UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

LE DESSÈCHEMENT DU SOL EN MILIEU URBAIN ET LES ARBRES

par

Nourri BEKKOUCHE
DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL
ECOLE POLYTECHNIQUE

MÉMOIRE PRÉSENTE EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAÎTRE EN SCIENCE APPLIQUÉES (M.Sc.A)

Mars 1990

c Nourri BEKKOUCHE 1990

al Library
ıada

ian Theses Service

Canada
l4

Bibliothèque nationale
du Canada

Service des thèses canadiennes

author has granted an irrevocable non-
usive licence allowing the National Library
anada to reproduce, loan, distribute or sell
es of his/her thesis by any means and in
form or format, making this thesis available
ıterested persons.

author retains ownership of the copyright
ıis/her thesis. Neither the thesis nor
stantial extracts from it may be printed or
rwise reproduced without his/her per-
ion.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-58104-2

nada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé

LE DESSÈCHEMENT DU SOL EN MILIEU URBAIN ET LES ARBRES

Présenté par: Nourri BEKKOUCHE

en vue de l'obtention du grade de:

Maître en Sciences Appliquées (M.Sc.A)

a été dûment accepté par le Jury d'examen constitué de:

M. Branko LADANYI,.....,D.Sc.A, président

M. Vincent SILVESTRI,.....,Ph.D

M. Michel Soulié,.....,D.Sc.A

A mes parents

SOMMAIRE

Dans plusieurs pays, des problèmes sont soulevés par la construction de fondations sur les argiles sujettes à des mouvements différentiels saisonniers, de retrait et de gonflement. En Angleterre par exemple c'est le retrait qui est le principal problème, tandis qu'au Canada ce sont le retrait et le gonflement. Il existe dans la région de Montréal un certain nombre d'exemples illustrant les dommages causés par dessication aux structures supportées par des fondations peu profondes.

La ville de Montréal, située dans une zone tempérée, reçoit en été une précipitation qui est généralement plus faible que la quantité d'eau évapo-transpirée. Durant les périodes de sécheresse, les arbres retirent l'eau du sol argileux causant une diminution de volume impliquant des dommages aux structures.

Afin de quantifier l'effet des facteurs climatiques sur le dessèchement des sols argileux, on a appliqué quatre différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration (ETP). A partir de l'ETP, on a estimé l'épuisement de l'humidité du sol pour la région de Montréal dans la période (1930-88), ceci nous permet de déterminer les

périodes de sécheresses durant lesquelles les problèmes d'affaissement des sols des fondations sont fréquents.

Des courbes d'épuisement de l'humidité du sol pour chaque décennie de la période mentionnée ci-haut montrent que la région de Montréal a été l'objet de plusieurs saisons de sécheresses notamment 1955, 1978 et 1983 qui sont en parfaite concordance avec l'observation.

Des mesures in-situ de la teneur en eau du sol à l'aide de la sonde à neutrons et de tassements ont été prises sur trois sites. Les résultats de ces mesures sont présentés, ainsi que des corrélations qui ont été observées entre ces deux variables et l'épuisement de l'humidité du sol.

ABSTRACT

In many countries there are problems linked to differential movements due to seasonal shrinking or swelling. In England, for instance, the problems are mainly caused by shrinking whereas in Canada they are more often due to shrinking and swelling of clay. A number of case histories are presented in which damage to stuctures supported on shallow foundations in the Montreal area have occurred due to dessication.

The city of Montreal is situated in a temperated zone but in summer, the moisture received in the form of precipitation is less than the amount that might potentially be used in evapotranspiration. During the drought periods, trees draw upon soil moisture in storage in the clay subsoils, resulting in soil volume change which causes serious structural problems.

In order to evaluate the effects of climatic factors on desication of clayey soils, four different methods have been applied to compute potential evapotranspiration and soil moisture depletion for Montreal during the period of 1930 to 1988 and next to determine drought periods which bring subsidence problems to foundation and buildings.

The soil moisture depletion curves for every 10 years during the period mentionned above prove that Montreal and the surroundings have been subjected to different drought periods including 1955, 1978 and 1983 which are in perfect concordance with observations.

The soil moisture depletion calculation is based on Thornthwaite's concept which has been found useful in evaluating the evapo-transpiration in relation to climatological data.

In-situ readings of water content with neutron probe meter and settlement have been collected. The results from these measurements and the correlations between these two variables and soil moiture depletion have been deducted.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur Vincent Silvestri, professeur à l'Ecole Polytechnique et directeur de cette recherche, pour la confiance qu'il m'a accordée, ses conseils, ses suggestions et sa disponibilité tout au long de cette étude.

Je remercie également Monsieur Georges Sarkis, associé de recherche pour ces conseils Techniques.

C'est avec un grand plaisir que je remercie tous les membres de la section de géotechnique non seulement pour leur compétence qu'ils ont mise si généreusement à ma disposition mais aussi pour leur gentillesse et leur encouragement.

Mon support financier a été assuré par le Ministère de l'Enseignement Supérieur de l'Algérie et par le fond de recherche de Monsieur Vincent Silvestri. Je tiens à les en remercier profondément.

TABLE DES MATIERES

Page

Sommaire.....v

Abstract.....vii

Remerciements.....ix

Liste des Figures.....xiii

Liste des Tableaux.....xxv

Liste des Symboles.....xxvi

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Généralités.....1

1.2 Objet de l'étude.....2

1.3 Plan d'étude.....3

CHAPITRE 2 TRAVAUX ANTERIEURS ET ANALYSES THEORIQUES

2.1 Travaux antérieurs.....6

2.1.1 Aperçu historique.....6

2.1.2 Origines des mouvements des sols en milieu urbain.....8

2.1.3 Normes et règlements de la proximité des arbres en Grande Bretagne.....16

2.1.4 Mouvement du sol et influence climatique.....19

Page

2.2 Analyses théoriques.....27
2.2.1 Concept d'évapotranspiration et d'évapotranspiration potentielle.....28
2.2.2 Méthode de détermination de l'évapotraspiration potentielle.....29
2.2.3 Epuisement de l'humidité du sol.....53
2.2.4 Résultats des analyses théoriques.....59

CHAPITRE 3 TRAVAUX AU LABORATOIRE ET IN-SITU

3.1 Généralités.....85
3.2 Calibration de la sonde à neutrons.....86
3.2.1 Introduction.....86
3.2.2 Déscription et fonctionnement de la sonde à neutrons 87
3.2.3 Le ratio 89
3.2.4 Calibration in-situ.....90
3.2.5 Calibration au laboratoire.....93
3.2.6 Courbe de la calibration de l'appareil.....98
3.3 Site no.1 (Hotel de ville de Montréal-est)..100
3.3.1 Déscription du site et de l'édifice.....100
3.3.2 Investigation sur terrain et au laboratoire.102
3.3.3 Travaux d'arpentage.....107
3.4 Site no.2 (Epiphanie).....114
3.4.1 Déscription du site et de l'édifice.....114

Page

3.4.2 Investigation in-situ et au laboratoire.....116
3.4.3 Travaux d'arpentage.....122
3.5 Site no.3 (Parc Maisonneuve).....125
3.5.1 Déscription du site.....125
3.5.2 Travaux in-situ et au laboratoire.....126

CHAPITRE 4 ANALYSES ET DISCUSSIONS DES RESULTATS
4.1 Généralités.....133
4.2 Etude de cas.....133
4.2.1 Hotel de ville (site no.1).....133
4.2.2 Epiphanie (site no.2).....157
4.4 Parc Maisonneuve.....170
4.4.1 Variation saisonnière des profils de la teneur en eau.....173
4.4.2 Courbes d'égal déficit.....196
4.4.3 Variation saisonnière de la profondeur de la nappe.....206

CHAPITRE 6 CONCLUSION.....209

BIBLOGRAPHIE.....212

ANNEXE 1 - Arbres et leurs racines.....217
ANNEXE 2 - Graphiques du SMD (1930-88).....236

LISTE DES FIGURES

Fig	Titre	Page
2.1	Importance des dommages dus au changement de volume des sols argileux (Williams, 1958)	10
2.2	Configuration de la zone active par différents types et densités de végétations sur un dépôt d'argile profond avec nappe souterraine profonde (Hamilton, 1972)	14
2.3	Infuence à long terme d'un enracinement profond d'arbres sur la performance des fondations superficielles (Canadian Geotechnical manual, 1985)	15
2.4	Effet de l'épuisement de l'humidité du sol sur le mouvement du sol à différentes profondeurs et à 1.5m de la ligne d'ormes (Bozozuk et Burn, 1960)	22
2.5	Effet de l'épuisement de l'humidité du sol sur le mouvement du sol à différentes distances de la lignes d'ormes et à 60 cm de profondeur (Bozozuk et Burn, 1960)	23
2.6	Variation du tassement du sol à différentes distances de la ligne d'ormes dans l'argile Léda (Bozozuk et Burn, 1960)	24
2.7	Evapotranspiromètre ou lysimètre (Brochet et Gerbier, 1975)	31
2.8	Pente de la courbe ew vs température	40
2.9	Précipitation annuelle et moyenne annuelle (1930-1988)	55
2.10	Conditions de l'humidité du sol moyenne et extrêmes (1955 et 1972) pour la période allant de 1930 à 1988 (l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite)	57
2.11	Distributions moyennes mensuelles de l'ETP et l'EP calculées par différentes méthodes (1930-1988)	60

Page

2.12 Distributions moyennes mensuelles de l'ETP et l'EP calculées par différentes méthodes pour l'année 1972 61

2.13 Distributions moyennes mensuelles de l'ETP et l'EP calculées par différentes méthodes pour l'année 1978 62

2.14 Distributions moyennes mensuelles de l'ETP et l'EP calculées par différentes méthodes pour l'année 1983 63

2.15 Distributions moyennes mensuelles de l'ETP et l'EP calculées par différentes méthodes pour l'année 1988) 64

2.16 Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période de (1930-1939) 68

