer les vraies valeurs de k , sans des mesures étendues, il convient, surtout au point de vue des conditions de la nature, d'employer le paramètre *vitesse de frottement apparente*. C'est la vitesse de frottement calculée à partir du profil des vitesses en supposant que k n'est pas influencé par le gradient de température (densité). Si U_* est la vraie vitesse de frottement, on obtient $U'_* \sim (U_*/k)$. En supposant, pour la distribution de vitesse, une loi logarithmique, on a :

$$\frac{U}{U_*} = \frac{2,3}{k} \log \frac{z U_*}{\nu} + \text{const.} = 5,94 \frac{0,38}{k} \log \frac{z U_*}{\nu} + \text{const.} \quad (98)$$

et, en conséquence :

$$U_* = \frac{k}{0,38} \frac{U_1 - U_2}{5,94 \log(z_1/z_2)} = \frac{k}{0,38} U'_* \quad (99)$$

$$U'_* = 0,38 \frac{U_*}{k} = \frac{U_1 - U_2}{5,94 \log_{10}(z_1/z_2)} \quad (100)$$

Evidemment, U'_* est assez facile à obtenir dans la nature. Dans ce qui suit, nous utiliserons la vitesse apparente de frottement U'_* (calculée selon le procédé précédent), mais nous l'appellerons U_* pour simplifier).

When the former procedure is applied, the shear velocity can be computed from the velocity gradient by adopting a certain value for the von Kármán constant. According to Nikuradse's experiments with water in pipes, this constant is equal to 0.4. According to Schultz-Grunow [26], who measured both boundary drag and velocity profiles in an air stream over a plane boundary, this constant is equal to about 0.38.

The latter is adopted for computation throughout the present study. It should be pointed out, however, that 0.38 is adopted for k mainly because the range in terms of Reynolds numbers covered by the Schultz-Grunow experiments is about the same as that covered in this study, i.e., $R_x < 10^7$, approximately, and because these experiments were for a plane boundary rather than a pipe.

According to the velocity profiles obtained in this study for turbulent flow stimulated by the tape, the exponent in the equation of velocity distribution $U/U_1 = (z/z_1)^{1/m}$ is in general greater than 1/7 when $R_x < 10^7$. This is the range in which the Prandtl-Kármán velocity distribution (with $k = 0.4$) is not expected to give the best results. The slight difference between the two values of k is therefore not necessarily due to the difference in boundary geometry.

In the tests performed for this study, the boundary and ambient stream temperatures often differed more than ten degrees Fahrenheit, the boundary being cooler. Because the vapor is lighter than the ambient air, there is a slight compensation for the inversion condition caused by the cool surface. It has been found by Sheppard [28] that, under inversion conditions, k decreases. As the true value of k cannot be ascertained without extensive measurements, it is convenient, especially from the viewpoint of field conditions, to adopt the quantity "apparent shear velocity." This is the shear velocity computed from the velocity profile as if k were not affected by the presence of a temperature (density) gradient. If U_* is the true shear velocity, then $U'_* \sim U_*/k$. By assuming a logarithmic form of the velocity distribution, one has :

$$\text{so that :} \quad (99)$$

$$\text{i.e. :} \quad (100)$$

Obviously, U'_* is relatively easy to obtain in the field. In the remainder of this thesis the apparent shear velocity U'_* will be used (computed according to the foregoing procedure) but for simplicity the notation will be U_* .

FIG. 16. — Variation de N en fonction de R_* , pour la couche limite turbulente,

Résultats dans le cas des parois planes

La figure 16 [6] montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et les équations théoriques qui ont été obtenues par de moyens différents, comme on l'a indiqué dans des paragraphes précédents. Les courbes correspondant aux différentes équations sont désignées soit par une équation numérotée soit par un nom.

Il est intéressant de remarquer qu'il n'y a pas d'écart appréciable systématique des points, bien que les résultats correspondent à un domaine

de x/x' assez étendu. Pourtant, les points correspondant aux différentes valeurs de x/x' sont intercalés plus ou moins arbitrairement. On peut donc conclure que la vitesse de frottement (comprise dans R_*) traduit suffisamment l'influence de la frontière d'approche amont de la surface d'évaporation.

Les résultats expérimentaux correspondent bien à l'équation de SUTTON, quoiqu'il fût nécessaire, pour arriver à cette concordance, de transposer la courbe originale en employant un facteur 1,15. On ne voit pas exactement la rai-

Results from the Plane Boundary

Fig. 16 [6] has been plotted to show the comparison between the data and the theoretical equations which have been derived by various means in the foregoing paragraphs. The curves for the different equations have been indicated either by equation number in the text or by name.

It is significant to note that, although the data have been taken over a relatively wide range of x/x' , there is no significant

deviation of the points of a systematic nature. Instead, the data for the various values of x/x' are intermingled more or less at random. It is safe to say, therefore, that the shear velocity (as included in R_*) is sufficient to express the influence of the approach boundary upstream from the evaporating surface.

The data are rather well represented by the equation of Sutton, although to accomplish this close agreement it was necessary to shift the original curve by a factor of 1.15. The reason for this shift being necessary is not exactly known, but it is probably

FIG. 17
Variation de Z/Z_0 en fonction de U/U_*
pour le modèle et la nature

son pour laquelle cette transposition était nécessaire, mais elle résulte probablement de l'origine de $F(n, k)$ ou de l'évaluation d'une constante dans cette fonction.

