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_d	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,	

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	$\frac{D_w}{x' \rho U_0^2/2}$ 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.

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,	
N _n	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

AVANT-PROPOS

CETTE THÈSE EST DÉDIÉE A A.S. APTE.

Pendant l'année scolaire 1953-1954, j'ai eu le privilège d'être affecté à la Faculté des Sciences de Grenoble en qualité de « Research Scholar » dans le cadre des accords culturels franco-américains Fulbright. Je remercie mes collègues de l'Université de Grenoble de l'invitation qui m'a été faite et de l'accueil qu'ils ont bien voulu me réserver.

Les recherches dont le présent mémoire expose les conclusions ont été amorcées pendant mon séjour à l'Institut de Recherches Hydrauliques d'Iowa et poursuivies au Colorado A and M College. Comme cela est fréquent dans le domaine des sciences expérimentales, les travaux de quelque ampleur sont toujours, en partie, le fruit d'un effort collectif. Aussi ai-je l'agréable devoir de remercier ici : M. le Professeur J. E. CERMAK et M. le Professeur P. N. LIN, de Colorado A and M College, pour leur collaboration dans les recherches expérimentales et théoriques sur l'évaporation et le transfert de la chaleur; M. le Professeur YIH, de l'Institut des Recherches Hydrauliques d'Iowa, qui a réuni les développements théoriques nécessaires; M. le Professeur HUBBARD, d'Iowa, qui a construit le fil chaud que j'ai utilisé et auquel sont dus plusieurs perfectionnements de cet appareillage.

Enfin, M. le Professeur H. ROUSE, Directeur

de l'Institut de Recherches Hydrauliques d'Iowa, a été, au début, un conseiller précieux et n'a cessé, depuis, de me faire d'utiles suggestions.

A Grenoble, j'ai été accueilli par M. le Professeur F. ESCLANGON à l'E.N.S.E.H., je le remercie de l'intérêt qu'il a témoigné à mes travaux et de l'honneur qu'il m'a fait d'avoir accepté la présidence de mon jury.

Je dois à MM. les Professeurs J. KRAVTCHENKO, L. SANTON et A. CRAYA d'avoir pu bénéficier de cette année d'études. Je leur suis redevable d'une aide constante et cordiale dans l'élaboration de mon mémoire. Les fréquents échanges de vue que j'ai eus avec M. CRAYA, pendant tout mon séjour à Grenoble, auront été particulièrement fructueux et utiles. A tous j'exprime ma vive reconnaissance.

Le Dr Achuyt APTE m'a apporté une aide spécialement efficace pour la mise au point de mon manuscrit. Il a contribué à la traduction française de mon texte et a assumé une lourde part dans la préparation matérielle de l'ensemble, me laissant ainsi des loisirs pour améliorer ma rédaction primitive. Son infatigable concours m'a stimulé à plusieurs reprises et, sans sa collaboration, je n'aurais pas pu mener à bon terme le présent travail. Que M. APTE veuille bien accepter le témoignage de ma profonde gratitude. MM. ROUSSEL et DODU ont consacré de longues heures à la révision du texte français : je leur exprime ma très vive reconnaissance.

FOREWORD

THIS THESIS IS DEDICATED TO A.S. APTE.

During the academic year 1953-54, I had the privilege of being stationed at the Faculté des Sciences of the Université de Grenoble, France, as a research scholar under the Fulbright program established by the Franco-American cultural agreement. I want to thank my colleagues of the University of Grenoble for having invited me and for their friendly welcome and cooperation throughout my stay.

The present paper is a review of the research carried out by me or under my direction at the Iowa Institute of Hydraulic Research initially, and later at Colorado A and M College. As is frequently the case in the experimental sciences, this work is the result of a collective effort. In this connection, I wish to acknowledge with appreciation the contribution of Professor J. E. Cermak and Professor Pin Nam Lin of Colorado A and M College to the theoretical and experimental research. Furthermore, Mr. H. J. Koloseus, Hydraulic Engineer, U. S. Geological Survey, was in immediate charge of the Lake Hefner Model Study. Professor C. S. Yih of the Iowa Institute of Hydraulic Research (formerly at Colorado A and M College) expanded the theoretical studies based on the boundary layer theory. Professor

P. G. Hubbard of the Iowa Institute of Hydraulic Research designed and built the hot wire anemometer.

Professor Hunter Rouse, Director of the Iowa Institute of Hydraulic Research, was the advisor on the initial phase of the project at the Iowa Institute of Hydraulic Research, and since that time he has continued to offer many helpful suggestions. I wish to thank Professor F. Esclangon, Head of the Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique et d'Hydraulique for his interest in my work and for serving as president of my examination board.

The advice and instruction which I received from Professor J. Kravtchenko, Professor L. Santon, and Professor A. Craya was most helpful. They have made important contributions to the preparation of this paper. To each of them I wish to express my sincere appreciation. Throughout my stay in Grenoble, the frequent detailed conferences with Professor Craya were particularly helpful and stimulating.

Special recognition and appreciation must be given to Dr. Achuyt Apte. He carried a heavy load in the translation of this paper, and in the general arrangements for its final preparation for submission, so that I could concentrate on the writing and revisions of the manuscript. It was only because of his untiring and selfless assistance that this paper was possible. Without his help it could not have been prepared in the limited time available. I am also grateful to Mr. Roussel and Mr. Dodu who contributed much of their time to the revision and refinement of the French text.

Pendant mon séjour à Grenoble, M. P. DANEL, Directeur du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique Neyrpic, G. SAUVAGE DE SAINT-MARC, Sous-Directeur, F. BIESEL, Ingénieur, ne m'ont pas ménagé le concours de leur compétence. M. WILLNER, Chef du Service de Documentation au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique Neyrpic, m'a prêté une aide utile pour les recherches

bibliographiques. Je les remercie très vivement de leur concours.

Je ne puis terminer sans adresser l'expression de ma gratitude à tous les membres du personnel de la Faculté des Sciences de Grenoble et des Etablissements Neyrpic qui m'ont apporté leur concours pour la préparation de ce travail.

CHAPITRE I. — INTRODUCTION

L'évaporation est un phénomène d'intérêt général. L'hydrologue veut connaître l'évaporation totale d'un réservoir. L'ingénieur spécialiste de l'irrigation cherche à prévoir l'évaporation qu'il doit attendre des retenues, des bassins, des canaux et du sol. L'océanographe doit estimer l'évaporation due aux vastes surfaces des océans. Le météorologue étudie l'influence de l'évaporation terrestre ou maritime sur les mouvements atmosphériques. L'ingénieur chimiste doit tenir compte de l'évaporation dans beaucoup de procédés chimiques. Les besoins de ces « métiers-clefs » débordent d'un domaine sur l'autre et couvrent un champ extrêmement vaste.