2.17 Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période (1940-1949) 69

2.18 Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période (1950-1959) 70

2.19 Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période (1960-1969) 71

2.20 Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période (1970-1979) 72

2.21 Evapotranspiration potentielle calculé par la formule de Thornthwaite pour la période (1980-1988) 73

2.22 Précipitations mensuelles à Montréal pour la période de 1930 à 1988.....74

2.23 Evapotranspiration annuelle et moyenne annuelle (1930-1988) calculée par formule de Blaney et Criddle 76

Page

2.24 Evapotranspiration annuelle et moyenne annuelle (1930-1988) calculée par formule de Penman ...77

2.25 Evapotranspiration annuelle et moyenne annuelle (1930-1988) calculée par formule de Turc 78

2.26 Evapotranspiration annuelle et moyenne annuelle (1930-1988) calculée par formule de Thornthwaite 79

2.27 Evapotranspiration potentielle annuelle (1930-1988) calculée selon différentes méthodes 80

2.28 Température moyenne mensuelle à Montréal pour la période de 1930 à 1988 81

3.1 L'appareil à neutrons de type "503 DR" 88

3.2 Calibration in-situ de la sonde à neutrons....91

3.3 Calibration au laboratoire de la sonde à neutrons 94

3.4 Courbe de calibration de la sonde à neutrons..99

3.5 Plan du site no.1 (Hotel de ville) 101

3.6 Rapport de tranchée #1 (Hotel de ville) 103

3.7 Rapport de tranchée #2 (Hotel de ville) 104

3.8 Mesure de la teneur en eau in-situ 106

3.9 Tassements (Hotel de ville) 108

3.10 Vue de la fissuration de la poutre dans la chambre de chauffage (Hôtel de ville) 109

3.11 Vue des dommages du palier d'escalier (Hôtel de ville) 110

3.12 Vue du coin N.O montrant les dommages extérieurs (Hôtel de ville) 111

3.13 Vue des dommages du cloison (Hôtel de ville) 112

Page

3.14 Vue des dommages intérieurs (Hôtel de ville) 113

3.15 Vue des dommages causés au coin S.O (Epiphanie) 115

3.16 Plan du site no.2 (Epiphanie) 117

3.17 Rapport de la tranchée #1 (Epiphanie) 118

3.18 Rapport de la tranchée #2 (Epiphanie) 119

3.19 Rapport de la tranchée #3 (Epiphanie) 120

3.20 Tassements (Epiphanie) 123

3.21 Vue des dommages intérieurs (Epiphanie) 124

3.22 Plan de l'instrumentation du site no.3 (orme) 127

3.23 Plan de l'instrumentation du site no.3 (érable) 128

3.24 Plan de l'instrumentation du site no.3 (ligne de peupliers).....129

3.25 Plan de l'instumentation du site no.3 (peuplier) 130

3.26 Rapport de Tranchée, site no.3 (Parc Maisonneuve) 132

4.1 Profils de la teneur en eau du sol pour différents tubes à l'Hotel de vill (date de lecture: 01-01-88) 135

4.2 Profils de la teneur en eau du sol pour différents tubes à l'Hotel de vill (date de lecture: 15-03-88) .....136.

4.3 Profils de la teneur en eau du sol pour différents tubes à l'Hotel de vill (date de lecture: 01-05-88) 137

4.4 Profils de la teneur en eau du sol pour différents tubes à l'Hotel de vill (date de lecture: 06-06-88) 138

Page

4.5 Profils de la teneur en eau du sol pour différents tubes à l'Hotel de vill (date de lecture: 04-07-88) 139

4.6 Profils de la teneur en eau du sol pour différents tubes à l'Hotel de vill (date de lecture: 26-07-88) 140

4.7 Profils de la teneur en eau du sol pour différents tubes à l'Hotel de vill (date de lecture: 01-09-88) 141

4.8 Profils de la teneur en eau du sol pour différents tubes à l'Hotel de vill (date de lecture: 15-03-88) 142

4.9 Profils de la teneur en eau du sol pour différents tubes à l'Hotel de vill (date de lecture: 24-11-88) 143

4.10 Profils de la teneur en eau du sol pour différents tubes à l'Hotel de vill (date de lecture: 19-10-88) 144

4.11 Développement saisonnier du profil de la teneur en eau du sol pour l'année 1988 (Hotel de ville, tube d'accès no.1) 148

4.12 Développement saisonnier du profil de la teneur en eau du sol pour l'année 1988 (Hotel de ville, tube d'accès no.2) 149

4.13 Variation de la teneur en eau du sol du 02-05-89 au 01-11-89 pour le tube d'accès no.6 (Hotel de ville) 150

4.14 Relation entre l'épuisement de l'humidité du sol estimé par la formule de Thornthwaite, le déficit d'eau et le tassement à 0.4h de la ligne d'érables 151

4.15 Relation entre l'épuisement de l'humidité du sol estimé par la formule de Turc, le déficit d'eau et le tassement à 0.4h de la ligne d'érables.152

Page

4.16 Relation entre l'épuisement de l'humidité du sol estimé par la formule de Blaney et Criddle,le déficit d'eau et le tassement à 0.4h de la ligne d'érables 153

4.17 Relation entre l'épuisement de l'humidité du sol estimé par la formule de Penman, le déficit d'eau et le tassement à 0.4h de la ligne d'érables 154

4.18 Pente de la courbe du déficit d'eau vs SMD (calculée par différentes méthodes) en fonction de la profondeur 156

4.19 Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 01-12-87 à l'épiphanie (site no.2) 160

4.20 Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 16-03-88 à l'épiphanie (site no.2) 161

4.21 Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 31-03-88 à l'épiphanie (site no.2) 162

4.22 Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 03-05-88 à l'épiphanie (site no.2) 163

4.23 Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 10-05-88 à l'épiphanie (site no.2) 164

4.24 Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 06-06-88 à l'épiphanie (site no.2) 165

4.25 Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 05-07-88 à l'épiphanie (site no.2) 166

4.26 Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 26-07-88 à l'épiphanie (site no.2) 167

Page

4.27 Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 01-09-88 à l'épiphanie (site no.2) 168

4.28 Variation saisonnière du profil de la teneur en eau volumétrique dans le tube d'accès E3.....171

4.29 Variation saisonnière du profil de la teneur en eau volumétrique dans le tube d'accès E4.....172

4.30 Effet du jeu entre le tube d'accès et la surface intérieure du trou de forage sur la teneur en eau du sol mesuré in-situ 174

4.31 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 30-08-88 au 11-09-89 à 0.36h de l'orme (site no.3) 176

4.32 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 30-08-88 au 11-09-89 à 1.48h de l'orme (site no.3) 177

4.33 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 30-08-88 au 11-09-89 à 1.96h de l'orme (site no.3) 178

4.34 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.09h de la ligne de peupliers no.3) 180

4.35 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.18h de la ligne des peuplies no.3) 181

4.36 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.28h de ligne de peupliers no.3) 182

4.37 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.46h de ligne de peupliers no.3) 183

4.38 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.92h de ligne de peupliers no.3) 184

Page

4.39 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 1.38h de ligne de peupliers no.3) 185

4.40 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 1.84h de ligne de peupliers no.3) 186

4.41 Profils de la teneur en eau du sol à 0.28h, 0.46h et 1.38h de la ligne de peupliers mesurés le 29-09-89 188

4.42 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.1h de l'érable (site no.3) 189

4.43 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.2h de l'érable (site no.3) 190

4.44 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.32h de l'érable (site no.3) 191

4.45 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.68h de l'érable (site no.3) 192

4.46 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 1.09h de l'érable (site no.3) 193

4.47 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 1.63h de l'érable (site no.3) 194

4.48 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 2.16h de l'érable (site no.3) 195

4.49 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.11h du peupliers (site no.3) 197

4.50 Variation du profil de la teneur en eau du sol

Page

4.51 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.39h du peupliers (site no.3) 199

4.52 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 0.66h du peupliers (site no.3) 200

4.53 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 1.56h du peupliers (site no.3) 201

4.54 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 2h du peupliers (site no.3) 202

4.55 Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 à 2.67h du peupliers (site no.3) 203

4.56 Déficit de l'humidité du sol (ligne de peupliers) 204

4.57 Déficit de l'humidité du sol (érable) 205

4.58 Déficit de l'humidité du sol (peuplier) 207

4.59 Variation saisonnière de la profondeur de la nappe du 30/08/88 au 19/09/89 (site no.1) ...208

A.1 Vue d'un arbre avec son système radiculaire (Dictionnaire visuel, 1987) 220

A.2 Les trois grands types d'enracinements courants (Fishesser, 1981) 222

A.1-1 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1930-1939 (l'ETP a été estimée par la formule de Penman) 232

A.1-2 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1940-1949 (l'ETP a été estimée par la formule de Penman) 233

Page

A.1-3 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1950-1959 (l'ETP a été estimée par la formule de Penman) 234

A.1-4 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1960-1969 (l'ETP a été estimée par la formule de Penman) 235

A.1-5 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1970-1979 (l'ETP a été estimée par la formule de Penman) 236

A.1-6 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1980-1988 (l'ETP a été estimée par la formule de Penman) 237

A.2-1 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1930-1939 (l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite) 238

A.2-2 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1940-1949 (l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite) 239

A.2-3 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1950-1959 (l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite) 240

A.2-4 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1960-1969 (l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite) 241

A.2-5 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1970-1979 (l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite) 242

Page

A.2-6 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1980-1988 (l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite) 243

A.3-1 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1930-1939 (l'ETP a été estimée par la formule de Turc) 244

A.3-2 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1940-1949 (l'ETP a été estimée par la formule de Turc) 245

A.3-3 Conditions de l'humidité du du sol calculées à partir des données climatologiques 1950-1959 (l'ETP a été estimée par la formule de Turc) 246

A.3-4 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1960-1969 (l'ETP a été estimée par la formule de Turc) 247

A.3-5 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1970-1979 (l'ETP a été estimée par la formule de Turc) 248

A.3-6 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1980-1988 (l'ETP a été estimée par la formule de Turc) 249

A.4-1 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1930-1939 (l'ETP a été estimée par la formule de Blaney and Criddle) 250

A.4-2 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1940-1949 (l'ETP a été estimée par la formule de Blaney and Criddle) 251

A.4-3 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1950-1959 (l'ETP a été estimée par la formule de Blaney and Criddle) 252

Page

A.4-4 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1960-1969 (l'ETP a été estimée par la formule de Blaney and Criddle) 253

A.4-5 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1970-1979 (l'ETP a été estimée par la formule de Blaney and Criddle) 254

A.4-6 Conditions de l'humidité du du sol calculées à par tir des données climatologiques 1980-1988 (l'ETP a été estimée par la formule de Blaney and Criddle) 255

LISTES DES TABLEAUX

Page

2.1 Radiation solaire directe en absence de l'atmosphère (I_o) en mm d'eau/jour 36

2.2 Durée maximale possible d'insolation H (h) ...38

2.3 Facteur de correction de l'ETP calculée par la formule de Thornthwaite.....43

2.4 Le pourcentage mensuel d'heures du jour de l'année pour les latitudes 28° à 50° nord 48

2.5 Radiation maximale I_o (cal/cm2/jour) 52

2.6 Comparaisons entre l'ETP, précipitation moyennes annuelles (ETP_{MA} , P_{MA}) et l'ETP, précipitation moyenne de la saison de croissance (ETP_{SC} , P_{SC}) 66

3.1 Résultats de calibration in-situ (D'après Silvestri et al., 1989) 92

3.2 Résultats de la calibration au laboratoire (D'après Silvestri et al., 1989) 97

4.1 Rapport entre tassements calculés et mesurés.146

A.1 Etude statistique de degré de dommages causé par différentes espèces d'arbres 229

Liste des symboles

a	Coéfficient en fonction de l'indice thermique annuel.
a_1	Albedo de la surface évaporante
A	Expression du bilan H_G
B	Expression du Bilan H_G
B_m	Paramètre de la pente P_d
C_{OEF}	Coéfficient correctif
d	Echanges latéraux d'eau dans le sol
D	Retraits d'eau liquide par percolation en horizons profonds
D_f	Dificit d'eau
e_t	Pression de la vapeur d'eau dans l'air
e_w	Pression saturante de vapeur d'eau
E	Pertes par évaporation superficielle
E_a	Pouvoir évaporant de l'air
ETP_{MA}	Evapotranspiration moyenne annuelle
ETP_{SC}	Evapotrnspiration de la saison de croissance
ETP_{nc}	Evapotranspiration potentielle non corrigée
f	Coéfficient empirique saisonnier
F	Facteur mensuel
F_c	Facteur de correction dépend du mois et de la latitude donnée par le tableau (2.3)
h	Hauteur de l'arbre

h_m Hauteur de mesure de la vitesse du vent

h_p Durée d'insolation effective

H Durée maximale possible d'insolation

H_G Bilan thermique

HR Humidité relative moyenne mensuelle

i Indice thermique mensuel

I Indice thermique pour les 12 mois de l'année.

I_i Apports d'eau complémentaires (irrigation)

I_g Radiation solaire globale du mois considéré

I_o Radiation maximale

K Coéfficient empirique saisonnier

p Nombre d'heure de jour du mois

P_f Pente de la courbe déficit vs SMD

P_m Paraméetre de la Pente P_d

P_{MA} Précipitation moyenne annuelle

P_{sc} Précipitation de la saison de croissance

P_p Apports d'eau dus aux précipitations

R ratio

SMC_i La variation de l'humidité du sol du mois considéré

SMD_i Epuisement de l'humidité du sol du mois considéré

SMD_{i-1} Epuisement de l'humidité du sol du mois précédent.