Les équations (94) et (97), correspondant respectivement aux parois lisses et rugueuses, sont basées sur des modifications de l'analogie de REYNOLDS. Comme il s'agit d'une paroi lisse, on

a seulement représenté l'équation (94) pour la comparaison. On voit que la courbe suit bien les résultats expérimentaux, sauf dans la région des petites valeurs de R_* . Cependant, l'équation (94) provient d'une distribution de vitesse d'exposant $1/7$, donc les écarts dans la région des petites valeurs de R_* ne sont pas surprenants, puisque cette distribution de vitesse n'y est pas valable.

D'après ces résultats et la concordance des différentes équations, on peut dire que l'analogie de REYNOLDS s'applique bien au problème de l'évaporation des parois planes. De plus, l'équation de SUTTON basée sur le principe du mélange continu peut être appliquée, après transposition, aux résultats expérimentaux. Finalement, on a démontré que la relation sans dimension :

$$N = \varphi(R_*) \quad (102)$$

convient pour appliquer les résultats d'une étude de l'évaporation, obtenus en soufflerie, aux conditions dans la nature où la frontière d'approche amont a une longueur infinie et où la vitesse ambiante n'est plus une constante mais une fonction de la hauteur au-dessus de la surface.

Résultats de l'étude sur modèle du lac Hefner

Le but d'une étude d'évaporation en laboratoire est d'en appliquer les résultats aux larges masses d'eau telles que celles des lacs; on a donc trouvé tout à fait opportun d'étudier le modèle réduit du lac Hefner [5]. Le but immédiat de cette étude était de déterminer s'il était possible de reproduire en modèle les caractéristiques du vent et l'évaporation qui ont été mesurés dans la nature :

CARACTÉRISTIQUES DU VENT :

On montrera les ressemblances et les écarts entre les caractéristiques des vents modèle

involved in the derivation of $F(n, k)$, or the evaluation of some constant in this function.

The equations based upon modifications of the Reynolds analogy are Eq. 94 for smooth boundaries and Eq. 97 for rough boundaries. Because the boundary in question is smooth, only Eq. 94 has been plotted for comparison. The curve is seen to follow the data rather well except in the region of small R_* . However, Eq. 94 is derived with the $1/7$ -power velocity distribution so that it would be expected to deviate in the region of small R_* where this velocity distribution does not apply.

On the basis of these data and the agreement of the various equations, it can be said that the Reynolds analogy may safely be applied to the problem of evaporation from plane boundaries. Furthermore, the equation of Sutton based on the continuous mixing principle can be adjusted to apply to the data. Finally, the dimensionless relation :

has been proven to be adequate for application of evaporation

data, obtained in a wind tunnel, to the conditions in nature where the length of the upstream approach boundary is infinite and the ambient velocity is not a constant but, instead, a function of height above the surface.

Results from the Lake Hefner Model Study

Because the ultimate objective of applying the laboratory data to evaporation from bodies of water such as lakes, advantage was taken of the opportunity to make a model study of Lake Hefner [5]. The immediate objectives of this model study were to determine whether or not it is possible to reproduce in a model the wind structure and the evaporation which has been measured in the prototype.

WIND STRUCTURE :

The similarities and differences between the wind structure of the model and prototype will be brought out by means of two

et nature par deux graphiques. Le premier graphique (fig. 17) est une représentation de $\log [z/z_0]$ en fonction de U_z/U_* : il montre la correspondance entre les résultats modèle et nature d'une part, et la relation de PRANDTL-VON KARMAN pour le vent, d'autre part :

$$\frac{U_z}{U_*} = 5,75 \log_{10} \left[\frac{z}{z_0} \right] \quad (103)$$

Le second graphique (fig. 18) montre comment sont liés $U_{52,5}$ et U_* pour le modèle et la nature.

Considérant les profils de vitesse pour les 29 essais sur modèle réduit, on peut généralement constater que la vitesse au-dessus d'une certaine altitude varie comme le logarithme de la hauteur. Dans la plupart des cas, cette altitude était inférieure à 0,1 pouce, quoique dans un cas elle atteignît 0,185 pouce. Les relations de PRANDTL-VON KARMAN indiquent que pour l'écoulement turbulent, près d'une paroi, U_z est une fonction linéaire de $\log z$. Puisqu'au cours de cette étude on a trouvé que U_z varie comme $\log z$ au-dessus d'une certaine cote, en général 0,1 pouce, on en a conclu qu'au-dessus de cette élévation, la couche limite était turbulente et la distribution de vitesse correspondait à l'équation (103). D'après cette conclusion, on a considéré que les relations pour l'écoulement turbulent développées par PRANDTL-KARMAN concernant z_0 , ϵ et δ' étaient valables, c'est-à-dire :

$$z_0 = \frac{\delta'}{107} = \frac{0,108 \nu}{U_*} \text{ (paroi lisse)} \quad (104)$$

graphs. The first graph, Fig. 17 is a plot of $\log [z/z_0]$ versus U_z/U_* and shows the correlations between actual data for model and prototype and the Prandtl-von Kármán relationship for wind structure; namely :

(103)

The second graph, Fig. 18, illustrates the relationship between $U_{52.5}$ and U_* for both the model and the prototype.