On doit beaucoup à la Science pour les renseignements qu'elle a mis à notre disposition sur ce sujet. Cependant, les problèmes qui se posent actuellement deviennent de plus en plus compliqués et difficiles. On demande des prévisions plus poussées et plus précises, bien qu'elles soient assez délicates, sinon impossibles à donner en l'état actuel de nos connaissances. Malheureusement, la situation ne paraît pas

s'améliorer rapidement, car de nombreuses années d'étude sont encore nécessaires.

Des considérations rapides mettent en évidence le fait que le phénomène de l'évaporation, dans la nature, implique tant de variables incontrôlées qu'une corrélation des mesures paraît difficile et peu sûre. Quelques-unes des conditions dans la couche limite peuvent, par exemple, être prévues, mais les variations multiples d'ordre géométrique et atmosphérique, agissant sur cette couche limite, entraînent à leur tour une corrélation difficile à étudier. Bien que des chercheurs aient reconnu le rôle important que joue la couche limite dans l'évaporation, ils n'ont pourtant pas donné de précisions suffisantes quant à la nature et à l'étendue du développement de cette couche limite.

Dans ces circonstances, une étude de l'évaporation sur une surface plane disposée en soufflerie dans des conditions contrôlées a été entreprise par l'auteur à Iowa Institute of Hydraulic Research. Cela constituait une tentative pour appli-

Throughout my stay in Grenoble, Mr. P. Danel, Director; Mr. G. Sauvage de Saint-Marc, Assistant Director; and Mr. F. Biesel, Engineer of the Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique of Neyrpic were especially helpful in their advice and counsel and in making arrangements for my work. Mr. Willner was most cooperative with respect to my bibliographical needs.

Many other staff members of the Faculté des Sciences and the Establishment Neyrpic made important contributions to my work. To all of them I wish to express my sincere appreciation.

CHAPTER I

INTRODUCTION

Evaporation is a phenomenon which is of interest to a considerable variety of people. The Hydrologist wishes to know the amount of evaporation that will occur from a reservoir; the Irrigation Engineer needs to be able to predict the evaporation to be expected from reservoirs, ponds, canals, and the soil; the Oceanographer must make estimates of the amount of evaporation from the vast surface of the ocean; the Meteorologist studies the influence of evaporation from land and sea upon the movement of the atmosphere; and the Chemical Engineer deals with evaporation in many industrial processes. The needs of these key pro-

fessions overlap from one field to another, but cover in all an extremely broad area of interest.

Scientists in each of these fields and in many others have contributed to the information that is now available on the subject. However, the problems confronting them, rather than becoming simpler, are becoming more and more complex and difficult to answer. A refinement and precision of prediction are being demanded that are very difficult if not impossible to meet with existing knowledge. Unfortunately, this situation is one that will not be remedied soon—instead, it will require many years of study.

Only casual consideration reveals that evaporation as it occurs in nature involves so many uncontrolled variables that correlation of measured data is difficult and uncertain. Certain conditions within the boundary layer, for example may be predicted theoretically, but there are so many geometric and atmospheric variations affecting the boundary layer that again correlation is difficult. Although several writers have recognized that the boundary layer plays an important role in evaporation, they have not given complete consideration to the type and extent of its development.

Because of this situation, a study of evaporation from a plane surface in a wind tunnel under controlled conditions was begun by the writer at the Iowa Institute of Hydraulics Research in an effort to apply the boundary layer concept of modern fluid mechanics to the problem of evaporation. This study was later

quer la notion de couche limite de la mécanique des fluides modernes au problème de l'évaporation. Cette étude a été continuée plus tard d'une manière plus étendue et elle a été généralisée au Laboratoire de Mécanique des Fluides du Colorado A and M College.

Le présent travail a pour but de fournir un résumé de l'étude faite au cours des dernières dizaines d'années et de montrer sa relation avec les travaux classiques du demi-siècle précédent.

On considérera aussi le problème du transfert de chaleur et la correspondance entre ce transfert et celui d'autres caractéristiques telles que la

quantité de mouvement ou la masse. Dans le passé, on s'est peu soucié de cette correspondance dans le phénomène de l'évaporation.

Bien que les premiers travaux soient l'œuvre de l'auteur et qu'ils se soient poursuivis sous sa direction générale, il convient de préciser que les études théoriques initiales réalisées au Colorado A and M College sont dues au Professeur YIH; de même, la majeure partie des recherches expérimentales récentes ont été conduites sous l'autorité directe du Professeur J. E. CERMAK, alors que les derniers développements théoriques ont été, dans une très large mesure, menés à bien par le Professeur P. N. LIN.

CHAPITRE II. — PHYSIQUE DU PHÉNOMÈNE DE L'ÉVAPORATION

Le phénomène de l'évaporation est étroitement lié à celui de la diffusion. Il est essentiel de considérer les principes fondamentaux de cette dernière aux fins de leur application.

Théorie fondamentale de la diffusion

On sait qu'un fluide visqueux présente deux types d'écoulement : laminaire et turbulent. Il y a, de même, deux types de diffusion, moléculaire et molaire, qui, par leur nature, correspondent respectivement aux deux types d'écoulement précédents.

La théorie cinétique des gaz apprend que la diffusion moléculaire correspond à un mouvement aléatoire de molécules qui se déplacent avec une grande vitesse. Une molécule se heurte à d'autres molécules un grand nombre de fois par seconde et change sa propre direction et

celle des autres molécules à chaque rencontre. La nature aléatoire du mouvement fait qu'une molécule émigrera éventuellement vers une nouvelle région et, après d'innombrables rencontres, il en résultera nécessairement une diffusion générale d'un groupe donné de molécules. L'énergie cinétique des molécules se reflète dans la température du fluide. Quand la température augmente, l'énergie cinétique moyenne et ainsi la vitesse moyenne des molécules augmente, d'où il résulte un taux de diffusion plus rapide. Inversement, une diminution de la température occasionne un abaissement du taux de diffusion.

Bien que la vitesse moyenne des molécules atteigne une valeur prodigieuse, leur libre parcours moyen est extrêmement faible. En conséquence, la diffusion par l'action moléculaire seule est un phénomène à l'échelle microscopique.

continued on a broader and more generalized basis in the Fluid Mechanics Laboratory at Colorado A and M College.

The purpose of this paper is to report this work which has been done during the past decade and to show how it is concerned with the classic studies on evaporation which have been made during more than half a century.

Consideration is also given to the problem of heat transfer and the interrelationship between heat transfer and the transfer of other properties of materials such as momentum or mass. In the past, this interrelationship has been given only very little consideration, with respect to evaporation.