S_r Degré de saturation

S_t	Tassement calculé
S_{tr}	Tassement réel
T	Température moyenne mensuelle en °C.
T_K	Température absolue en °K
u	Vitesse du vent équivalente (miles/h)
v	Vitesse du vent
W	Teneur en eau massique
Z	Profondeur
δH	Variation d'humidité du sol prospecté par les racines
Δ	Pente de la courbe pression saturante de vapeur d'eau vs. temperature
Θ	Teneur en eau volumétrique
σ	Constante de STEFAN-BOLTZMAN

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Généralités

Plusieurs grandes communautés urbaines dans l'est du Québec sont situées dans une région qui fut jadis inondée par la mer post-glaciaire de Champlain. Dans ce large bassin intérieur, ont été déposées d'énormes quantités d'argile qui se caractérisent à l'échelle microscopique par une structure ouverte et une forte teneur en eau. Il s'en suit que le sol peut subir un changement de volume relativement important sous l'effet d'une surcharge excessive ou à cause de l'extraction de l'eau de ses pores par les racines d'arbres à croissance rapide.

En période de sècheresse, les problèmes associés à l'affaissement des fondations superficielles reposant sur des dépôts d'argile seront amplifiés en présence de certains espèces d'arbres (feuillus). En effet, ces espèces exigent une grande quantité d'eau nécessaire à leur croissance.

En général, les espèces d'arbres qui sont impliquées dans les problèmes de tassement en milieu urbain sont les

peupliers, parce qu'en plus de leur taux de croissance rapide, ils sont souvent plantés en ligne. Les saules et les ormes sont aussi dangereux. Les érables sont moins hasardeux, mais ils peuvent causer le retrait des sols argileux en périodes sèches. D'autre part, les conifères croissant moins vite que les feuillus, leur présence est plus sécuritaire (Burn et Penner, 1975).

1.2 Objet de l'étude

En milieu urbain, la consolidation et le dessèchement des sols argileux causés soit par l'évaporation directe de l'eau du sol, soit par l'absorption de l'eau par les racines d'arbres ou encore par la présence de tranchées drainantes, constituent les principaux facteurs responsables des désordres qui surviennent dans les fondations d'immeubles courants. A la suite de la sècheresse de l'été 1983, plusieurs nouveaux cas d'affaissement de fondations et de murs, de tassement de terrains et bris de conduite d'égout et d'aqueduc sont survenus à Montréal ainsi qu'ailleurs dans la province de Québec.

Pour vérifier les causes possibles du problème décrit ci-haut, nous avons choisi trois sites qui ont été l'objet d'affaissements de fondations et dont les désordres ont été

causés uniquement par la baisse de la teneur en eau du sol due au dessèchement. Des tranchées de reconnaissance ont été aménagées sur les trois sites en vue d'évaluer d'une part, les propriétés physiques et mécaniques du sol par des observations sur le terrain, et d'autre part par des essais au laboratoire sur des échantillons. Des tubes d'accès fermés à leurs extrémités inférieures ont été installés dans le but de mesurer périodiquement la teneur en eau du sol. Une telle procédure permet de bien comprendre et suivre le phénomène du dessèchement.

En général, les problèmes de dessèchement en milieu urbain apparaissent pendant les saisons de croissance, c'est-à-dire quand les précipitations ne satisfont pas le besoin de l'atmosphère en évapotraspiration. Afin de quantifier le besoin de l'atmosphère en humidité du sol, l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée par plusieurs méthodes dans le but d'estimer l'épuisement de l'humidité du sol (SMD). Ce dernier facteur est déduit en comparant l'ETP aux précipitations et peut être utilisé comme un indice du degré d'assèchement des sols.

1.3 Plan d'étude

Le chapitre 2 sera divisé en deux parties: la première

consiste en un aperçu historique des travaux antérieures sur l'affaissement des sols en milieu urbain réalisés soit au Canada, soit aux Etats-unis ou encore dans d'autres pays tels que l'Angleterre. On parlera surtout des recommandations et des normes qui ont été tirées de ces études. La deuxième partie est consacrée à la déscription et le calcul de l'ETP par différentes méthodes, pour une période allant de 1930 à 1988 à Montréal, ainsi que l'épuisement de l'humidité du sol qui peut servir comme un indice d'affaissement des sols argileux.

Le chapitre 3 traite de la description et la nature des travaux que nous avons réalisé au laboratoire et in-situ. On discutera de la calibration et de l'utilisation de l'appareil à neutrons tant in-situ qu'au laboratoire, le creusage des tranchées de reconnaissance, le prélèvement des échantillons à différentes profondeurs en vue de déterminer les propriétés physiques et mécaniques du sol, l'installation de tubes d'accès dans des forages réalisés au préalable à l'aide d'une tarière mécanique, et enfin les travaux d'arpentage.

Le chapitre 4 est consacré à l'analyse des résultats de mesures périodiques de la teneur en eau du sol.

Dans le chapitre 5, on exposera les conclusions et les suggestions pour les travaux futurs.

Enfin, les annexes seront consacrées aux déscriptions des groupes d'arbres, leurs besoins en eau et le développement de leurs racines.

CHAPITRE 2

TRAVAUX ANTERIEURS ET ANALYSES THEORIQUES

2.1 Travaux antérieurs

2.1.1 Aperçu historique

Au Canada, des études furent menées dans les années 60 par le Conseil National de la Recherche du Canada à la suite des sècheresses des années 50 et 60. Durant cette période plusieurs problèmes d'affaissement ont été recensés, causant ainsi l'apparition de fissures dans les routes, les trottoirs et les murs extérieurs de certains bâtiments à Ottawa. Ces études mirent en lumière ce phénomène et indiquèrent que des tassements trés importants causés par de gros arbres pouvaient se produire jusqu'à des distances d'une dizaine de mètres. Plusieurs articles et notes techniques furent publiés sur ce sujet (Baracos et Bozozuk, 1957; Bozozuk et Burn, 1960; Warkentin et Bozozuk, 1961; Legget et Crawford, 1965; Burn, 1973; Burn et Penner, 1975; Hamilton, 1977).

Des études du même type ont été réalisées dans la région de Chicago par Perpich et al. (1965) et arrivèrent à

des résultats similaires. il est à noter que certaines régions des Etats-unis sont particulièrement affectées par le problème de gonflement et retrait des sols.

En ce qui concerne ce même problème, le seul pays doté de normes précises semble être l'Angleterre. Ces normes furent introduites dans les différents codes de la construction à la suite d'études géotechniques réalisées par Ward (1950).

Les problèmes d'affaissement en milieu urbain se manifestent généralement à la suite de saisons de sècheresse. C'est donc en de telles saisons que des études d'affaissement des sols sont entreprises. En effet, des travaux ont été faits dans les années 50 (Ward, 1953; Skempton, 1954) à la suite d'une importante sècheresse. A la suite d'autres grandes sècheresses qui ont lieu entre 1975 et 1977, d'autres études furent effectuées et leurs recommendations furent incluses dans les divers codes (Reynolds, 1979; Reeve et al.,1980; British Standard Institution, 1980). Un symposium spécial a eu lieu à Londres sur l'influence de la végétation sur le gonflement et le dessèchement des sols argileux, et leurs effets sur les fondations des immeubles courants (Wyles, 1983; Driscol, 1983; Richards et al., 1983). Ce symposium fut suivi par une

séance de discussions dont les comptes-rendus furent publiés en juin 1984 dans la revue Géotechnique. Ces études ont confirmé les résultats des recherches précédentes; elles recommendent que certaines essences d'arbres à feuillage caduc, tels que les peupliers, les saules, les ormes, les érables et les bouleaux sont trés nuisibles aux fondations, alors que d'autres essences à feuillage persistant telles que les pins, les sapins et les épinettes ne causent habituellement pas de dommages.

2.1.2 Origines des mouvements des sols argileux en milieu urbain

Les sols argileux qui changent de volume constituent le risque naturel le plus coûteux pour les bâtiments construits sur des fondations peu profondes.

Au Canada, les dépots argileux pouvent être classés en deux groupes principaux:

Les argiles rétractables que l'on retrouve à une échelle extensive dans les vallées du Saint-Laurent et de l'Outaouais, ont habituellement été formées dans l'eau de mer, elles ont une teneur en eau trés élevée et contiennent peu ou pas de minéraux argileux gonflables. Elles ont peu tendance à gonfler sous l'effet de charges réduites et en

présence d'eau librement disponible (Hamilton, 1977).

Les sols argileux qui gonflent se rencontrent habituellement dans les dépôts lacustres du centre et l'ouest du Canada. A cause de la présence de montmorillonite et d'une teneur en eau moins forte, lorsque les conditions ambiantes changent, ils gonflent et exercent de fortes pression sur les structures rigides. Ces argiles ont un fort degré de réversibilité; c'es-à-dire qu'elles diminuent de volume par dessèchement et gonflent par réhumidification (Hamilton, 1977).

La reconnaissance des risques de problèmes de gonflement ou de retrait des sols est trés importante dans les premières phases de planification et le choix de type de fondations. On peut utiliser la classification basée sur la fraction d'argile en pourcentage et l'indice de plasticité afin de déterminer le degré probable du risque du mouvement (voir fig. 2.1). Un sol ayant une teneur en argile supérieure à 25% et un indice de plasticité supérieur à 30% présente un grand risque de gonflement ou de retrait. Tout sol ayant une teneur en argile et un indice de plasticité supérieurs à 10% peut subir au moins un léger retrait lorsque les conditions ambiantes changent.

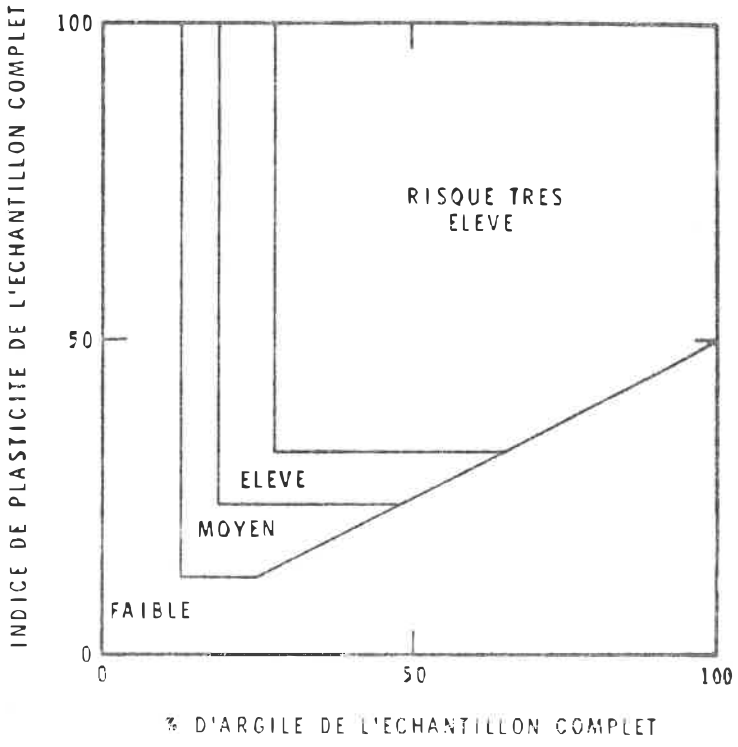


Figure 2.1
Importance des dommages dus au changement de volume des sols argileux (D'aprés Williams, 1958).

D'après Burn (1973) les principales conditions pour que l'affaissement d'un sol devient probable sont:

i) Des conditions du sol telles que des changements de teneur en eau produisent des changements de volume importants,

ii) La présence de certains espèces d'arbres, et

iii) Le climat; lorsque les précipitations sont insuffisantes pour satisfaire la demande en eau des arbres pendant la saison de croissance.

La première condition est associée à la présence des sols fins ou d'argiles qui changent de volume considérablement lorsqu'ils sont soumis à un changement de teneur en eau. Il est bien de mentionner que plusieurs régions urbaines au Canada reposent sur des couches d'argile sujettes aux variations que l'on vient de décrire, mais il reste que les ingénieurs et les entrepreneurs ont à faire face à ces difficultés bien réelles.

Le sous-sol d'une grande partie des prairies du Canada est constitué par une argile dôtée par la double particularité de contraction et de dilatation qui peuvent être causées par une diminution ou un accroissement de la teneur en eau par rapport à la valeur habituelle.