Based on the velocity profiles from the 29 model tests, the general statement can be made that the velocity above a certain elevation varied as the logarithm of the height. In most cases this elevation was less than 0.1 in. although in one case it was as great as 0.185 in. The Prandtl-von Kármán relationships indicate that for turbulent flow near a boundary U_z is a linear function of $\log z$. Since in the course of the model study U_z was found to vary as $\log z$ above a certain elevation, usually 0.1 in., the conclusion was reached that above this elevation the boundary layer was turbulent and the velocity distribution agreed with Eq. 103. In light of this conclusion, the relationships for turbulent flow developed by Prandtl-von Kármán concerning z_0 , ϵ , and δ' were also considered applicable; that is :

$$\text{(smooth boundary)} \quad (104)$$

$$\text{(rough boundary)} \quad (105)$$

The computation of U_* was based on the applicability of Eq. 103 to the upper turbulent region of the boundary layer.

$$z_0 = \frac{\epsilon}{z_0} \text{ (paroi rugueuse)} \quad (105)$$

Le calcul de U_* était basé sur la validité de l'équation (103) dans la région supérieure turbulente de la couche limite. On a trouvé U_* en résolvant simultanément les deux équations obtenues en portant, dans l'équation (103), des valeurs particulières de U_z et z dans la région supérieure de la couche limite.

Pour les figures 17 et 18, on a choisi les valeurs provenant des mesures prises dans la nature à intervalle d'une demi-heure par U.S. Geological Survey. Seulement, on a choisi les mesures qui correspondent aux conditions suivantes :

- 1° Le vent dominant pour chaque période d'une demi-heure était du Sud pour chacune des quatre stations météorologiques;
- 2° La vitesse moyenne pour une période d'une demi-heure à la station 1 était de 3,38, 6,75, 13,52, 27,0, 40,5 ou 54,1 ft/s à une hauteur de 52,5 ft;
- 3° La différence entre les températures relevées pour les hauteurs de 6,56 et 52,5 ft à la station 2, n'était pas supérieure à 0,2° C et n'était pas inférieure à 0,1° C.

Ce critère a été pris comme caractérisant les conditions adiabatiques. Dans un cas seulement, pour obtenir des résultats représentant une vitesse de 6,56 ft/s, un écart de température de 0,3° C a été admis. On n'a trouvé que 14 profils conformes à ces conditions sévères; le seul cas non adiabatique était inclus dans ce groupe.

U_* was found by the simultaneous solution of the two equations which were obtained when particular values for U_z and z from the upper region of the boundary layer were substituted into Eq. 103.

Prototype data for Fig. 17 and 18 were selected from the ½-hour data which were available from the U.S. Geological Survey. Only the data which satisfied all of the following restrictions were selected for analysis :

1. The prevailing wind for a particular ½-hour period at each of the four meteorological stations was from the south.
2. The average velocity for a ½-hour period at Sta. 1 at an elevation of 52.5 ft was 3.38, 6.75, 13.52, 27.0, 40.5, or 54.1 ft/sec.
3. The difference between the temperatures recorded at the 6.56 ft and 52.5 ft levels at Sta. 2 was not greater than 0.2° C and not less than 0.1° C. This criterion was adopted as being representative of adiabatic conditions. In only one instance was the reference temperature difference taken as 0.3° C in order to secure data representing a velocity of 6.56 ft/sec.

Only 14 profiles were found which met these stringent requirements. The one non-adiabatic case was included in this group.

FIG. 18. — Variation de la vitesse de frottement U_* en fonction de la vitesse U_{16} à 16 mètres (52,5 ft)

On voit dans la figure 17 que les résultats de la nature pour les 14 profils sont dispersés autour de la relation de PRANDTL-KÁRMÁN (équation 103) en quatre groupes généraux, car les vitesses pour chaque profil étaient mesurées à quatre hauteurs différentes et ces hauteurs étaient les mêmes pour chaque profil.

La figure 17 indique aussi que les résultats du modèle se répartissent en trois domaines :

$$\text{Domaine 1 : } 1 \leq \frac{z}{z_0} \leq 10^2$$

$$\text{Domaine 2 : } 10^2 \leq \frac{z}{z_0} \leq 10^3$$

A review of Fig. 17 indicates that the prototype data for the 14 profiles are dispersed along the Prandtl-von Kármán relationship (Eq. 103) in four groups. The data plot in four general groups because the velocities for each profile were measured at four different elevations and these elevations were the same for each profile.

Fig. 17 also indicates that the model data fall into three ranges :

$$\text{Range 1. } 1 \leq \frac{z}{z_0} \leq 10^2$$

$$\text{Range 2. } 10^2 \leq \frac{z}{z_0} \leq 10^3$$

$$\text{Domaine 3 : } 10^3 \leq \frac{z}{z_0}$$

Les résultats correspondant au premier domaine peuvent être considérés comme appartenant à la partie inférieure de la couche limite, en général, au-dessous de 0,1 pouce. Dans cette région, on a lié les points des différents profils par des lignes qui sont tangentes à la courbe représentant l'équation (103). Dans le cas des grandes vitesses ambiantes, ces lignes sont tangentes à la courbe représentant l'équation (103) pour les valeurs z/z_0 inférieures à 107. On peut attribuer ces écarts, par rapport à la courbe attendue, aux mesures inexactes ou au développement incomplet de la couche limite.

$$\text{Range 3. } 10^3 \leq \frac{z}{z_0}$$

The data comprising the first range may be considered to be those data concerning the lower portion of the boundary layer; that is, the portion usually below 0.1 in. In this region, the points from the various profiles have been joined by lines which become tangent to the line representing Eq. 103. For cases of relatively large ambient velocity, these lines become tangent to the Eq. 103 line at values of z/z_0 less than 107. This deviation from the anticipated pattern may be due to inaccurate measurements or to the incomplete development of the boundary layer.

Les résultats du second domaine représentent la partie turbulente de la couche limite. Les résultats du modèle dans la figure 17 pour la région turbulente se groupent bien autour de la courbe représentant l'équation (103). Pourtant, il existe une certaine dispersion qui, d'ailleurs, n'est pas excessive. Une aussi faible dispersion justifie la représentation des résultats par une équation ayant la forme de l'équation (103). Cependant, la valeur 0,4 de la constante de KARMAN demeure incertaine.