Special mention should be made of the fact that although the initial work was done by the writer, and that although the remainder of the work was under his general supervision, the initial theoretical developments made at Colorado A and M College are due to Professor C. S. Yih, most of the experimental work was done under the immediate supervision of Professor J. E. Cermak, and the final theoretical developments were carried out largely by Professor P. N. Lin.

CHAPTER II

PHYSICS OF THE EVAPORATION PROCESS

The phenomenon of evaporation is so intimately related to the

process of diffusion that a discussion of some of the principles is considered essential to the specific application presented herein

Fundamental Theory of Diffusion.

Just as there are two types of flow, laminar and turbulent, there are two types of diffusion, molecular and molar, which are inherently associated with the respective types of flow.

From the kinetic theory of gasses, it is understood that molecular diffusion involves a random movement of molecules traveling at an extremely high speed. A single molecule will strike other molecules many times per second, changing its own course and the course of the other molecules with each impact. Because of the random nature of the motion, any individual molecule will eventually migrate to a new region, and, since countless molecules are involved, a general diffusion of a given group of molecules will necessarily result. The kinetic energy of the molecules is reflected in the temperature of the fluid. As the temperature rises, the average kinetic energy, and hence the average velocity, of the molecules increases, thereby resulting in a more rapid rate of diffusion. Conversely, a lowering of the temperature causes a decrease in the diffusion rate.

Although the mean velocity of the molecules is of a tremendous magnitude, the mean free path is so extremely short that diffusion by molecular activity alone is a microscopic process.

Au contraire, le processus de la diffusion molaire est à l'origine du mouvement turbulent de masses finies de fluide. Chacune de ces masses se compose de millions de molécules. De la même manière qu'une molécule, une masse de fluide considérée comme indivisible se portera vers une nouvelle région. Mais, contrairement au cas de la molécule isolée, la masse du fluide ne conservera pas son individualité : elle se mélangera graduellement avec le nouveau fluide ambiant, tout en communiquant son mouvement à d'autres masses du fluide. La configuration du mouvement général est encore complètement aléatoire et il en résulte une diffusion à l'échelle macroscopique. Bien que le mouvement de ces masses soit nettement plus lent, le libre parcours moyen croît beaucoup. En conséquence, le taux de diffusion, pour la diffusion molaire, est supérieur à celui de la diffusion moléculaire.

La définition de base du coefficient de diffusion D est la suivante :

$$N = D_y \frac{\partial n}{\partial y} \quad (1)$$

où N est le taux de diffusion dans la direction des y d'une quantité de concentration n en un point y et D_y , le coefficient dans la direction des y . D'après les considérations précédentes, on doit s'attendre à ce que le coefficient de diffusion indique l'intensité relative du phénomène de la diffusion résultant, soit de l'action moléculaire seule, soit de la combinaison des actions moléculaires et molaires. C'est pourquoi D est en général le coefficient total de diffusion. Il doit représenter la somme des coefficients molaire et moléculaire, v et ϵ . Donc $D = v + \epsilon$ est un vecteur. Ces deux modes de diffusion peuvent avoir lieu isolément ou en combinaison, sous l'in-

fluence de la nature du mouvement du fluide. Si le mouvement est laminaire, v prédomine avec $\epsilon = 0$. Dès que l'écoulement devient turbulent, le coefficient de diffusion molaire commence à prendre de l'importance, tandis que le coefficient de diffusion moléculaire v devient rapidement insignifiant à cause de l'augmentation de la turbulence. L'équation (1), qui constitue une relation de portée très générale, pourrait s'appliquer à la diffusion de propriétés telles que la quantité de mouvement, la chaleur et la masse.

En s'appuyant sur ce qui précède, l'équation générale de la diffusion peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u \frac{\partial n}{\partial x} + v \frac{\partial n}{\partial y} + w \frac{\partial n}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial n}{\partial z} \right) \quad (2)$$

où t est le temps, u , v , w , les composantes de la vitesse et D_x , D_y , D_z sont les coefficients de diffusion dans les directions des axes des coordonnées. Cette équation s'applique à la diffusion par l'action moléculaire, par l'action molaire ou par la combinaison des deux.

Théorie de la diffusion appliquée à l'évaporation

Les considérations précédentes sur la théorie cinétique s'appliquaient initialement aux gaz seuls. Pourtant, on peut adapter cette théorie au phénomène de l'évaporation produit à la frontière d'un gaz et d'un liquide. Les molécules du gaz au-dessus du liquide sont dans l'état de mouvement déjà décrit. De même, les molécules du

The molar diffusion process, however, involves the turbulent movement of finite fluid masses, each composed of million of molecules. Like a molecule, on the one hand, a single fluid mass will eventually migrate to a new region. Unlike the molecule, on the other hand, the fluid mass does not retain its original identity, but gradually blends with its new surroundings as it imparts its motion to other fluid masses. The general pattern, however, is again completely random, and diffusion on a macroscopic scale is the net result. Although the rate of movement of these fluid masses is much slower, the "mean free path" is much greater so that the rate of diffusion is much greater for molar diffusion than for molecular diffusion.

The basic definition of the diffusion coefficient D is (1) where N is the rate of diffusion in the y -direction of the quantity which has the concentration n at any point y , and D_y is the coefficient of diffusion in the y -direction. In view of the foregoing discussion it is understandable that the diffusion coefficient should indicate the relative effectiveness of the diffusion process, whether it results from molecular activity alone or from a combination of molecular and molar action. For this reason D in general is the total diffusion coefficient and must represent the sum of the molecular and molar diffusion coefficients v and ϵ . Hence

$D = v + \epsilon$ and is directional. These two diffusion processes, molecular and molar, may operate singly or in combination, depending upon the type of fluid activity. If the motion is laminar v will predominate, with $\epsilon = 0$. As soon as the flow becomes turbulent, however, the molar diffusion coefficient predominates, while the molecular diffusion coefficient v by comparison rapidly becomes insignificant with increasing turbulence. Being a very general relationship, Eq (1) may be applied to the diffusion of such quantities as momentum, heat, and material.

On the basis of the foregoing, the general equation of diffusion may be written as

(2) where t is time; u , v , and w are the velocities in the x , y , and z -directions; and D_x , and D_y , and D_z are respectively the diffusion coefficients in the x , y , and z directions. This equation applies to diffusion by molecular action, molar action, or a combination of both.