Le sous-sol que l'on retrouve au Québec est une argile connue sous le nom d'argile de la mer Champlain ; elle a été déposée par précipitation dans l'eau de mer lorsqu'à l'époque glaciaire la région fut submergée par une mer connue sous le nom de la Mer Champlain. Son mode de formation a donné lieu à une disposition particulière de minuscules particules du sol; il en a résulté chez celle-ci un pouvoir de contraction très remarquable. Ce phénomène n'est pas entièrement réversible et le sol mouillé à nouveau ne reprend pas son volume initial. Durant le retrait, les particules d'argile ont tendance à se réarranger, elles se raprochent les unes par rapport aux autres et se disposent d'une façon parallèle. A cause de sa faible faculté de gonflement, l'argile n'a pas tendance à revenir à son état initial après réhumidification, mais dans le cas où le cycle de séchage et de réhumidification se répète plusieurs fois, le changement de volume deviendra réversible d'où le gonflement et le retrait des sols argileux en surface deviendront réversibles à cause des cycles de séchage et de réhumidification qu'ils ont subi auparavant. En se basant sur ce raisonnement, on peut dire que l'arrosage fréquent du sol peut réduire le retrait du sol durant les saisons sèches.

La deuxième condition est liée à la présence de la

végétation qui tend à puiser l'humidité du sol en réduisant la teneur en eau du sol. L'herbe par exemple peut aspirer l'humidité du sol d'une profondeur de 2.5 m à un rythme de 1 cm/jour. Les arbres peuvent propager leurs racines à la recherche d'eau à des profondeurs allant jusqu'à 7 m et les racines s'étendent horizontalement jusqu'à des distances supérieures à leurs hauteurs (pour plus de détails voir l'annexe 1). La lutte entre les plantes à enracinement superficiel et les arbres à racines profondes pour épuiser l'humidité dans le même profil tend à accélérer l'épuisement des réserves de l'humidité. La figure (2.2) montre la différence entre les zones affectées par un enracinement superficiel et uniforme (pâturage), un enracinement profond et uniforme (fôret dense) et un enracinement profond et concentré (arbres isolés ou très espacés). En période de sècheresse, les arbres à enracinement profond peuvent causer des mouvements différentiels sévères de l'ordre de plusieurs centimètres durant une seule saison de croissance, et sur de longues périodes, les mouvements différentiels cumulatifs à l'intérieur d'une seule bâtisse peuvent dépasser 30 cm. La figure (2.3) montre que l'implantation d'arbres près des maisons peut causer des dommages structuraux à long terme lorsqu'ils atteindront l'âge de maturité. Ces racines peuvent extraire de l'humidité de l'argile en dessous du niveau des fondations

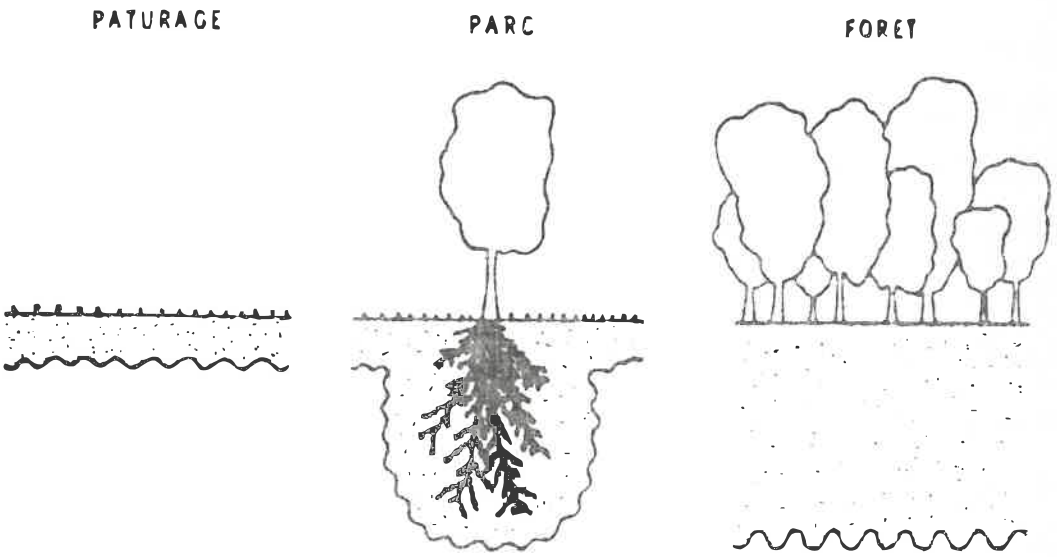


Figure 2.2
Configuration de la zone active pour différents types et densités de végétations sur un dépôt d'argile profond avec nappe sousterraine profonde (D'aprés Hamilton, 1972).

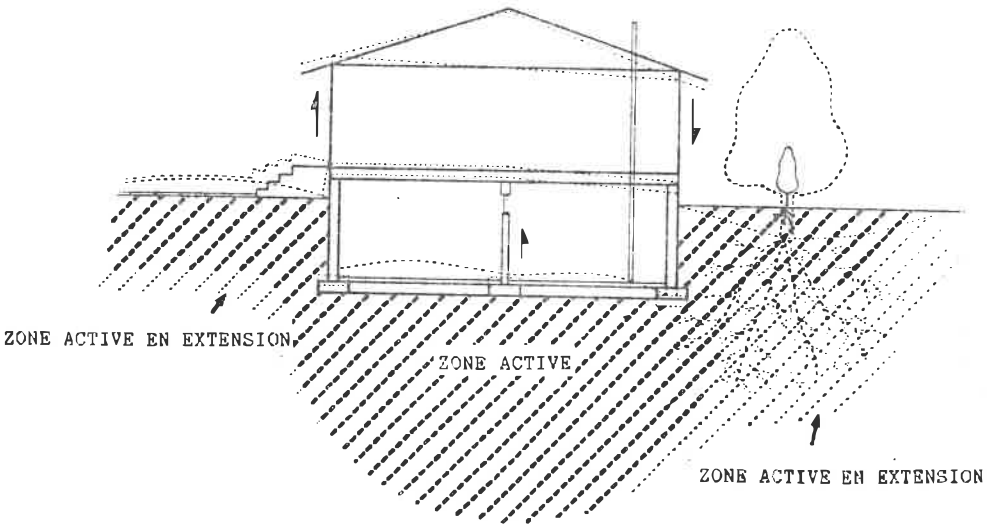


Figure 2.3
Influence à long terme d'un enracinement profond d'arbres sur la performance des fondations superficielles (D'aprés Canadian Geotechnical manual, 1985).

en cas de nécessité et ceci ne peut se traduire que par un affaissement des fondations

Le climat a une grande influence sur la quantité de l'humidité dont la végétation a besoin. Les arbres qui poussent dans une région climatique donnée ont développé un comportement qui peut leur assurer une croissance normale et continue même dans le cas où les précipitations sont insuffisantes, en allant puiser l'eau interstitielle du sol.

2.1.3 Normes et règlements sur la proximité des arbres aux batiments en Grande Bretagne.

Les règlements concernant la proximité des arbres aux bâtiments sont essentiellement basés sur des profondeurs minimales permises des fondations combinées avec des distances entre les arbres et les bâtiments qui sont suffisantes pour empêcher les dégâts. De tels règlements sont peu pratiques et ne sont pas adoptés universellement. Dans une approche, on peut augmenter la profondeur des fondations pour permettre une croissance raisonnable des arbres. En se basant sur le déficit de l'humidité de plusieurs arbres d'essences différentes sur divers types d'argile, Biddle (1983) a démontré que les peupliers produisent des effets beaucoup plus marqués que les autres essences d'arbres examinés. Le type d'argile exerce très peu d'influence sur le déficit de l'humidité mais peut avoir de l'importance à

cause des différences de perméabilité et de retrait possibles. Il n'y a que relativement peu de différences entre les arbres individuels de la même essence, à moins que les conditions du sol ne soient anormales. En conclusion une augmentation légère de la profondeur des fondations (jusqu'à 1.5 m environ) permettrait la plantantion d'arbres de la plupart des essences (à l'exception du peuplier, de l'orme, du chène et du saule) sur des sols susceptibles d'un retrait très élevé. De moindres profondeurs pourraient être adoptées pour des sols à faible potentiel de retrait. Dans ce cas des précautions spéciales ne doivent être prises que pour des essences qui exigent une grande quantité d'eau.

Les premiers règlements concernant la distance sécuritaire entre les arbres et les bâtiments en Grande Bretagne consistent en une séparation égale au moins à la hauteur de l'arbre à son âge de maturité dans le cas d'un arbre isolé et à une distance de 1.5 fois la hauteur de l'arbre mature dans le cas d'un groupe ou d'une rangée d'arbres (Building Research Station, 1949).

Ces règlements ont été ensuite modifiés en vue de tenir compte d'arbres tels les peupliers, ormes et saules qui demandent une plus grande quantité d'eau, en reccomandant une augmentation de la profondeur des fondations, ainsi que

dans le cas des nouvelles constructions où les arbres existants sont plus proches que la distance minimale recommendée (National House-Building Council, 1969).

A la suite de la sècheresse qui a frappé l'Angleterre en 1975-76, le ministère de l'Environnement de Grande Bretagne a fait un compte rendu sur l'état de connaissances courantes et la justesse des reccommandations existantes. Parmi les conclusions tirées on cite (Reynolds,1979):

- la solution du problème par la réglementation seulement de la distance entre l'arbre et le batiment est inapropriée,
- la fondation est le meilleur moyen à travers laquelle on peut réduire les risques des dommages en augmentant la profondeur des fondations,
- il est important de requérir un nombre suffisant d'informations sur les dommages causés par les arbres dans plusieurs endroits et différentes conditions afin de pouvoir en sortir des règlements justifiables.

En pratique, il existe deux solutions pour éviter le problème d'affaissement ou de gonflement des sols; premièrement, on peut estimer le potentiel de gonflement ou de retrait puis essayer d'éviter les évènements qui peuvent

causer une variation de l'humidité du sol, ou descendre les fondations en dessous de la zone de déssication existante ou probable (plus profonde que la zone de croissance des racines). Deuxièmement, on peut accepter que le retrait ou le gonflement peuvent survenir , mais il faut tenir en compte lors de la conception de la structure. La fondation et la superstructure peuvent être calculées de façon à résister aux mouvements du sol.

Ces nouveaux règlements et codes pratiques démontrent une nouvelle philosophie envers la prévention de dommages d'affaissement. Quoique auparavant les règlements conseillaient seulement d'assurer une distance suffisante entre les arbres et les bâtisses et d'utiliser une profondeur minimale des fondations, les nouveaux réglements acceptent la plantation des arbres près des bâtiments à condition de tenir compte de leurs effets.

2.1.4 Mouvement du sol et influences climatiques

a) Ward (1953)

Après quelques séries d'observations portant sur les mouvements du terrain dans trois sites pour différentes conditions du sol, de climat , de végétations et de protection locale, l'auteur a abouti à une relation entre le mou-

vement vertical et l'épuisement de l'humidité du sol. L'auteur a évalué ce dernier facteur par trois différentes méthodes:

i) on mesure la quantité d'eau perdue (en poids) des échantillons de sol avant et après le retrait du sol;

ii) on prend un grand nombre d'échantillons (30 * 30cm) du sol à sa pleine capacité de retention, on les fait sécher dans le four puis on mesure le mouvement vertical correspondant.

iii) on calcule les déficits d'eau dus à la végétation à partir des données climatologiques en utilisant la formule de Penman (1948) et on les relie aux mouvements du sol mesurés sur le site.

La première méthode est valable pour les sols homogènes, tandis que la seconde n'est pas entièrement satisfaisante puisque le sol séché au four ne tasse pas de la même manière que sur le site. La troisième méthode est probablement la façon la plus générale pour estimer le déficit d'eau dans le sol, elle a été prouvée valable pour plusieurs types de climats.