Les résultats correspondant au troisième domaine sont dispersés. Cette dispersion peut être due au mode de mesure et (ou) à la présence d'une zone de transition entre la couche limite turbulente et l'air ambiant dont la turbulence a une intensité faible.

Les résultats de la nature sont en bon accord avec la loi exprimée par l'équation (103). Les résultats du modèle pour la zone turbulente de la couche limite sont aussi en accord avec l'équation (103). Les écarts des résultats du modèle, dans le domaine inférieur $1 \leq z/z_0 \leq 10^2$, sont dus, au moins en partie, à la présence de la zone inférieure de la couche limite où l'écoulement peut être laminaire ou turbulent. Les écarts des résultats du modèle dans le domaine supérieur $z/z_0 > 10^3$, peuvent être dus au mode de mesure ou à la présence d'une zone de transition entre la couche limite turbulente et l'air ambiant.

Les paramètres significatifs pour la figure 18 ont été tirés des 14 profils relevés dans la nature. Tous ces profils, sauf un, correspondaient aux conditions adiabatiques. Les points corres-

pondant aux 14 profils ne s'alignent pas aussi bien qu'on pouvait l'espérer. Pourtant, l'ensemble des points se disperse autour d'une courbe, comme la relation de PRANDTL-KARMAN, équation (103), le suggère, z_0 étant fonction de la vitesse du vent.

Les résultats des 29 essais sur le modèle sont représentés dans la figure 18 sans tenir compte de l'endroit où les profils des vitesses étaient mesurés. Les résultats relevés en chacune des quatre stations de mesure sont désignés par un symbole particulier. Un coup d'œil sur les résultats particuliers à chaque station indique qu'il n'y a pas de différence marquée entre les relations $U_{52,5}$ et U_* pour chacune des stations et, en conséquence, on peut traiter les résultats du modèle comme faisant un seul groupe.

Une courbe unique peut être tracée parmi les points représentant les résultats du modèle et de la nature. La corrélation indiquée entre U_* et U aux points homologues du modèle et de la nature, qui ne diffèrent en hauteur absolue que par l'échelle 2.000, montre qu'on a réalisé sur le modèle une reproduction approchée des caractéristiques du vent nature.

La possibilité de reproduire les caractéristiques du vent peut être analysée de la façon suivante. Quand on emploie le nombre de REYNOLDS comme critère de la similitude du vent entre le modèle et la nature, la relation suivante peut s'écrire :

$$\text{Nombre de REYNOLDS} = R = \frac{\text{Forces d'inertie}}{\text{Forces de viscosité}}$$

The data within the second range represent the turbulent portion of the boundary layer. The model data of Fig. 17 for the turbulent region groups well around the line representing Eq. 103. There exists a certain amount of scatter but it is not excessive. Such a small degree of dispersion justifies representation of the data by an equation having the form of Eq. 103, however, the von Kármán constant of 0.4 still remains open to question.

The data comprising the third range is scattered. This scatter may be due to instrumentation and/or the presence of a transition zone between the turbulent boundary layer and the ambient air of low turbulence intensity.

The prototype data are in good agreement with the relationship expressed by Eq. 103. The model data for the turbulent zone of the boundary layer are also in accord with Eq. 103. The deviations of the model data in the lower range, $1 \leq z/z_0 \leq 10^2$, are due in part if not altogether to the presence of the lower portion of the boundary layer where the flow may be laminar or turbulent. The deviations of the model data in the upper range $z/z_0 > 10^3$ may be due to instrumentation or a transition zone between the turbulent boundary layer and the ambient air.

The significant parameters for Fig. 18 were taken from the 14 profiles of the prototype data. All but one of the profiles were for adiabatic conditions. The points representing the 14 profiles do not fall on one line as might be hoped. Though, the points taken as a whole, however, tend to scatter about a curved line as

is to be expected from the Prandtl-von Kármán relationship, Eq. 103, when z_0 is a function of wind speed.

The data of the 29 model tests, irrespective of the station at which the velocity profile was measured, are represented in Fig. 18. The data for each of the 4 stations have been given a separate symbol. A review of the data for each station indicates that there is no marked difference between the relationships of $U_{52,5}$ and U_* for each of the stations and therefore these model data may be treated as a group.

A single curved line may be drawn through the points representing both model and prototype data. The indicated correlation between U_* and U at homologous points in the model and prototype which differ in absolute elevation by the scale factor of 2,000, shows that an approximate modeling of the prototype wind structure has been effected.

The feasibility of modeling wind structure may be brought out by the following analysis. When the Reynolds number is used as the criterion for wind structure similarity between model and prototype, the following relationships can be evolved :

$$\text{Reynolds number} = R = \frac{\text{Viscous Forces}}{\text{Inertia Forces}}$$

(106) (107) (108)

$$R = \frac{\rho U^2/L}{\tau/L} = \frac{U^2}{U_*^2} \quad (106)$$

$$R_m = \left(\frac{U_m}{U_{*m}} \right)^2 \quad (107)$$

$$R_p = \left(\frac{U_p}{U_{*p}} \right)^2 \quad (108)$$

Pour la similitude dynamique, R_m doit être égal à R_p , donc :

$$\frac{U_m}{U_{*m}} = \frac{U_p}{U_{*p}} \quad (109)$$

La courbe unique représentant les résultats du modèle et de la nature dans la figure 18 indique que la relation traduite par l'équation (109) est satisfaite.