Theory of Diffusion Applied to Evaporation

The foregoing considerations of the kinetic theory were originally developed for gasses only. It is possible, however, to draw upon this theory for a more definite understanding of the evaporation process which takes place at an interface of a gas and a

liquide sont à leur tour dans un état de mouvement encore incomplètement connu. On peut pourtant supposer raisonnablement que le mouvement des molécules du liquide dépend de la température : ce mouvement s'accroît avec l'augmentation de température. Etant donné que le mouvement des molécules dans le gaz et dans le liquide a un caractère aléatoire, quelques-unes des molécules ont une vitesse plus grande que les autres. Dans le liquide, les molécules possédant une énergie cinétique plus grande pourront s'échapper de la surface libre dans l'atmosphère. Lorsque la température des molécules augmente, il y a une augmentation correspondante du nombre de celles qui ont une énergie suffisante pour s'échapper. Ces molécules s'évadant vers le haut du gaz possèdent un réseau de trajectoire de mouvement propre, de sorte que beaucoup d'entre elles, après des contacts avec d'autres molécules, retournent à la surface du liquide. Si la concentration de ces dernières molécules est faible, le nombre des molécules revenant à la surface sera moindre que celui des molécules fugitives; il en résultera une évaporation. Si cette concentration augmente, l'échange net des molécules sera moindre, jusqu'à un point tel que le nombre des molécules revenant à la surface soit égal au nombre des fugitives : il n'y aura plus d'évaporation. On peut étendre encore cette notion de la théorie cinétique pour l'appliquer au cas où le nombre des molécules revenant au liquide soit supérieur au nombre des fugitives; dans ces conditions, il y aura une évaporation négative, c'est-à-dire une condensation.

L'activité des molécules de chacun des gaz entrant en jeu crée une pression qui s'appelle pression partielle du gaz considéré. La somme de ces pressions partielles constitue la pression ambiante atmosphérique.

Echange de chaleur

Sont très étroitement associés à l'activité des molécules, la quantité de chaleur contenue et l'échange de chaleur inhérent à l'évaporation. La température est une conséquence directe de l'énergie cinétique moyenne des molécules individuelles.

Comme on doit fournir une quantité de chaleur correspondant à la chaleur de vaporisation pour que le liquide s'évapore, il doit y avoir l'échange continu de chaleur que le phénomène d'évaporation implique. Pour que l'évaporation d'une masse de liquide commence, il faut qu'une source fournisse la chaleur d'évaporation. Ordinairement, cette chaleur provient, au moins en partie, de l'énergie calorifique même existant dans la masse liquide. Ainsi, la température du liquide décroît jusqu'au point où la quantité de chaleur fournie par la conduction et la convection du gaz ambiant, augmentée de la radiation nette reçue par le liquide, est égale exactement à la chaleur de vaporisation. Cette description donne d'ailleurs l'explication de la diminution de la température du thermomètre immergé, employé couramment dans des investigations mé-

liquid. The molecules of the gas above the liquid are in motion as previously described. Likewise the molecules of the liquid are also in some type of motion which is not yet clearly understood. It is reasonable to assume, however, that the motion of the molecules of the liquid is dependant upon the temperature—the motion increasing with increasing temperature. Because the motion of the molecules in both the gas and the liquid is of a random nature, some molecules will have a higher speed than others. Within the liquid the molecules possessing the greater kinetic energy will be able to escape the free surface into the atmosphere above. As the temperature of the molecules increases there is a corresponding increase in the number of them which have sufficient energy to escape. These molecules of the liquid which escape into the gas above have their own pattern of motion so that many of them, after impingement with other molecules, will return to the surface of the liquid. If the concentration of these molecules is small, there will be a smaller number returning to the surface than the number of those escaping the liquid, and hence evaporation will be the net result. As the concentration increases, however, the net exchange of molecules will be less, until the point is reached where the number of molecules returning to the surface is equal to the number escaping and there will be no evaporation. This concept of the kinetic theory may be carried still further to be applied to the condition where the number of molecules returning

to the liquid is greater than the number escaping. Under these conditions there is negative evaporation or condensation.

The activity of the molecules of each of the gases involved creates a pressure which is called the partial pressure of that particular gas. The summation of these partial pressures results in the ambient atmospheric pressure.

Heat Exchange

Very closely associated with the activity of the molecules, is the heat content and heat exchange involved in evaporation. The temperature of a gas is a direct reflection of the mean kinetic energy of the individual molecules.

Because of the heat of vaporization which must be supplied in order for a liquid to evaporate, there is a continual exchange of heat involved in the evaporation process. When evaporation commences from a body of liquid the heat of vaporization must be supplied from some source. Usually this heat of vaporization is supplied at least in part by the heat in the body of liquid itself. In so doing the temperature of the liquid decreases to the point where the amount of heat being supplied by conduction and convection from the ambient gas, plus the net radiation received by the liquid, is just equal to the heat of vaporization. This description, incidentally, is the explanation of the decrease of temperature in the wet-bulb thermometer which is so commonly

téorologiques. Vu la grande importance de l'échange de chaleur qu'entraîne l'évaporation et du fait que cet échange explique assez complètement le phénomène, il a paru possible à SCHMIDT, ANGSTRÖM, CUMMINGS et d'autres, de l'employer comme moyen complètement indépendant pour déterminer le volume d'évaporation des faibles et des fortes masses d'eau.

Le travail de CUMMINGS est le plus récent parmi ceux qui emploient la méthode du bilan d'énergie; c'est pourquoi, dans les chapitres suivants, nous décrirons plus en détail son étude.

Types d'écoulement

Dans l'étude des réseaux d'écoulement autour d'une surface en évaporation, on doit considérer deux écoulements : laminaire et turbulent. En outre, le réseau peut correspondre à une convection libre ou à une convection forcée. Dans les paragraphes suivants, nous donnerons une brève description de ces types d'écoulement, suivant la théorie cinétique des gaz et d'autres principes physiques.

ÉCOULEMENT LAMINAIRE

Quand les molécules s'agitent dans l'atmosphère au-dessus de la surface en évaporation, de sorte que la diffusion se produise seulement par action moléculaire, le mouvement résultant s'appelle : écoulement laminaire. Dans ce cas, la diffusion résultante n'implique que le coefficient ν de la diffusion moléculaire. Comme on l'a vu pour les équations (1) et (2), le coefficient ϵ de la diffusion molaire est nul. Le mouvement général ou l'écoulement qui se produit peut être,

used in meteorological investigations. Because the heat exchange involved in evaporation is so very important and because it describes rather completely the evaporation process, it has been possible for Schmidt, Angström, Cummings, and others to use it as a completely separate means of determining the amount of evaporation from both small and large bodies of water.

The work of Cummings is the most recent of the energy balance approaches and therefore, it is described in greater detail in the following chapters.

Types of Flow

When studying the flow pattern surrounding an evaporating surface it is necessary to consider both laminar flow and turbulent flow. Furthermore, the flow pattern may be the result of either free convection or forced convection. In the following paragraphs a brief consideration of these types of flow will be presented in light of the kinetic theory of gasses and other physical principles.