Ward a trouvé que le rapport moyen de retrait (entre l'épuisement de l'humidité du sol et le mouvement vertical correspondant, (SMD/S_{tr}), pour les trois sites investigués

a une valeur de 4. En assumant un minimum de 3 pour (SMD/S_{tr}) cela donne une estimation conservatrice du mouvement du sol. En général le facteur de retrait est supérieur à 3 et dépend du nombre de fissures horizontales et de l'anisotropie de l'argile conduisant à un retrait vertical plus petit qu'horizontal.

b) Bozozuk et Burn (1960)

L'enquête réalisée par Bozozuk et Burn (1960) relativement aux mouvements verticaux du sol près d'une rangée de grands ormes (hauteur de 14 à 18 m), situés à Ottawa a montré que l'amplitude de ces mouvements dépend de la profondeur, de l'éloignement horizontal par rapport aux arbres et des conditions climatiques. Ces auteurs ont calculé l'épuisement de l'humidité du sol par la méthode de Thornthwaite (1948) et ont mesuré en parallèle le mouvement vertical du sol à côté d'une rangée d'ormes. Ils ont constaté qu'il existe une corrrélation raisonnable entre ces deux paramètres (voir figs. 2.4 et 2.5). A partir de ces mêmes résultats, Bozozuk et Burn ont développé un diagramme permettant de déterminer le tassement, pour une profondeur donnée et un rapport calculé comme la distance par rapport à l'arbre sur sa hauteur (voir fig. 2.6). Ce diagramme peut être utilisé pour la conception des fondations reposant sur l'argile de la mer Champlain afin de tenir compte

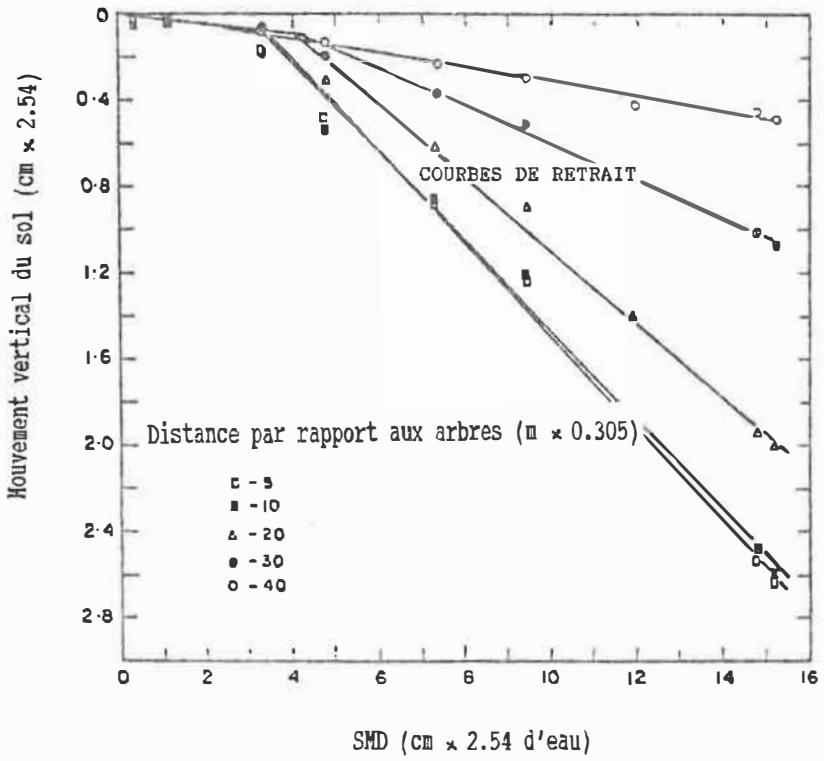


Figure 2.5
Effet de l'épuisement de l'humidité du sol sur le mouvement du sol à différentes distances de la ligne d'ormes et à 60 cm de profondeur (Bozozuk et Burn, 1960).

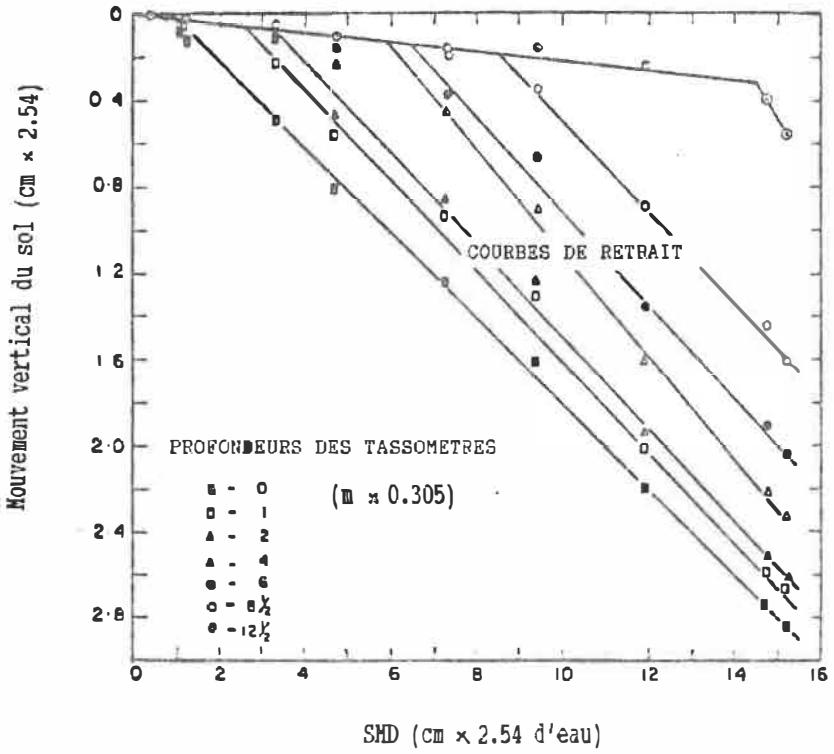
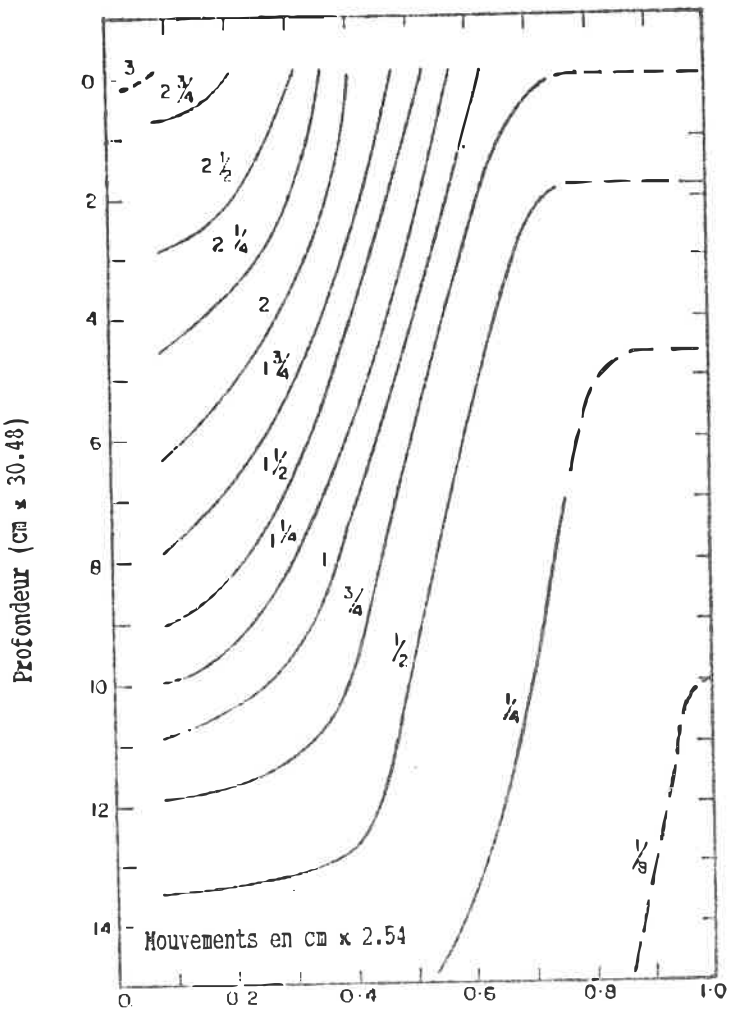


Figure 2.4
Effet de l'épuisement de l'humidité du sol sur le mouvement du sol à différentes profondeurs et à 1.5 m de la ligne d'ormes (Bozozuk et Burn, 1960).



Ratio : $\frac{Da}{h} = \frac{\text{distance par rapport aux arbres}}{\text{hauteur des arbres}}$

CE DIAGRAMME EST BASE DES MESURES PRISES EN 1955 PRES D'UNE RANGEE D'ORMES DE 18m D'HAUTEUR ET POUR UN SMD DE 387 mm.

Figure 2.6
Variation du tassement du sol à différentes distances de la ligne d'ormes dans l'argile Léda (Bozozuk et Burn, 1960)

de la présence d'arbres. Connaissant deux des trois paramètres suivants:

a) profondeur de la fondation,

b) tassement admissible, et

c) distance entre l'arbre et la structure,

il est facile de déterminer le troisième (voir fig. 2.6). Ce diagramme a été établi pour des conditions extrêmes et peut être utilisé lors de la conception des fondations.

Afin de pouvoir calculer le tassement à une distance et profondeur données de l'arbre correspondant à n'importe quel épuisement de l'humidité du sol, des corrélations ont été déduites.

c) Hamilton (1963 et 1966)

Hamilton en collaboration avec la Division des Recherches en Construction a effectué des mesures relatives aux mouvements et aux changements des conditions d'humidité du sol. Ces mesures ont été faites dans des conditions climatiques allant de la sous-humidité à la sous-aridité.

Dans une période allant de 1950 à 1963, Hamilton a calculé l'épuisement de l'humidité du sol cumulative sur une base journalière pour la ville de Winnipeg en utilisant la formule de Thornthwaite (1948) pour estimer l'évapotranspiration potentielle. Puisque dans le calcul

de l'épuisement de l'humidité du sol cumulative on tient compte du déficit d'eau d'une année à une autre, il est donc nécessaire d'assumer un datum à partir duquel le sol couvert de gazon a été rechargé à sa pleine capacité de retention. Après avoir considéré les données météorologiques de plusieurs années, le datum a été pris au debut de printemps de 1950 pendant lequelle une inondation est survenue.

Hamilton a trouvé une relation empirique entre l'épuisement de l'humidité du sol cumulative et la profondeur de la nappe. En effet, il a constaté que 10 cm d'augmentation de l'épuisement de l'humidité du sol cumulative correspond à un abbaissement de la nappe de 30 cm de profondeur.

2.2 Analyses théoriques

Le but du présent chapitre est de décrire et d'appliquer quatre différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration, ainsi que le calcul de l'épuisement de l'humidité du sol pour la région de Montréal pour une période allant de 1930 à 1988, à partir duquel on peut déterminer les périodes de sécheresses durant lesquelles les problèmes d'affaissement des sols des fondations peuvent se produire.

En général, les problèmes de dessèchement où d'affaissement des sols argileux sont en relation avec les variations climatiques saisonnières, notamment les précipitations, l'évapotranspiration et les températures qui toutes influent sur la teneur en eau du sol.

Afin d'avoir une idée sur l'amplitude d'affaissement qui peut être causé par les changements climatiques, il est nécessaire de calculer le déficit d'eau du sol à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les précipitations qui est l'objet d'étude dans ce chapitre, dans lequel on va décrire et appliquer quatre différentes méthodes.

2.2.1 Concepts de l'évapotranspiration et de l'ETP

La vapeur d'eau atmosphérique provient presque exclusivement de processus d'évaporation à la surface de notre planète car les diverses réactions physicochimiques (respiration,combustion...) ne participent que dans une très faible proportion à l'enrichissement en eau de l'atmosphère. Si la plus grande fraction de cette évaporation, soit environ 85%, se situe, en moyenne au niveau des océans une proportion non négligeable, de l'ordre de 15%, se produit au-dessus des surfaces continentales. La végétation tient alors un rôle prépondérant dans le transfert de vapeur d'eau; la plante se comportant comme une mèche entre le sous-sol, réservoir d'eau liquide, et l'atmosphère (Brochet et Gerbier, 1975).