En acceptant les résultats de la figure 18, on doit se rappeler les restrictions qui portent sur les valeurs qui y sont représentées. La similitude des résultats pour le modèle et pour la réalité n'est valable dans le modèle que pour la portion de la couche limite située au-dessus du film laminaire. Aussi, les caractéristiques du vent nature étaient reproduites avec la condition d'un terrain plat et d'un gradient de densité adiabatique.

EVAPORATION :

Une comparaison directe de l'évaporation dans le modèle et dans la nature (dans le sens usuel d'étude sur modèle) n'était pas possible à cause de la différence dans les valeurs respectives de R_* due au rapport des échelles. Pourtant, des résultats considérables concernant le transfert de

R_m should equal R_p for dynamical similarity between model and prototype; therefore :

The single curved line representing model and prototype data in Fig. 18 indicates that the relationship in Eq. 109 has been satisfied.

In accepting the results of Fig. 18, one should bear in mind the restricted nature of the data presented. The similarity of results for model and prototype is applicable in the model only in the turbulent portion of the boundary layer above the laminar sub-layer. Also, the prototype wind structure was modeled for condition of a rather flat terrain and adiabatic lapse rates.

EVAPORATION :

A direct comparison of evaporation between the model and the prototype was not possible in the usual sense of model studies because of the difference in values of R_* for the model and the prototype due to the scale ratio. However, because a considerable amount of data concerning momentum transfer has been gathered over a wide range of Reynolds number, it seemed reasonable that if the proper interpretation based on Reynolds analogy, were given to these data, they could be extended to vapor transfer (evaporation). If such agreement were verified, then the Rey-

quantité de mouvement ont été rassemblés dans un domaine étendu du nombre de REYNOLDS; on peut donc espérer, si on peut donner une interprétation correcte de ces résultats basée sur l'analogie de REYNOLDS, que ceux-ci pourront être étendus au transfert de vapeur (évaporation). Si cet accord était vérifié, l'analogie de REYNOLDS basée sur le transfert de la quantité de mouvement pourrait être employée pour la prévision des taux d'évaporation. C'était la méthode adoptée au Colorado A and M College dans le but de trouver une correspondance entre modèle et nature. La discussion suivante des résultats expérimentaux est dirigée dans ce sens.

La relation entre N et R_* , qu'on a utilisée pour la comparaison avec les résultats, est une forme modifiée des équations (94) et (97). La modification est d'ailleurs petite : elle porte sur le choix du terme de longueur tel que $\sqrt{A}$, où A est la superficie du réservoir, préféré à la longueur de la paroi d'évaporation mesurée suivant la direction du vent. Les résultats du modèle et l'équation (94) se trouvent en bon accord, ce qui augmente encore la validité de l'extension de KÁRMÁN pour l'analogie de REYNOLDS. Pourtant l'équation (97) pour une paroi rugueuse ne s'accorde, en aucun point de l'intervalle considéré, avec les résultats expérimentaux.

Par conséquent, en plus des équations indiquées précédemment, en employant une valeur physique de la rugosité de la surface du lac, 0,22 ft (déterminée à partir des mesures effectives de la distribution des vitesses), en employant aussi l'équation de la distribution logarithmique de vitesse pour une paroi rugueuse et l'équation de SCHULTZ-GRUNOW pour le coefficient de frottement, on obtient :

nolds analogy based on momentum transfer, could be used to predict evaporation rates. This is the approach which was adopted at Colorado A and M College in an attempt to correlate model and prototype evaporation. The discussion of the data which follows is governed by this goal.

The relationships between N and R_* which have been used for comparison with the data are modified forms of Eqs. 94 and 97. The modification was very slight, involving only the selection of the length term as $\sqrt{A}$ (where A is the area of the reservoir) rather than the windward length of the evaporating boundary. The model data and Eq. 94 are seen to have rather good agreement which supports again the validity of the Kármán extension of Reynolds analogy. Eq. 97 for a rough boundary, however, does not agree with the data at any point within its range of applicability.

Therefore, in addition to the equations previously mentioned, another equation was developed by use of a physical value of the roughness of the lake surface 0.22 ft (as determined by the actual velocity distribution data), the logarithmic velocity distribution equation for rough boundaries, and the Schultz-Grunow drag coefficient equation :

(110)

FIG. 19. — Variation de N en fonction de R_* pour le modèle et la nature.

$$C_f = \frac{0,427}{(-0,407 + \log_{10} R)^{2,64}} \quad (110)$$

Cette équation :

$$\frac{1}{N} = \frac{0,0417}{R_*} \quad (111)$$

$$[4,68 (1,194 + \log_{10} R_*)^{2,64} - 8,70 (1,194 + \log_{10} R_*)^{1,32}]$$

a une origine critiquable parce que l'équation du coefficient de traînée (110) s'applique aux parois lisses. Mais comme on le voit sur la figure 19, l'équation (111) représente remarquablement bien les résultats, même en dehors de la zone dans laquelle on la considère habituellement comme valable. On doit remarquer que la valeur 0,22 équivaut à une rugosité d'une nature

assez étrange puisqu'à la fois les rugosités (les vagues) et les parois se déplacent dans la direction du vent, mais à des vitesses différentes. De plus, la forme des rugosités n'est pas du tout semblable à celle qu'on prend habituellement comme type, telle que la rugosité des sables de NIKURADSE.

Une autre équation :

$$N = 0,0203 R_* \quad (112)$$

est représentée sur la figure 19, afin d'être comparée aux précédentes. Cette équation a été établie pour les résultats des mesures faites sur le prototype du lac Hefner et doit être considérée comme représentant ces résultats aussi bien ou même mieux que toute autre équation.