Laminar flow

When the molecules within the atmosphere above the evaporating surface are moving such that the diffusion is by molecular action only, it is called laminar flow. In this case the diffusion which takes place involves only the molecular diffusion coefficient ν as discussed for Eqs 1 and 2—the molar diffusion coefficient ϵ being equal to zero. The general movement or flow which occurs may be activated by either an external force causing

soit le résultat d'un effort extérieur déterminant un mouvement de l'atmosphère ambiante dans une direction, soit le résultat d'une distribution instable de la densité du gaz selon la verticale.

ÉCOULEMENT TURBULENT

L'écoulement turbulent se produit à l'occasion d'une instabilité dans le fluide résultant d'efforts tangentiels. En conséquence, il se produit des tourbillons. Ces derniers se désintègrent et donnent naissance à une turbulence dite aléatoire. L'écoulement peut se présenter avec une paroi hydrodynamiquement lisse, ou avec une paroi hydrodynamiquement rugueuse. En outre, l'écoulement peut se faire sous l'action d'une convection libre ou d'une convection forcée de la même manière que pour l'écoulement laminaire.

En paroi lisse, le film laminaire s'établit immédiatement le long de la paroi. Dans le film laminaire, on a une action moléculaire semblable à celle de la couche limite. Hors du film laminaire, cependant, l'écoulement est turbulent. Le mélange se produit sous l'action des diffusions moléculaire et molaire. Bien que, de la façon décrite précédemment, l'activité moléculaire existe toujours, la diffusion par l'action molaire est tellement prédominante, qu'on peut négliger la diffusion moléculaire.

L'écoulement turbulent a lieu le long de la paroi rugueuse lorsque la turbulence est si intense que la sous-couche laminaire est rongée et détruite par l'action des tourbillons turbulents, et que les protubérances de la surface pénètrent dans l'écoulement. Dans ce cas, la diffusion est encore produite par l'action molaire.

a movement of the ambient atmosphere in one direction, or it may be activated by an unstable distribution of the density of the gas in the vertical direction.

Turbulent flow

Turbulent flow is caused by instability within a fluid whereby the internal shear results in the formation of vortices which later break down into random turbulence. This flow may occur with either a hydrodynamically smooth boundary or a hydrodynamically rough boundary. Furthermore, the flow may be activated either by free convection or forced convection in the same way as for laminar flow.

With a hydrodynamically smooth boundary a laminar sub-layer exists immediately adjacent to the boundary. Within this laminar sub-layer the molecular action exists as described previously for the laminar boundary layer. Outside the sub-layer, however, the flow is turbulent and the mixing takes place by both molecular and molar diffusion. Although, as described previously, the molecular activity is continuously in existence, the molar diffusion is so extremely great that the molecular diffusion is insignificant by comparison.

Flow adjacent to a rough boundary occurs when the turbulence is so great that the laminar sub-layer is penetrated and destroyed by the action of the turbulent eddies and the irregularities of the surface project into the turbulent flow. In this case, the diffusion is again molar in nature.

Influence du gradient de densité

Dans le cas de la convection libre pour l'écoulement laminaire ou turbulent, on a considéré que le gradient de densité pouvait être tel qu'un réseau de circulation s'établisse, le fluide plus léger flottant dans l'air ambiant plus lourd, près de la surface. Dans ces conditions, le gradient de densité est instable et le mélange se produit avec une vitesse rapide, mais uniforme. Si on inverse le gradient de densité, de sorte que l'air près de la surface soit très stable et plus lourd que l'air sis au-dessus, l'*inversion* existe. Dans ces conditions, il n'y a pas non plus tendance à la convection libre, mais la convection forcée diminue de telle sorte qu'elle ne se manifeste plus d'une manière normale. En conséquence, la diffusion, surtout la diffusion molaire, est considérablement freinée et on a peu de mélange entre les régions supérieures et inférieures de l'atmosphère.

Effets des corps dissous

Les solides dissous dans un liquide en évaporation réduisent la pression de la vapeur saturante de la solution. Presque toutes les théories de l'évaporation concernent la différence des pressions de vapeur, insistent sur la nécessité de tenir compte de cette influence. Une réduction de la pression de vapeur saturante entraîne aussi réduction dans la perte nette des molécules et, en conséquence, une réduction de l'évaporation. Pourtant, il existe un facteur compensateur, de sorte que l'échange d'énergie se trouve modéré par la présence d'une solution salée. La température de la surface en évaporation atteint donc une valeur plus élevée que dans l'eau pure. On doit déterminer les résultats nets de ces effets compensateurs pour chaque cas.

CHAPITRE III. — RÉSUMÉ DES RECHERCHES ANTÉRIEURES

Dans le but de remettre en mémoire des notions indispensables à la compréhension de ce qui va suivre, nous étudierons rapidement, dans ce chapitre, l'influence de la loi de DALTON et les théories existantes, concernant le bilan d'énergie et le transfert de masse. Nous terminerons par quelques conclusions et l'exposé d'un programme de recherches.

Loi de Dalton

La plupart des recherches sur l'évaporation effectuées au cours du dernier siècle étaient de nature empirique et basées sur la loi fondamentale de DALTON [9] publiée en 1802.

$$E = C(e_s - e_d) \quad (3)$$

Influence of the Lapse Rate

As described in the case of free convection for either laminar or turbulent flow, the density gradient may be of such a nature that a circulation pattern is established due to the buoyant effect of the lighter air near the surface. Under these conditions the lapse rate is unstable and mixing takes place at a rapid, although ununiform, rate. If the density gradient is reversed, however, so that the air near the surface is very stable and heavier than the air above, an *inversion* exists. Under these conditions there not only is no tendency for free convection, but also forced convection is damped. As a result of this damping the diffusion (particularly molar diffusion) may become markedly inhibited so that very little mixing takes place between the upper and lower regions of the atmosphere.

Effect of Materials in Solution

Dissolved solids in an evaporating liquid reduce the saturation vapor pressure of the solution. Because in nearly all of the theories of evaporation the vapor pressure difference is involved, it is important to consider this influence. When the saturation vapor pressure is reduced, the net loss of the molecules, and hence the evaporation, is also reduced. There is a compensating factor, however, in that due to the exchange of energy being

modified by the presence of a saline solution the temperature of the evaporating surface reaches a higher value than for pure water. The net results of these compensating effects must be determined for each individual situation.

CHAPTER III

REVIEW OF PAST INVESTIGATIONS

Before beginning a research project it is always necessary to carefully review the important research work which has been done on this subject in the past. Therefore, in this chapter the influence of Dalton's Law and the early work on the Energy Budget theory and the Mass Transfer theories will be presented. Finally, an evaluation of this early work will be made and a general outline of the recent research will be presented in this chapter.