Le terme "évapotranspiration" désigne la quantité de vapeur d'eau rejetée dans l'atmosphère tant par évaporation directe au niveau du sol que par transpiration des organes aériens des plantes. Si la quantité d'eau disponible sous forme d'humidité du sol est suffisante pour que les plantes puissent maintenir le taux de transpiration à un niveau maximal, en d'autre terme si l'eau n'est pas un facteur limitatif de transpiration, alors l'évapotranspiration tend vers l'évapotraspiration maximale appelée, d'après Thorn-

thwaite (1948), l'évapotranspiration potentielle, qui ne dépend que des caractéristique énergétiques et dynamique de l'environnement atmosphérique. En pratique, l'évapotranspiration est exprimée en millimètres ou centimètres de hauteur d'eau.

2.2.2 Méthodes de détermination de l'ETP

La détermination de l'épuisement de l'humidité du sol est basée sur le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) évaluée à partir des données climatologiques. De nombreux auteurs ont cherché à établir des expressions reliant la valeur de l'ETP à une sélection de facteurs climatiques tels que la température, l'humidité, le vent, l'insolation, etc... Certaines formules proposées résultent d'ajustements statistiques et peuvent de ce fait être qualifiées d'empiriques, d'autres, au contraire, procèdent d'un raisonnement physique plus rigoureux assorti de quelques hypothèses logiques.

Dans ce chapitre quatre méthodes de calcul de l'ETP se rattachant à chacune de ces deux catégories seront successivement décrites et appliquées à la région de Montréal pour la période de 1930 à 1988. Parmi ces méthodes, trois sont basées sur des ajustements statistiques: formules de

Thornthwaite (1948), de Blainey et Criddle (1962) et Turc (1961) et une est basée sur le bilan énergétique: c'est formule de Penman (1948).

Malgré l'existence d'un grand nombre de méthodes pour estimer l'ETP, aucune n'est assez générale pour être appliquée dans toutes les circonstances. Ces méthodes peuvent se grouper en trois catégories:

a) directes, basées sur des mesures prises in-situ;
b) analytiques, basées sur le bilan énergétique ou le bilan hydrique;
c) empiriques, basées sur l'analyse statistique des observations.

Méthodes directes

Parmi les méthodes directes, la plus utilisée est celle qui se sert du lysimètre. Cet appareil est un réceptable cylindrique dont le diamètre est d'environ 2 m et la hauteur d'environ 1 m (voir fig. 2.7).

La mesure de l'ETP fait appel au principe du bilan hydrique d'un couvert végétal (Brochet et Gerbier, 1975):

$$\delta H = P_\rho + I_i - E - D + d \qquad (2.1)$$

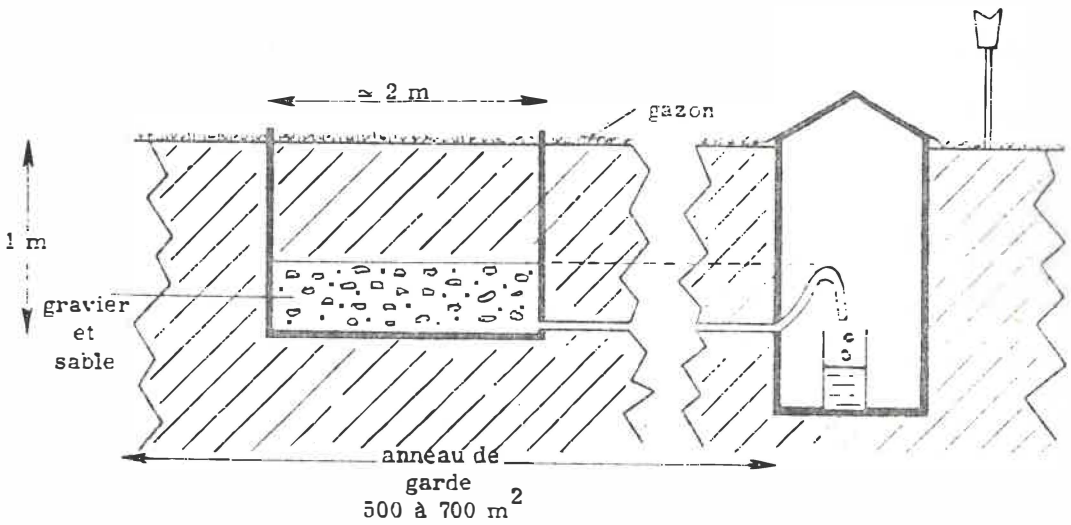


Figure 2.7
Evapotranspiromètre ou lysimètre
(D'après Brochet et Gerbier, 1975)

Dans laquelle

δH : La variation d'humidité du sol prospecté par les racines.

P_p : Les apports d'eau dus aux précipitations.

I_i : Les apports d'eau complémentaires (irrigation).

E : Les pertes par évaporation superficielle.

D : Les retraits d'eau liquide par percolation en horizons profonds.

d : Les échanges latéraux d'eau dans le sol.

L'isolement latéral d'un certain volume dans le sol élimine le terme "d". D'autre part, en maintenant l'humidité du sol à sa capacité de champ, c'est à dire en assurant une percolation permanente, tout en évitant de le saturer, δH devient nul. L'expression (2.1) prendra la forme suivante:

$$E = P_p + I_i - D \qquad (2.2)$$

C'est à dire qu'avec un contrôle rigoureux des apports d'eau (mesures des pluits P et irrigations I) et du drainage D, on évalue indirectement l'évapotranspiration maximale d'une surface déterminée. Si de plus, on maintient une couverture végétale suffisament fournie et que l'on élimine les effet d'oasis grâce à un environnement végétal

homogène et assez étendu, on peut espérer d'obtenir une estimation satisfaisante de l'évapotranspiration potentielle. L'expérience montre que ces impératifs sont assez sévères et qu'il s'avère difficile d'y satisfaire en permanence (Brochet et Gerbier, 1975).

Méthodes analytiques

Parmi les méthodes analytiques, les principales font appel au bilan énergétique ou hydrique d'une région; d'autres sont basées sur les théories de transfert turbulent. Certaines combinaisons des méthodes de bilan énergétique et de transfert turbulent ont conduit au développement de méthodes mixtes (Penman, 1948).

a) Méthode de PENMAN

Sur la base de recherches effectuées en majeure partie en Angleterre, Penman évalue le volume des échanges d'eau entre une surface évaporante et l'atmosphère par le biais du "bilan énergétique". Ce dernier met en jeu les échanges de chaleur par rayonnement, conduction, convection entre la surface évaporante et son environnement (air ou sol) ainsi que les chaleurs latentes de changement d'état de l'eau.

Penman a abouti à une formule complexe de détermination de l'évaporation d'eau d'une surface libre, qui dépend de plusieurs facteurs climatiques tels que la température, la durée d'insolation, l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent.

Afin de calculer l'ETP, Penman a proposé une méthode empirique; celle-ci consiste à appliquer un coéfficient empirique f à sa formule de l'évaporation d'une nappe d'eau libre. Ce coéfficient varie le long de l'année et a pour valeur:

Hiver (Novembre à Février)	0.6
Printemps et Automne	
(Mars à Avril et Septembre à Octobre)	0.7
Eté (Mai à aout)	0.8

Les trois formules suivantes ont été utilisées par Penman pour l'estimation de l'évapotranspiration.

1) La formule du bilan énergétique:

$$H_G = A - B \qquad (2.3)$$

$$A = I_o\ (1 - a)\ (0.18 + 0.55\ h_p/H) \qquad (2.4)$$

$$B = \sigma T_K^4\ (0.56 - 0.092 e_t)\ (0.10 + 0.90\ h_p/H) \qquad (2.5)$$

2) La formule du pouvoir évaporant de l'air:

$$E_a = 0.35\ (e_w - e_t)\ (1 + 0.0098\ u) \qquad (2.6)$$

3) L'évapotranspiration potentielle journalière:

$$ETP = \frac{H + 0.27\ E_a}{\Delta + 0.27} * f \qquad (2.7)$$

où

H_G : Bilan thermique en mm d'eau/jour.

I_o : Radiation solaire directe en absence de l'atmosphère en mm d'eau/jour (voir tableau 2.1).

a : Albedo de la surface évaporante (a= 0.05 pour une nappe libre).

h_p : Durée d'insolation effective en heures.

H : Durée maximale possible d'insolation en heures (voir tableau 2.2).

σ : Constante de STEFAN-BOLTZMAN: 2.017 X 10^{-9} mm d'eau/jour

e_w : Pression saturante de vapeur d'eau (mm.Hg) à la température absolue T_k ; e_w est donnée par la formule suivante:

$$\log e_w = (17.443 - \frac{2795}{T_k} - 3.868\ \log_{10} T_k) \times 759.97 \qquad (2.8)$$

T_k : température absolue en °K.

e_t : Pression de la vapeur d'eau dans l'air à la température T_k.

$$e_t = e_w . HR \qquad (2.9)$$

f : Coéfficient empirique saisonnier.

Δ : Pente de la courbe température vs pression de la saturation

u : Vitesse du vent moyenne mensuelle équivalente (miles/jour).

	Hémisphère nord							Hémisphère sud						
	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
Jan	--	1.3	3.6	6.0	8.5	10.8	12.8	14.5	15.8	16.8	17.3	17.3	17.1	16.6	16.5
Fév	1.1	3.5	5.9	8.3	10.5	12.3	13.9	15.0	15.7	16.0	15.8	15.2	14.1	12.7	11.2
Mars	4.3	6.8	9.1	11.0	12.7	13.9	14.8	15.2	15.1	14.6	13.6	12.2	10.5	8.4	6.1
Avril	9.1	11.1	12.7	13.9	14.8	15.2	15.2	14.7	13.8	12.5	10.8	8.8	6.6	4.3	1.9
Mai	13.6	14.6	15.4	15.9	16.0	15.7	15.0	13.9	12.4	10.7	8.7	6.4	4.1	1.9	0.1
Juin	17.0	16.5	16.7	16.7	16.5	15.8	14.8	13.4	11.6	9.6	7.4	5.1	2.8	0.8	--
Juil	15.8	15.7	16.1	16.3	16.2	15.7	14.8	13.5	11.9	10.0	7.8	5.6	3.3	1.2	--
Août	11.4	12.7	13.9	14.8	15.3	15.3	15.0	14.2	13.0	11.5	9.6	7.5	5.2	2.9	0.8
Sept	6.8	8.5	10.5	12.2	13.5	14.4	14.9	14.9	14.4	13.5	12.1	10.5	8.5	6.2	3.8
Oct.	2.4	4.7	7.1	9.3	11.3	12.9	14.1	15.0	15.3	15.3	14.8	13.0	12.5	10.7	8.8
Nov.	0.1	1.9	4.3	6.7	9.1	11.2	13.1	14.6	15.7	16.4	16.7	16.5	16.0	15.2	14.5
Déc.	--	0.9	3.0	5.5	7.9	10.3	12.4	14.3	15.8	16.9	17.6	17.8	17.8	17.5	16.1

Tableau (2.1) Radiation solaire directe en absence de l'atmosphère (I_o) en mm d'eau/jour

Les étapes de calcul de l'ETP par la méthode de Penman sont résumées comme suit:

a) Déterminer la durée maximale possible d'insolation H (heures) et la durée d'insolation effective h (heures) données respectivement par le tableau (2.2) en fonction de la latitude et par la station météorologique.

b) Déterminer la radiation solaire directe en absence de l'atmosphère I_o (mm d'eau/jour) en fonction de la latitude d'après le tableau (2.1).

c) Calculer les valeurs moyennes mensuelles de température de l'air T (°C), l'humidité relative HR (%) et la vitesse du vent v (km/jour) (Ces trois grandeurs sont généralement données par les stations météorologiques).

d) Déterminer la vitesse moyenne mensuelle du vent u (milles/jour) équivalente à une vitesse mesurée à une hauteur de 2 m au dessus du sol par l'expression (2.10).