This equation :

(111) has a rather questionable derivation, because the drag coefficient equation, Eq. (110), is for smooth boundaries. But as seen in Fig. 19, Eq. (111) represents the data remarkably well, even outside the range for which it may usually be considered to be applicable. It should be pointed out that the value of 0.22 is an equivalent roughness of a rather strange nature, since both the roughness (the waves) and the boundary are moving in the

direction of the wind—but at different velocities. Furthermore, the shape of the roughness is not at all similar to that which is usually considered to be standard, such as the Nikuradse sand roughness.

Another equation :

(112) is plotted in Fig. 19 for comparison. This equation was developed for only the prototype data of Lake Hefner and may be considered to represent these prototype data as well or better

Mais puisque ces résultats appartiennent à un domaine aussi limité pour les valeurs de R_* , on pourrait très bien s'attendre à ce que la courbe définie par l'équation s'écarte de la courbe expérimentale en dehors de ce domaine. Peut-être serait-il bon de mentionner ici que la comparaison des équations précédentes met en évidence, d'une manière frappante, l'avantage de considérer les essais de laboratoire comme complétant des observations sur place, pour chercher à dégager une relation générale qui soit applicable en dehors du domaine pour lequel l'équation a été établie. On verra assez clairement que si l'on étendait l'emploi de l'équation (112) à des lacs de plus ou moins grande dimension, il y aurait probablement d'assez grosses erreurs.

Finalement, on a représenté une équation :

$$N = 0,5 R_*^{4/5} \quad (113)$$

présentant une forme simple et raisonnablement adaptée aux résultats expérimentaux.

RÉSUMÉ :

La figure 19 montre que, dans le cas d'une surface lisse, l'extension de l'analogie de REYNOLDS donne des résultats mieux en accord avec les résultats expérimentaux que lorsqu'il s'agit d'une surface rugueuse. Cela implique que la surface de l'eau, bien qu'elle puisse appa-

raître rugueuse par la présence des vagues, se comporte en réalité comme si elle était sensiblement lisse. Cela ne veut pas dire que nous négligeons le caractère agité de la surface de l'eau dans son ensemble, mais plutôt que la rugosité de la surface de l'eau n'est pas aussi grande qu'on pourrait l'imaginer d'après l'aspect des vagues. Puisque les pentes des courbes (97) et (112) sont les mêmes, la conclusion que la surface de l'eau est hydrodynamiquement lisse n'est pas absolument sûre. Si on connaissait un moyen pour déterminer d'une façon plus exacte la rugosité de la surface de l'eau, l'extension de l'analogie de REYNOLDS pourrait mieux coïncider avec les résultats réels. Des recherches supplémentaires doivent être entreprises afin d'établir les correspondances entre le vent, les vagues et le frottement de surface.

On constate que l'accord entre les données et l'extension de l'analogie de REYNOLDS pour $R_* < 10^5$ est bon. Pour $R_* > 10^5$, l'extension de l'analogie sert à comprendre les résultats de l'évaporation dans la nature, bien que l'analogie, dans le cas d'une surface lisse, donne un accord beaucoup plus proche que l'analogie dans le cas d'une surface rugueuse. Pour perfectionner la correspondance entre les lois donnant N en fonction de R_* obtenues, d'une part par les mesures dans la nature et, d'autre part, par l'extension de l'analogie de REYNOLDS, une meilleure compréhension des relations entre le vent, les vagues et le frottement de surface est nécessaire.

than any other equation. However, because the data available had such a limited range of R_* , the equation might well be expected to deviate from other data outside this range. Perhaps it would be well to mention at this point that the foregoing comparison of equations certainly illustrates in a striking manner the advantage of conducting laboratory tests as a supplement to field investigations when attempting to establish a general relationship which will be applicable outside the range of its development. It may be seen rather clearly that if Eq. 112 were extended to lakes of a smaller or larger size it would most probably be rather badly in error. Finally, an equation : (113) adjusted to be of a simple nature and yet fit the data reasonably well is plotted.

SUMMARY :

Fig. 19 indicates that the extension of Reynolds analogy for a smooth surface gives results which are more nearly comparable to actual data than does the extension for a rough surface. This implies that the water surface, although it may appear rough by the presence of waves, in reality behaves more nearly as though

it were smooth. This statement is not meant to dismiss the water surface in its entirety, but rather is intended to imply that the water surface roughness is not as great as might be imagined from the appearance of the waves. Since the slopes of Eq. 97 and 112 are the same, the conclusion that the water surface is hydrodynamically smooth is extremely questionable. If a means were known by which water surface roughness could be more properly evaluated, then the extension of Reynolds analogy might coincide more favorably with actual data. Additional research must be performed to correlate the relationships between wind, waves, and surface drag.

It may be stated that the agreement between the data and the extension of Reynolds analogy for $R_* < 10^5$ is good. For $R_* > 10^5$, the extension of Reynolds analogy tends to bracket actual evaporation results; although, the analogy for a smooth surface is in much closer agreement with actual data than that for a rough surface. In order to improve the correlations between N and R_* as given by actual data and that predicted by the extension of Reynolds analogy, a better understanding must be had of the relationships between wind, waves, and surface drag.