Dalton's Law

Most of the investigations on evaporation which have taken place within the past century have been of an empirical nature based upon the fundamental law of Dalton [9] which was reported in 1802. This formula of Dalton's

Cette formule de DALTON exprime que l'évaporation E est proportionnelle à la différence entre la pression de vapeur à la surface de l'eau e_s et la pression partielle de vapeur dans l'atmosphère ambiante e_a . A très peu d'exceptions près, les chercheurs ont vérifié cette relation, dans le passé, en regardant le coefficient C comme une fonction de la vitesse ambiante du vent et d'autres facteurs qui, d'après DALTON, influent sur l'évaporation.

Voici une liste partielle des auteurs qui ont développé des formules dérivées de la loi de DALTON : FITZGERALD [12] (expériences de 1876 à 1887 inclus), CARPENTER [3] (investigations en 1887), RUSSELL [23] (observations publiées sur l'évaporation avec les évaporimètres PICHE), STELLING [27] (expériences publiées en Russie de 1875 à 1882 inclus), HORTON (formule développée en 1917), MEYER [19] et FREEMAN (formules de 1915 et 1926), FOLSE (1929) et ROHWER [22] (1931) qui a publié l'étude la plus complète contenant notamment la description des expériences faites à Colorado A and M College depuis 1887. L'équation de ROHWER est la suivante :

$$E = (0,44 + 0,118 U) (e_s - e_a) \quad (4)$$

où E est l'évaporation en pouces par jour, U la vitesse moyenne du vent sur terre ou sur la surface de l'eau en milles par heure, e_s est la pression moyenne de vapeur saturante en pouces de mercure à la température de la surface de l'eau et e_a la pression moyenne de vapeur d'air saturé en pouces de mercure à la température de la ro-

sée. ROHWER a étudié aussi l'influence de l'altitude (pression barométrique) sur le taux de l'évaporation. L'équation suivante exprime cette influence :

$$E = r (1,465 - 0,0186 B) (0,44 + 0,118 U) (e_s - e_a) \quad (5)$$

où r est le rapport entre l'évaporation constatée et celle obtenue par le calcul et B la pression moyenne barométrique en pouces de mercure à 32° F. Cette équation ressemble beaucoup aux autres équations citées ci-dessus; on l'a vérifiée par comparaison avec des observations de l'évaporation, en différents endroits des Etats-Unis, et on a trouvé que son domaine d'application est général.

On a expérimenté aussi, avec des bacs d'évaporation enfouis au ras du sol ou submergés au ras de la surface d'une masse d'eau telle qu'un lac. La comparaison des résultats obtenus montre que ces différents types de bacs enfouis correspondent bien les uns aux autres, tandis qu'il est difficile d'effectuer une corrélation entre les résultats des expériences effectuées avec des bacs différents disposés au-dessus de la terre ou au-dessus de l'eau. En effet, on a trouvé que l'évaporation des bacs enfouis ou submergés jusqu'à fleur d'eau correspond bien à l'évaporation mesurée dans de larges masses d'eau libre, où les gains et les pertes d'eau peuvent être mesurés ou réglés. Le comportement des bacs placés au-dessus du sol ne correspond pas à celui de ces larges masses d'eau.

simply states that the evaporation E is proportional to the difference between the vapor pressure at the surface of the water e_s and the partial pressure of the water vapor in the ambient atmosphere e_a . With very few exceptions, these past experimenters have verified this relationship with the coefficient C being established as a function of the ambient wind velocity and other factors which the particular investigator found to influence the evaporation.

The following is a partial list of the investigators who have developed these formulas based upon Dalton's law: Fitzgerald [12], who made experiments between 1876 and 1887; Carpenter [3], who carried on his experiments in 1887; Russell [23], who reported in 1888 his observations on evaporation from Piche evaporimeters; Stelling [27], who reported on experiments made in Russia between 1875 and 1882; Horton, who developed his formula in 1917; Meyer [19] and Freeman, who reported their formulas in 1915 and 1926; Folse, who published his formula in 1929; and Rohwer [22], who presented in 1931 the most complete study, describing the experiments which had been carried on at Colorado A and M College since 1887. Rohwer's equation is

where E is the evaporation in inches per day, U is the mean velocity of ground wind or water-surface wind in miles per hour, e_s is the mean vapor pressure of saturated vapor at the temperature of the water-surface in inches of mercury, and e_a mean vapor

pressure of saturated air at the temperature of the dew point in inches of mercury. Rohwer also made a study of the influence of altitude (barometric pressure) upon the rate of evaporation. The following equation was developed to express this influence

(5)

in which r is the ratio of the observed to the computed evaporation and B is the mean barometric pressure in inches of mercury at 32 degrees Fahrenheit. This equation, bearing considerable resemblance to the other equations mentioned in the foregoing paragraphs, was compared with the observed evaporation at various points in the United States and showed that it has general application.

Experiments have also been made with evaporation pans which have been buried in the ground or submerged at the surface of a body of water such as a lake. A comparison of the results of these experiments shows that these different types of sunken pans correlate well with each other—whereas it is difficult to correlate the results of experiments with different types of pans mounted above the surface of the ground or water. In fact the sunken type of pan was found to correlate very well with the evaporation measured from large bodies of water in the field where the water budget could be measured or controlled. The pans above the surface of the ground again have given rather poor correlation with these large bodies of water.

Théorie du bilan d'énergie

Les résultats favorables qu'on a obtenus à partir des bacs enfouis peuvent être expliqués, au moins en partie, par les travaux de SCHMIDT [24] en 1915, de ANGSTRÖM [2] et de CUMMINGS et RICHARDSON [7] [8] en 1927 et en 1940. Ces auteurs ont basé leurs développements sur des hypothèses entièrement différentes. Leurs développements utilisent une théorie du bilan d'énergie thermique pour un lac ou pour un réservoir, qu'on peut exprimer sous la forme suivante :

$$Q_i = Q_s - Q_r - Q_b - Q_h - Q_e + Q_v - Q_w \quad (6)$$

où Q_s est la radiation solaire incidente sur la surface d'eau, Q_r la radiation réfléchie, Q_b la perte nette d'énergie subie par la masse d'eau par échange de radiation des ondes longues entre l'atmosphère et cette masse d'eau, Q_h l'énergie transportée par conduction de l'eau vers l'atmosphère sous forme de chaleur sensible, Q_e l'énergie utilisée par l'évaporation, Q_v la quantité nette de l'énergie introduite dans la masse d'eau, Q_w l'énergie emportée par l'eau évaporée et Q_i l'augmentation de l'énergie emmagasinée dans le réservoir d'eau.

Considérant que l'équation précédente est, en effet, une somme ou une intégration des échanges d'énergie, il est important de contrôler ou de mesurer chacune des variables de l'équation. En conséquence, on doit employer cette équation pour un bac soigneusement isolé autour des côtés et du fond. On a obtenu un succès considérable par l'emploi de ce bac (proposé pour la pre-

mière fois par CUMMINGS) [8] pour les études de l'évaporation.