$$u = v.\log(6.6)/\log(hm) \qquad (2.10)$$

où hm: hauteur de mesure de la vitesse du vent (pieds)

Latitude Nord	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
Janvier (31)	12,10	11,62	11,09	10,45	9,71	8,58	6,78	
Février (28 1/4)	12,10	11,80	11,49	11,09	10,64	10,07	9,11	
Mars (31)	12,10	12,08	12,04	12,00	11,96	11,90	11,81	
Avril (30)	12,10	12,35	12,60	12,90	13,26	13,77	14,61	16,3
Mai (31)	12,10	12,59	13,11	13,71	14,39	15,46	17,18	21,8
Juin (30)	12,10	12,70	13,33	14,07	14,96	16,33	18,73	24
Juillet (31)	12,10	12,64	13,24	13,85	14,68	15,86	17,97	24
Août (31)	12,10	12,44	12,80	13,21	13,72	14,49	15,58	18,5
Septembre (30)	12,10	12,18	12,26	12,36	12,46	12,63	12,89	13,7
Octobre (31)	12,10	11,90	11,70	11,45	11,15	10,77	10,14	
Novembre (30)	12,10	11,69	11,19	10,67	10,00	9,08	7,58	
Décembre (31)	12,10	11,51	10,91	10,23	9,39	8,15	6,30	

Latitude Sud	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	
Janvier (31)	12,10	12,64	13,24	13,84	14,64	15,82	17,87	
Février (28 1/4)	12,10	12,39	12,73	13,13	13,62	14,31	15,38	
Mars (31)	12,10	12,16	12,22	12,26	12,34	12,46	12,64	
Avril (30)	12,10	11,90	11,63	11,33	11,03	10,62	9,91	
Mai (31)	12,10	11,68	11,18	10,62	9,95	9,00	7,44	
Juin (30)	12,10	11,51	10,91	10,25	9,38	8,15	6,01	
Juillet (31)	12,10	11,60	11,06	10,40	9,64	8,50	6,63	
Août (31)	12,10	11,80	11,47	11,07	10,56	9,92	8,88	
Septembre (30)	12,10	12,06	11,99	11,91	11,83	11,74	11,55	
Octobre (31)	12,10	12,30	12,53	12,83	13,14	13,57	14,33	
Novembre (30)	12,10	12,57	13,07	13,64	14,32	15,34	17,01	
Décembre (31)	12,10	12,70	13,30	14,06	14,94	16,28	18,70	

Tableau (2.2) Durée maximale possible d'insolation H (heure)

e) Calculer A à partir de l'équation (2.4).

f) Déterminer e_w ($mm.H_g$) en fonction de la température moyenne mensuelle absolue T_k de l'air d'après l'expression (2.8).

g) Déterminer e_t d'après l'expression (2.10).

h) Calculer B à partir de l'expression (2.5).

i) Déterminer le bilan thermique H_G (mm d'eau/jour) à partir de l'expression (2.3).

j) Déterminer le pouvoir évaporant de l'air E_a (mm d'eau/jour) en utilisant l'équation (2.6).

k) Déterminer la pente de la courbe température - pression saturante de vapeur d'eau correspondante à la température moyenne mensuelle absolue T_k, en utilisant la figure (2.8).

l) Evaluer ETP journalière (mm d'eau/jour) d'après la formule (2.7) (multiplier par le nombre de jour correspondant au mois considéré pour obtenir ETP mensuelle en mm d'eau/mois).

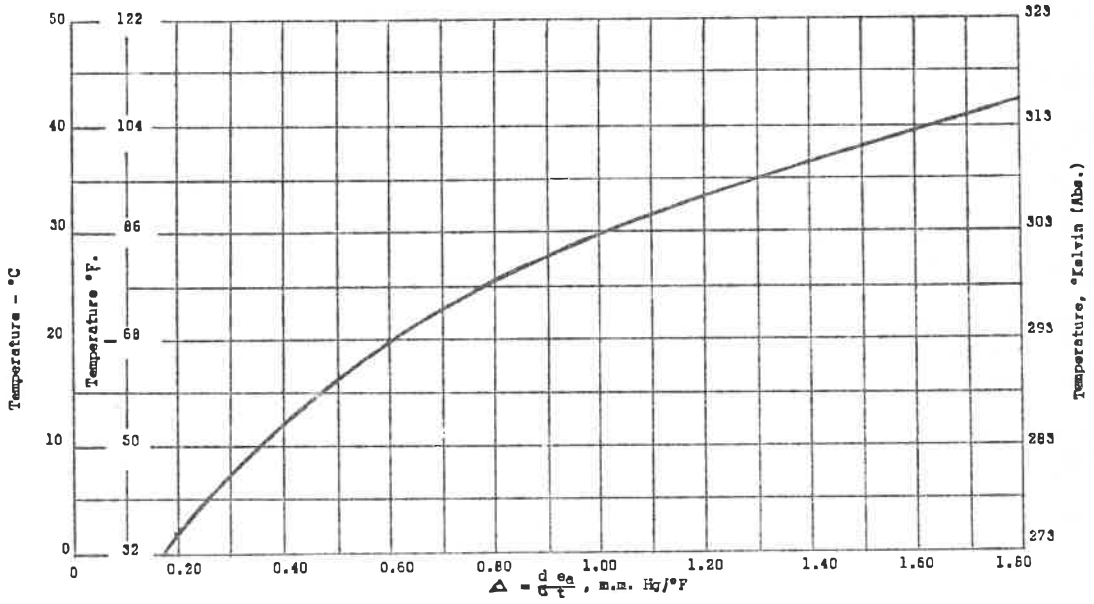


Figure 2.8
Pente de la courbe e_w vs température

Méthodes empiriques

Plusieurs formules d'estimation de l'ETP ont été développées sur la base d'ajustements statistiques. Ces méthodes purement empiriques permettent d'obtenir des estimations à l'aide de facteurs météorologiques facilement mesurables. De façon générale, il est peu recommendé d'appliquer ces formules à des endroits autres que ceux pour lesquels ont été développées. Néanmoins elles sont utiles pour obtenir une évaluation grossière de valeurs d'évapotranspiration, dans les régions où aucune mesure directe n'a été effectuée. Dans la présente étude, on appliquera quelques-unes des formules empiriques les plus courantes, à savoir celles développées par Blainey et Criddle (1962), Thornthwaite (1948) et Turc (1961).

a) Méthode de THORNTHWAITE

Thornthwaite (1948) est l'un des premiers chercheurs qui dégagea les notions d'évapotranspiration et d'évapotranspiration potentielle (ETP) correspondant à une alimentation hydrique optimale des végétaux. Ce chercheur a tenté de relier cette ETP à des paramètres facilement accessibles: la température moyenne de l'air (donnée atmosphérique) et la durée théorique de l'insolation

(donnée astronomique, fonction de la saison et de la latitude).

Par ajustement statistique des mesures expérimentales d'ETP obtenues sur cases lysimétriques aux données climatologiques de température, THORNTHWAITE aboutit à une relation empirique reliant essentiellement la température moyenne mensuelle de l'air à l'ETP.

$$ETP_{nc} = 16 * \left[\frac{10T^2}{I} \right]^{a_1} \quad \text{(mm/mois)} \qquad (2.11)$$

Etant donné que le nombre de jour dans un mois varie de 28 à 31 (une variation de 11% approximativement) et le nombre d'heure de clarté (quand l'évapotranspiration prend place) varie avec la saison et la latitude, il est nécessaire de corriger la valeur de l'évapotranspiration donnée par la formule (2.11) en la multipliant par un facteur de correction qui dépend du mois et de la latitude (voir tableau 2.3). Donc l'expression finale de calcul de l'évapotranspiration potentielle devient:

$$ETP = ETP_{nc} . F_c \quad \text{(mm/mois)} \qquad (2.12)$$

N	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.12	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
26	0.92	0.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
27	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	0.99	0.90	0.90
28	0.91	0.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	0.98	0.90	0.90
29	0.91	0.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	0.98	0.90	0.89
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
31	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
32	0.89	0.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	0.98	0.88	0.87
33	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86
34	0.88	0.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	0.97	0.87	0.86
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
36	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84
37	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.97	0.85	0.83
38	0.85	0.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83
39	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
41	0.83	0.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	0.96	0.82	0.80
42	0.82	0.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	0.95	0.82	0.79
43	0.81	0.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	0.95	0.81	0.77
44	0.81	0.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	0.95	0.80	0.76
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
46	0.79	0.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	0.94	0.79	0.74
47	0.77	0.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	0.93	0.78	0.73
48	0.76	0.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	0.93	0.77	0.72
49	0.75	0.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	0.93	0.76	0.71
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70
S												
5	1.06	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	0.92	0.85	0.76	0.82	0.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	0.92	0.83	0.74	0.81	0.91	0.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	0.91	0.82	0.72	0.79	0.90	0.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	0.90	0.80	0.70	0.76	0.89	0.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41

Tableau (2.3) **Facteur de correction de l'ETP calculée par la formule de Thornthwaite**

où

T : Température moyenne mensuelle en °C.

ETP_{nc} : Evapotranspiration potentielle pour un mois théorique de 30 jours et une durée théorique d'éclairement de 12 heures sur 24, en mm.

I : Indice thermique pour les 12 mois de l'année.

a_I : Coéfficient qui est fonction de l'indice thermique annuel mais qui est constant sous un climat et lieu donnés. La valeur de "a" est faible dans les régions froides et grande dans les régions chaudes.

F_c : Facteur de correction dépend du mois et de la latitude donnée par le tableau (2.3).

L'utilisation de la méthode de Thornthwaite se résume comme suit:

a) Calculer la température moyenne mensuelle pour chaque mois de l'année, T (en degrés celcius).

b) Calculer l'indice thermique mensuel d'après l'expression (2.13).

$$i = \frac{T^{1.514}}{5} \qquad (2.13)$$

c) Calculer l'indice thermique annuel, $I = \Sigma i$ pour les 12 mois; I varie de 0 à 160.

d) Calculer a_l d'après l'expression (2.14).

$$a_l = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49239 \qquad (2.14)$$

a_l varie entre 0 et 4.25

e) Calculer ETP pour le mois considéré d'après la formule (2.12).

b) Méthode de Blainey et Criddle

La consommation d'eau des végétaux varie avec plusieurs facteurs naturels dont les plus importants sont le climat, l'eau disponible, le sol et la topographie. Parmi les facteurs climatiques, ceux qui ont le plus d'effet sur la consommation de l'eau, et dont les mesures sont disponibles en général, sont la température, la précipitation,

l'humidité, le parcours du vent et la saison de croissance. Blainey et Criddle (1952) ont développé une formule donnant la consommation de l'eau par les végétaux en fonction de la température, la longueur de la saison de croissance et la longueur mensuelle maximale du jour exprimée en pourcentage par rapport à l'année.

Ces chercheurs ont proposé, à la suite de nombreux essais effectués depuis 1931 en zone aride et semi-aride, une formule assez utilisée en pratique: le «pouvoir évaporant» de l'atmosphère est considéré comme proportionnel au produit d'un facteur de température moyenne mensuelle par le pourcentage P d'heures de jour durant la période considérée, exprimé en % du nombre d'heures de jour de l'année.

Basée sur des mesures effectuées au nouveau Mexique et au Texas, leur formule a l'expression suivante:

$$ETP = KF \qquad (2.15)$$

K : coéfficient empirique saisonnier;

F : facteur mensuel;

$F = (8.13 + 0.46T)*p/100$

T : est la température moyenne du mois en C;

p : est le nombre d'heure de jour du mois, exprimé

en % du nombre d'heures de jour de l'année (voir tableau 2.4).

L'évaluation du coefficient K cause quelques difficultés, parce que la détermination du K montre des variations importantes. Les mesures sont d'ailleurs difficiles à effectuer et sont sujettes à bien des erreurs, lors des études par différents chercheurs. Dans des diverses études, non seulement le climat varie mais aussi les sols, les réserves utiles d'eau, les méthodes de mesure de la consommation d'eau, les rendements des cultures et bien d'autres facteurs influançant l'évapotranspiration. Cependant d'après Blaney & Criddle, ce coefficient varie de 0.50 à 1.10 suivant les cultures et la saison de croissance.