CHAPITRE VII. — CONCLUSIONS

La recherche exposée ici avait plusieurs buts : 1° analyser avec soin la littérature pour déterminer le domaine où l'analogie de REYNOLDS entre les problèmes de transfert de chaleur et de transfert de masse a été appliquée avec succès (l'évaporation en particulier); 2°, en partant des éléments fournis par cette première partie, déterminer et exécuter en laboratoire les expériences nécessaires à l'application de l'analogie de REYNOLDS à l'évaporation; 3°, déterminer le domaine d'application des autres équations qui ont été établies pour l'évaporation dans la nature; 4°, déterminer le domaine dans lequel il est possible de reproduire dans un modèle un courant d'air dont les caractéristiques correspondent à celles du vent dans la nature; 5°, déterminer le domaine dans lequel les études d'évaporation sur modèle peuvent être utilisées en vue de prévoir l'évaporation dans la nature.

Voici les conclusions qu'on peut tirer des recherches entreprises pour atteindre les buts précédents :

- 1° L'analogie de REYNOLDS, son utilisation dans les problèmes de transfert de chaleur ont été d'une aide considérable et les résultats montrent d'une manière assez concluante que l'analogie est aussi applicable à l'évaporation;
- 2° L'évaporation en un point donné est directement liée à l'effort tangentiel au même point, quelle qu'y soit la nature de la couche limite. Cette conclusion est justifiée par la bonne corrélation trouvée entre N et R_* ;
- 3° L'équation de SUTTON, modifiée par l'introduction du facteur 1,15, est en excellent accord avec les résultats expérimentaux obtenus avec une paroi plane;
- 4° Les résultats obtenus sur les caractéristiques des vents montrent qu'il est possible de reproduire dans un modèle les conditions dans lesquelles se trouve le prototype pourvu que l'on fasse le nécessaire pour que la couche limite soit turbulente;
- 5° Les renseignements sur l'évaporation obtenus à l'aide d'un modèle ont montré qu'ils étaient d'une aide considérable dans l'évaluation de l'évaporation dans les conditions du prototype;
- 6° Nous avons trouvé que les équations (94), (111), (101) et l'équation de SUTTON s'accordent mieux avec les résultats expérimentaux que toute autre équation examinée;
- 7° Bien que ces études aient marqué quelques progrès dans la connaissance de l'évaporation à la fois pour les grands et les petits réservoirs, il reste encore un progrès considérable à accomplir pour qu'il soit possible de prédire avec grande précision l'évaporation pour un ensemble de conditions données. Ce progrès ne pourra se faire que grâce à une meilleure connaissance, en particulier, de l'influence des vagues sur l'eau, de l'influence de la forme de la surface d'évaporation, de l'influence de la topographie du terrain environnant et de l'influence du gradient de densité de l'atmosphère ambiante.

CHAPTER VII CONCLUSIONS

The research reported herein had several objectives : first, to review carefully the literature to determine the extent to which Reynold's analogy has been successfully applied to the problems of heat transfer and mass (evaporation in particular); second, on the basis of item one, to design and to carry out laboratory experiments necessary to determine the applicability of Reynold's analogy to evaporation; third, to determine the applicability of other equations which have been developed to express evaporation under natural conditions; fourth, to determine the extent to which it is possible to reproduce in a model the wind structure found to exist under prototype conditions; fifth, to determine the extent to which model studies of evaporation can be utilized to assist in the prediction of evaporation under natural conditions.

As a result of the investigations which were made in attempting to carry out the foregoing objectives the following conclusions can be made :

1. Reynold's analogy has been of considerable assistance in connection with the problem of heat transfer, and the results reported herein demonstrate rather conclusively that the analogy is applicable also to evaporation.
2. The evaporation at a given point is directly related to the shear at the same point regardless of the nature of the boundary layer at this point. This conclusion is warranted on the basis of the good correlation which is found between N and R_* .
3. Sutton's equation, when modified by a factor of 1.15, is found to have an excellent agreement with the data for the plane boundary.
4. The wind structure data indicate that it is possible to reproduce in a model the prototype conditions, provided the necessary steps are taken to insure a turbulent boundary layer.
5. Evaporation data obtained from a model has proven to be of considerable assistance in evaluation of the evaporation under prototype conditions.
6. Equations 94, 111, 101, and Sutton's equation were found to fit the data better than any of the other equations discussed.
7. Although these studies have made some advance in the know-

Les travaux réalisés à l'Université d'Iowa étaient, pour une bonne part, pris en charge par l'Office de la Recherche Navale; les travaux réalisés au Colorado A and M College étaient pris en charge par l'Office de la Recherche Navale (Contrat N90nr 82400) et par le Bureau des Navires (Contrat NObsr 57053), l'un et l'autre dépendant du Ministère de la Marine.

ledge of evaporation for both large and small reservoirs, there still remains considerable advance to be made before it is possible to predict with a high degree of accuracy evaporation for a given set of conditions. This advance needs to be made particularly in connection with the influence of waves on the water, the influence of shape of the surface, influence of geometry of the surrounding terrain, and the influence of the lapse rate in the ambient atmosphere.