Comme les bacs enfouis sont mieux isolés du sol ou de l'eau environnante, on comprend pourquoi les résultats ont été plus conformes que ceux obtenus à partir de bacs évaporants sus-jacents, ceux-ci étant exposés à la radiation et à l'action du vent.

Théorie du transfert de masse

En partant des développements acquis à partir de la théorie du transfert de masse et de la mécanique des fluides moderne, THORNTHWAITHE et HOLZMAN [31] ont obtenu une équation. Celle-ci, bien que correcte théoriquement, ne fut pas un succès dans la pratique, en raison des difficultés de mesure de certaines quantités physiques qui y figurent. Le début de récents travaux et les nouveaux progrès dans l'étude de l'évaporation ont été marqués par les recherches de THORNTHWAITHE et HOLZMAN. C'est la raison pour laquelle une discussion plus complète de leurs travaux trouvera place, plus tard, dans le chapitre IV.

Critique des travaux antérieurs

Ce résumé des recherches théoriques et expérimentales entreprises antérieurement à 1940 indique, qu'en général, la science de l'évaporation était limitée à un perfectionnement graduel de la loi de DALTON, présentée peu après 1800. On a trouvé insuffisant ces développements de la loi de DALTON. Cette insuffisance constituait

Energy-Budget Theory

The rather favorable results which have been obtained from the sunken type of evaporation pan can be explained at least in part by the work of Schmidt [24] in 1915, Angström [2], and Cummings and Richardson [7] [8] in 1927 and 1940, who based their developments upon entirely different assumptions. These developments are based upon the energy-budget theory for a lake or reservoir and may be expressed in the following form

in which Q_s is the solar radiation incident to the water-surface, Q_r is the reflected solar radiation, Q_b is the net energy lost by the body of water through the exchange of long-wave radiation between the atmosphere and body of water, Q_h is the energy conducted from the body of water into the atmosphere as sensible heat, Q_e is energy utilized by evaporation, Q_v is net energy advected into the body of water, Q_w is energy advected by the evaporated water, and Q_i is the increase energy stored in the body of water.

Because the foregoing equation is actually a summation or integration of the energy exchange, it is important that each of the variables involved be carefully controlled or measured. Therefore, this equation must be used with an evaporation pan which is heavily insulated around the sides and bottom. Considerable success has been obtained in using this pan (originally designed by Cummings [8]) in connection with evaporation studies.

Because the sunken-type pans are rather well insulated by the

surrounding earth or water, it is understandable that the results would be more consistent than those results obtained from the evaporation pans placed above the surface where they are exposed to radiation and the variable action of the wind.

Mass Transfer Theories

As a result of the developments which were made in modern fluid mechanics, Thornthwaite and Holzman [31] developed an equation which, although theoretically sound, was unsuccessful from the practical viewpoint because of the difficulty of making certain physical measurements required in their equation. Because this work of Thornthwaite and Holzman was among the studies which marked the beginning of the recent work and the new approach to evaporation a more complete discussion of this approach will be given in Chapter IV.

Evaluation of Past Research

The foregoing discussion of theoretical and experimental investigations which have been carried on prior to 1940 indicates that, for the most part, the science of evaporation was limited to a gradual refinement of the Dalton law which was originally presented shortly after 1800. Because these developments based entirely upon Dalton's law were found to be inadequate, there was considerable impetus to search for a more satisfactory explanation and description of the evaporation process. Although consider-

par elle-même une impulsion vers la recherche d'une meilleure description et d'une explication plus satisfaisante du phénomène de l'évaporation. Malgré le travail considérable effectué sur ce sujet, au cours des années 1930-1940, en employant la notion du bilan d'énergie et celle des théories du transfert de masse, on n'a guère constaté de progrès appréciable qu'après 1940. En l'état de la connaissance actuelle de l'évaporation, on peut saisir pourquoi les résultats des expériences précédentes n'ont pas été aussi satisfaisants qu'on l'eût voulu. Soulignons, toutefois, que cela était inévitable pour une investigation en plein développement. Les recherches récentes ne seront-elles pas susceptibles d'être critiquées trente ou quarante ans plus tard?

Le réseau d'écoulement du vent autour des bacs d'évaporation est déterminé d'une manière entièrement artificielle et c'est pourquoi cette évaporation ne peut représenter complètement celle des larges masses d'eau, phénomène qui est d'ailleurs l'objectif final de ces mesures. En plus, le réseau d'écoulement autour de chaque bac change avec les variations de la direction du vent, de la stabilité atmosphérique et des radiations. Tous ces facteurs contribuent à l'incertitude et renforcent la difficulté d'utiliser les données recueillies dans des bacs d'évaporation. La grande importance des facteurs précédents et encore d'autres n'avait pas été complètement dégagée. En conséquence, on ne pouvait étudier qu'indirectement leur influence. Alors, la majeure partie des recherches antérieures a traité de problèmes tels que ceux de la détermination de l'influence de la forme des bacs, de leur grandeur ou du type de revêtement à leur appliquer.

Bien qu'on ait apporté des perfectionnements à la loi fondamentale de DALTON, très peu de progrès s'en sont suivis pour la compréhension essentielle du phénomène de l'évaporation. Cette stagnation continua jusqu'à la nouvelle théorie de PRANDTL concernant la couche limite et l'idée de REYNOLDS sur l'analogie entre le transfert de chaleur et le transfert de quantité de mouvement. Il y a plus de cinquante ans que ces deux idées ont été développées. Cependant, ni l'une ni l'autre de ces découvertes importantes n'était formulée spécialement pour le phénomène de l'évaporation (transfert de masse). En conséquence, la possibilité de leur application n'était pleinement réalisée que récemment (c'est-à-dire trente ou quarante ans plus tard).

Les quelques études préliminaires qui ont été faites dans l'espoir d'appliquer les principes de la mécanique des fluides moderne n'avaient pas été complètement couronnées de succès. De plus, on manquait considérablement de données d'expériences pour vérifier l'exactitude des résultats de ces études. Malheureusement, les données disponibles pour ces vérifications n'étaient pas suffisamment complètes pour être utilisées. Dans la plupart des cas, on n'avait pas de mesures de certains paramètres importants. En conséquence, si on devait employer ces paramètres, on était obligé de faire des hypothèses, des estimations supplémentaires, d'où difficulté à contrôler les résultats.

Soulignons que les travaux récents, basés sur les progrès dans les notions physiques d'évaporation et sur le développement de la théorie de la couche limite dans la mécanique des fluides

able work was done utilizing the concept of the energy-budget and the mass-transfer theories during the 1930's, it was not until after 1940 that appreciable progress was made.