BIBLIOGRAPHIE — BIBLIOGRAPHY

- [1] ALBERTSON, M. L. : Analysis of evaporation as a boundary layer phenomenon. Ph. D. Dissertation, State University of Iowa, 1948.
- [2] ANGSTRÖM, A. : Application of Heat Radiation Measurements to the Problem of the evaporation from lakes and the heat convection at their surface. *Geografiska Annaler*, vol. 2, 1920, p. 237.
- [3] CARPENTER, L. G. : Section of meteorology and irrigation engineering. *Colorado Agr. Exp. Stat. Ann. Rpt.* 4; (29) - 34, illus. Appendix to the report of the meteorologist and irrigation engineer, p. (25) - 97, illus. 1891.
- [4] CERMAK, J. E. : Application of model techniques to mass transfer and evaporation studies. *Special Report, Colorado A and M College, Department of Civil Engineering*, 1952.
- [5] CERMAK, J. E. and KOLOSEUS, H. J. : Lake Hefner model studies of wind structure and evaporation. Final Report Parts I and II. *Colorado A and M College, Civil Engineering Dept. Report Nos* 54JEC20, 54JEC22, 1954.
- [6] CERMAK, J. E. and LIN, P. N. : Vapor transfer by forced convection from a smooth, plane boundary. *Colorado A and M College, Civil Engin. Dept. Report CER No. 55JEC1*, 1955.
- [7] CUMMINGS, N. W. and RICHARDSON, B. : Evaporation from lakes. *Phys. Rev.* (2) 30 : 527-534, illus. 1927.
- [8] CUMMINGS, N. W. : The Evaporation-energy equations and their practical application. *American Geophysical Transactions*, vol. 21, part 2, pp. 512-522, 1940.
- [9] DALTON, J. : Experimental essays of the constitution of mixed gases, on the force of steam of vapor from waters and other liquids in different temperatures, both in a torricellian vacuum and in air; on evaporation; and on the extension of gases by heat. *Mem. Manchester Lit. and Phil. Soc.* 5 : 535-602, 1798.
- [10] DITTUS, F. W. and BOELTER, L. M. K. : *Univ. of Calif. Publ. in Eng.*, 2, p. 443. 1930.
- [11] ELIAS F. : The transference of heat from a hot plate to an air stream. *NACA Technical Memorandum*, n° 614.
- [12] FITZGERALD, D. : Evaporation, *Amer. Soc. Civ. Engin. Trans.* 15 (581) - 646, illus.
- [13] HICKOX, G. H. : Evaporation from a free water surface. *Univ. of Calif. Thesis*, 1939.
- [14] HOFMANN, E. : Über die Gesetzmässigkeit der Wärme und der Stoffübertragung auf Grund des Strömungsvorgangs im Rohr. *Forschung a. d. Geb. d. Ing.*, vol. 11, pp. 159-169, 1940.
- [15] JACOB, M. and FRITZ, W. : *Forsch. a. d. Geb. d. Ing.*, 2, p. 75, 1933.
- [16] V. KARMAN, Th. : The analogy between fluid friction and heat transfer. *Trans. A.S.M.E.*, vol. 61, pp. 705-710, 1939.
- [17] KRAUSSOLD, H. : Die Wärmeübertragung an Flüssigkeiten in Rohren bei turbulenter Strömung. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, vol. 4, pp. 39-44, 1933.
- [18] MATTIOLI, G. D. : Wärmeübertragung in glatten und rauhen Rohren. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, vol. 11, pp. 149-158, 1940.
- [19] MEYER, A. F. : Computing run-off from rainfall and other physical data. *Amer. Soc. Civ. Engin. Trans.* 79 : (1056)-1224, illus. 1915.
- [20] PRANDTL, L. : *Physik. Zeitschr.* 23, 487, 1928.
- [21] REYNOLDS, O. : On the extent and action of the heating surface of steam boilers. *Proc. Lit. and Phil. Soc. of Manch.* 14, 1874.
- [22] ROHWER, Carl : Evaporation from free water surfaces. *U. S. Dept. of Agr. in cooperation with Col. Agri. Exper. St., Techn. Bul. n° 271*, 1931.
- [23] RUSSEL, T. : Depth of evaporation in the United States. *U. S. Monthly Weather Review* 16, 235-239, 1888.
- [24] SCHMIDT, W. : Strahlung und Verdunstung in freien Wasserflächen; ein Beitrag zum Wärmehaushalt des Weltmeers und zum Wasserhaushalt der Erde. *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*, vol. 43, 1915, pp. 111-124, 169-178.
- [25] SCHLICHTING, H. : Lecture Series, Boundary-layer theory, Part II - turbulent flows. *NACA Technical Memorandum*, 1218, April 1949.
- [26] SCHULTZ-GRUNOW : F. New resistance formula for smooth plates. *NACA Technical Memorandum*, 98 b, 1941.
- [27] STELLING, E. : Ueber die Abhängigkeit der Verdunstung des Wassers von seiner Temperatur und von der Feuchtigkeit und Bewegung der Luft. 42 p., illus. St. Petersburg.
- [28] SHEPPARD, P. A. : The aerodynamic drag of earth's surface and the value of von Karman's constant in the lower atmosphere. *Proceedings, Royal Society (London)*, A 188, pp. 208-222, 1940.
- [29] SUTTON, O. G. : Wind structure and evaporation in a turbulent atmosphere. *Proceedings of the Royal Society of London*, series A, vol. 40, pp. 701-722, 1934.
- [30] TAYLOR, G. I. : Some recent developments in the study of turbulence. *Proc. 5th Int. Congr. Appl. Mech. Cambridge, Mass.*, p. 294, 1938.
- [31] THORNTHWAITTE, C. W. and HOLZMAN, B. : The determination of evaporation from land and water surfaces. *Monthly Weather Review*, vol. 67, 1939, pp. 4-11.
- [32] YIH, C. S. : A comparative study of momentum transfer, heat transfer, and vapor transfer, free convection. *Report n° 3 Dept. of Civil Engineering, Colorado A and M College*, 1951.
- [33] YIH, C. S. : A comparative study of momentum transfer, heat transfer, Forced convection. *Reports 1 and 2, Civil Engineering Dept.*, 1950 and 1951.
- [34] Water-loss investigations : Volume 1; Lake Hefner studies technical report. Circular n° 229, U. S. Geological Survey, 1952.