In view of the present-day knowledge of evaporation it is not difficult to understand why the results of previous experimentation were not as satisfying as desired (at this point one must hasten to state that this is simply an inevitable situation if scientific progress is to be made, and the recent work described herein will no doubt be in a similar position for criticism 30 or 40 years hence).

The wind flow pattern surrounding evaporation pans is quite artificial and for this reason the evaporation from such pans cannot easily represent the evaporation from large bodies of water—which is usually the ultimate objective of such measurements. Furthermore, the flow patterns surrounding each pan change with changing wind direction, with changing atmospheric stability and with changing radiation—all of which contributes to the uncertainty and the difficulty of utilizing the data from such evaporation pans. Because the great importance of these and other factors was not fully realized, studies of their influence were made only indirectly. Instead, much of the past research was concerned with such problems as determining the influence of the shape of the pan, the size of the pan, or the type of paint used on the pan.

Despite the refinements which were added to the basic Dalton

law, there was very little progress made in the fundamental understanding of the evaporation progress until the impact was felt from Prandtl's new concept of the boundary layer and Reynolds suggestion of an analogy between heat transfer and momentum transfer—both of which were developed more than 50 years ago. Neither of these important developments were made specifically for the subject of evaporation (mass transfer) and hence their possible application to it was not fully realized until more recently (30 to 40 years later).

Those few pioneering studies which were made in the hopes of utilizing the principles of modern fluid mechanics were not entirely successful. Furthermore, there was considerable lack of experimental data available to determine their accuracy. Unfortunately, the data which were available were not sufficiently complete to be utilized. In virtually all cases certain important variables were not measured, so that if these variables were to be used at all assumptions and estimations were necessary which made it difficult if not impossible to evaluate the results.

Nevertheless, it must be pointed out and strongly emphasized that this early work has blazed the trail for more recent studies based upon advances in physical concepts of evaporation and upon the development of the boundary layer theory in modern fluid mechanics.

moderne, s'appuient fortement sur les études antérieures. C'est dans cette situation que l'auteur a entrepris en 1945 une étude de l'évaporation d'une surface plane sous conditions contrôlées dans une soufflerie. Cette étude et d'autres qui en découlent feront l'objet des chapitres suivants.

Programme des présentes recherches

On a vu, dans les paragraphes précédents, que les premières recherches s'intéressaient principalement à une extension ou à des perfectionnements de la loi de DALTON. Le but final était, en général, la détermination de l'influence des facteurs climatiques différents sur le taux de l'évaporation des bacs. De plus, un travail considérable a été consacré à rechercher une corrélation entre l'évaporation des bacs et celle de larges masses d'eau tel qu'un lac. La majeure partie du travail consistait simplement à utiliser les résultats de nombreuses expériences faites en laboratoires et au dehors, et d'essayer d'obtenir, par des moyens différents, des expressions empiriques applicables à l'évaporation.

Sur les bases de cet important premier travail et à l'aide des développements de la mécanique des fluides moderne, un programme de recherches a été commencé au cours des dix dernières années. Notre but est de rendre compte des méthodes suivies dans ces études et des résultats obtenus.

Dans le domaine du transfert de la quantité de mouvement, du transfert de chaleur et du

transfert de masse, il existe une littérature assez étendue. La première partie du programme des recherches récentes était donc de faire un examen critique de cette littérature, aux fins de déterminer les moyens les plus efficaces pour les bases de l'étude expérimentale en laboratoire. En tenant compte à la fois de la littérature précédente et d'une analyse théorique, on a établi dans la deuxième partie un projet d'étude des surfaces en évaporation qu'on disposerait dans une soufflerie où l'on pourrait mesurer et contrôler les divers facteurs agissant sur l'évaporation.

En plus d'une recherche fondamentale sur surfaces planes, des investigations ont été faites également sur des bacs de grandeur et de forme différentes. Enfin, on a effectué une étude sur modèle réduit du lac Hefner qui fournit l'alimentation en eau d'Oklahoma City. Le prototype du lac a été étudié par un groupe d'agences gouvernementales aux Etats-Unis [34]. L'étude sur le modèle réduit disposé dans une soufflerie a été faite afin de déterminer la correspondance entre le prototype et le modèle. Nous donnerons ici les aspects différents de cette recherche en laboratoire. Les résultats des mesures effectuées dans la nature ont été publiés dans le *U. S. Geological Survey Circular*, Number 229 [34].

Les résultats heureux de nos méthodes décrites dans cette thèse (développements théoriques, expériences en laboratoire et étude dans la nature) ont développé la connaissance de l'évaporation. Toutefois, il y a encore un travail considérable à effectuer.

(A suivre.)

It was with the foregoing situation in view that the writer initiated in 1945 an investigation of evaporation from a plane boundary under controlled conditions in a wind tunnel. These investigations together with others which have followed will be described in the subsequent chapters.

Program of Recent Research

As pointed out in the foregoing paragraphs the early research on the subject of evaporation was concerned primarily with an extension or a refinement of Dalton's law. The ultimate objective was generally to determine the influence of various climatic factors on the rate of evaporation from evaporation pans. Furthermore, considerable effort was expended to determine the relationships between the evaporation from pans and the evaporation from larger bodies of water such as lakes. Most of this work was simply a matter of using the results of many experiments in the laboratory and the field and attempting to correlate them in various ways to obtain empirical expressions for evaporation.

On the basis of this important early work and the developments of modern fluid mechanics, certain research programs were initiated within the past decade. It is the purpose of this paper to report the method of conduct and the results of these programs.

Because of the volumes of literature which exist in the fields of momentum transfer, heat transfer, and mass transfer, the first part of the program on recent research was to critically review

this literature in order to determine exactly what steps would be most beneficial from the experimental viewpoint in the laboratory. Second, in conjunction with and following the literature survey and the theoretical analysis, the evaporation program in the laboratory was designed around an evaporating surface in a wind tunnel in which the various factors affecting evaporation could be measured and or controlled.

In addition to the fundamental research on a plane boundary, investigations have also been made on evaporation pans of various sizes, evaporation surfaces of various shapes and a model study of Lake Hefner (a part of the water supply of Oklahoma City, Oklahoma). This lake was studied in the prototype by a joint group of government agencies in the United States [34] and the model study was made in a wind tunnel under controlled conditions in order to determine the relationship between the model and the prototype. It is the various aspects of the laboratory research in the wind tunnel which are reported and discussed in this paper. The results of the field studies are reported in the *U. S. Geological Survey Circular* Number 229 [34].

Although the three-fold approach (theoretical developments, laboratory investigations, and field studies) described in this paper has advanced the knowledge of evaporation, there still remains considerable work to be done before the subject is completely understood.

(to be continued.)