Pour la fin de cette étude, nous avons calculé les facteurs mensuels (F) pour chacun des mois dont la température moyenne est au dessus de 0 degrés C. Puisque le coefficient K varie avec la végétation, il est impossible de fixer une valeur d'évapotranspiration. Comme une grande partie du territoire du Québec est recouverte de forêts mixtes, nous avons utilisé le coéfficient 0.7 suggéré par Blaney et Criddle pour calculer l'ETP convenant à ces forêts du Québec.

Mois	Latitudes en Degré (nord de l'équateur)										
	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
Janvier	7.30	7.20	7.10	6.99	6.87	6.76	6.62	6.49	6.35	6.17	5.98
Février	7.03	6.97	6.91	6.86	6.79	6.73	6.65	6.58	6.50	6.42	6.32
Mars	8.38	8.37	8.36	8.35	8.34	8.33	8.31	8.30	8.29	8.27	8.25
Avril	8.72	8.75	8.80	8.85	8.90	8.95	9.00	9.05	9.12	9.18	9.25
Mai	9.53	9.63	9.72	9.81	9.92	10.02	10.14	10.26	10.39	10.53	10.69
Juin	9.49	9.60	9.70	9.83	9.95	10.08	10.21	10.36	10.54	10.71	10.93
Juillet	9.67	9.77	9.88	9.99	10.10	10.22	10.35	10.49	10.64	10.80	10.99
Août	9.22	9.28	9.33	9.40	9.47	9.54	9.62	9.70	9.79	9.89	10.00
Septembre	8.34	8.34	8.36	8.36	8.38	8.38	8.40	8.41	8.42	8.44	8.44
Octobre	7.99	7.93	7.90	7.85	7.80	7.75	7.70	7.63	7.58	7.51	7.43
Novembre	7.19	7.11	7.02	6.92	6.82	6.72	6.62	6.49	6.36	6.22	6.07
Décembre	7.14	7.05	6.92	6.79	6.66	6.52	6.38	6.22	6.04	5.86	5.65
Annuel	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tableau (2.4) Le pourcentage mensuel d'heures du jour de l'année pour les latitudes 28° à 50° nord.

L'utilisation de la méthode de Blainey et Criddle est résumée comme suit:

1) Déterminer la température moyenne mensuelle T (°C).

2) Déterminer le pourcentage mensuelle du jour dans l'année P(%) en fonction de la latitude (voir tableau 2.4).

3) Calculer pour chaque mois de l'année l'ETP d'après la formule (2.15).

c) Méthode de Turc

Turc (1961) a établi sa formule à partir d'essais lysimétriques en France, en Ecosse, en Afrique du nord et aux Indes.

En 1962, il a proposé des formules simplifiées, pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle, qui s'apparentent à celle de Penman en ce sens qu'elles évaluent l'évapotranspiration en fonction de la température et l'intensité du rayonnement.

1°) Si l'humidité relative moyenne est supérieure à 50% (cas habituel en régions tempérées exemple: ville de

Montréal) l'ETP est donnée par la formule suivante:

$$ETP = 0.4\ (I_g + 50)\ \frac{T}{T + 15} \qquad (2.16)$$

dans laquelle

ETP en mm/mois,

I_g radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale; elle est exprimée en calories par cm2 par jour.

T est la température moyenne mensuelle en °C du mois considéré (pour T ≤ 0°C l'ETP est pris égale à zéro).

NB: Le coefficient 0.4 dans la formule (2.16) est valable pour les mois de 30 et 31 jours; pour le mois de février on remplacera 0.4 par 0.37.

La radiation solaire globale I_g n'est mesurée qu'en un petit nombre de stations; faute de mieux, on devra souvent l'évaluer à partir de la radiation maximale théorique I_o, calculée d'après les données astronomiques, en supposant l'atmosphère parfaitement transparente et d'après le rapport h_p /H de la durée d'insolation h sur la durée du jour astronomique H.

$$Ig = I_o(0.18 + 0.62 \frac{h_p}{H}) \qquad (2.17)$$

dans laquelle

I_o radiation maximale (voir le tableau 2.5) dépendant que de la latitude en $Cal/cm^2/jour$,

H durée du jour astronomique en heures (voir tableau 2.2).

2°) Si l'humidité relative moyenne mensuelle de l'air pendant le mois considéré est inférieure à 50% on multiplie l'ETP calculée plus haut par un coefficient correctif suivant:

$$C_{OEF} = 1 + \frac{50 - HR}{70} \qquad (2.18)$$

où HR est l'humidité relative moyenne mensuelle en (%).

L'utilisation de la méthode de Turc est résumée comme suit:

a) Déterminer les valeurs moyennes mensuelles de la température de l'air T (°C) et l'humidité relative HR (%) pour chaque mois de l'année.

Latitude Nord	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Janvier	858	759	642	508	364	222	87.5	5	0
Février	888	821	732	624	495	360	215	82	2,9
Mars	890	873	834	764	673	562	432	289	146
Avril	862	894	902	880	833	764	676	577	508
Mai	816	885	930	950	944	920	880	860	889
Juin	790	873	934	972	985	983	970	992	1 042
Juillet	804	879	930	955	958	938	908	905	945
Août	833	880	902	891	858	800	728	651	610
Septembre	875	872	843	788	710	607	487	341	215
Octobre	880	830	755	658	536	404	252	119	17,5
Novembre	860	767	656	528	390	246	111	17	0
Décembre	842	735	610	469	323	180	55,5	0	0

Latitude Sud	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°		
Janvier	858	893	986	1 009	1 010	990	961		
Février	888	888	937	923	887	820	738		
Mars	890	872	845	783	697	590	466		
Avril	862	820	726	629	507	376	235		
Mai	816	754	616	495	364	226	96		
Juin	790	724	571	439	303	167	49,5		
Juillet	804	748	597	473	338	205	78,5		
Août	833	804	691	586	460	330	189		
Septembre	875	871	808	734	639	527	397		
Octobre	880	896	905	880	830	753	657		
Novembre	860	900	971	987	977	949	905		
Décembre	842	891	992	1 031	1 045	1 040	1 025		

Tableau (2.5) Radiation maximale I_o (cal/cm²/jour)

b) Déterminer la durée maximale possible d'insolation H (heures) en fonction de la latitude (voir tableau 2.2) et la durée d'insolation effective h (heures) (donnée par la station météorologique).

c) Déterminer la radiation maximale I_o (Cal/cm^2/jour) en fonction de la latitude (voir tableau 2.5).

d) Calculer la radiation solaire globale du mois considéré I_g (Cal/cm^2/jour) d'après la formule (2.17).

e) Calculer ETP du mois considéré d'après la formule (2.16) dans laquelle le coéfficient 0.4 est remplacé par 0.37 pour le mois de février.

En pratique, le terme correctif ci-dessus n'intervient que dans le cas de climats désertiques ou subdésertiques.

2.2.3 Epuisement de l'humidité du sol

La ville de Montréal est située dans une zone tempérée entre les latitudes 45° et 46° Nord. La température moyenne annuelle se situe autour de 6°C. La température moyenne de janvier, mois le plus froid de l'année, varie entre -10°C et -19°C, tandis que pour juillet, le mois le

plus chaud, les températures varient entre 16° et 21°C.

La précipitation totale annuelle enrégistrée pour la période de 1930 à 1988 varie entre 800 et 1200 mm avec une moyenne de 960 mm d'eau (voir fig. 2.9).

La variation de l'humidité du sol (SMC) est défini comme étant la différence entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les précipitations (P):

$$SMC = ETP - P \qquad (2.19)$$

Il est important de noter que les excédents de précipitations du mois considéré sont perdus par ruissellement, infiltration, drainage, etc... et ne viennent donc compenser le déficit du mois suivant que dans le cas où un épuisement de l'humidité du sol existe.

L'épuisement de l'humidité du sol (SMD) pour le mois i est calculé par la formule suivante:

$$SMD_i = SMD_{i-1} + SMC_i \qquad (2.20)$$

où

SMD_i : L'épuisement de l'humidité du sol du mois considéré (mm d'eau);

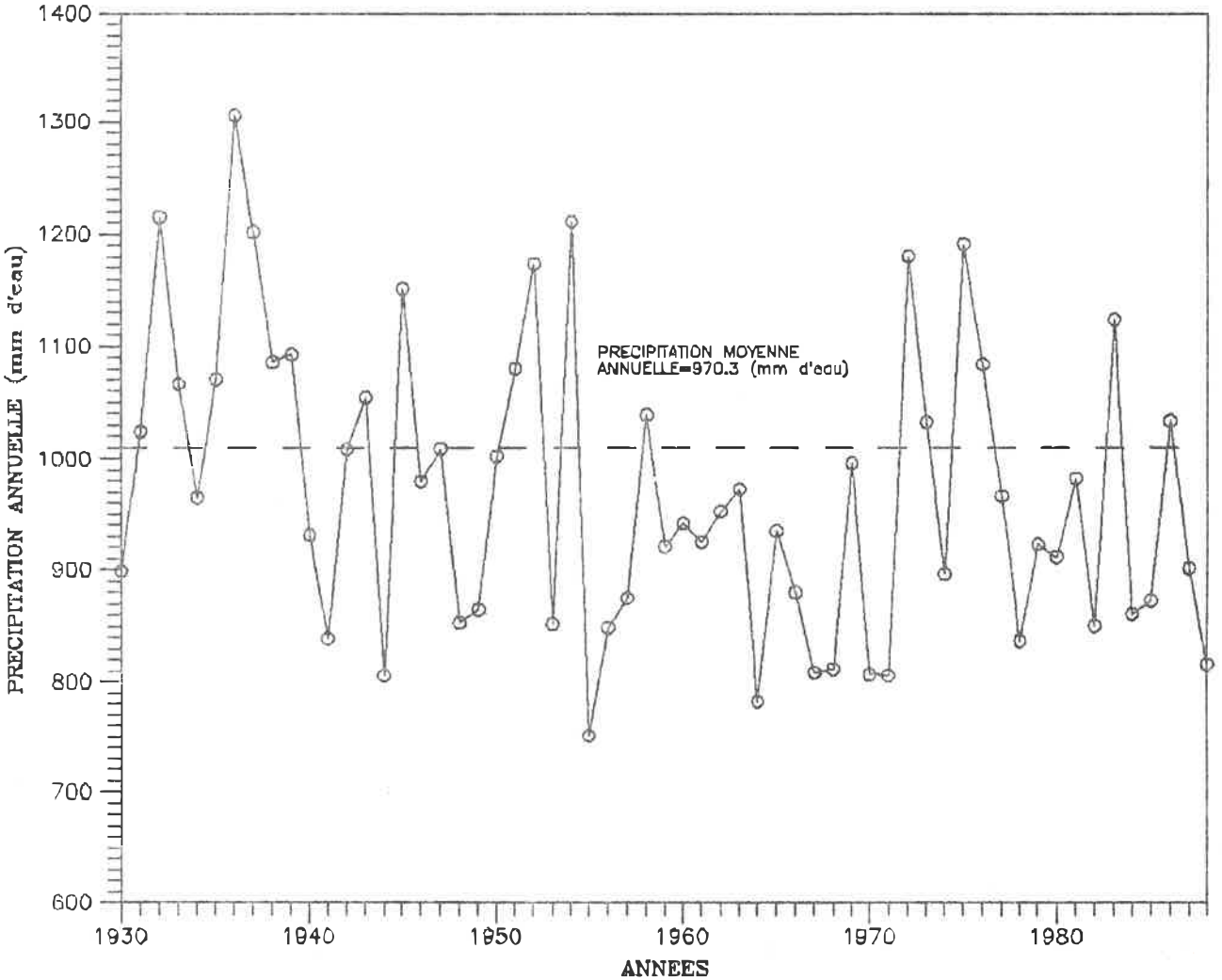


Figure 2.9
Précipitation annuelle et moyenne annuelle (1930–1988)

SMD_{i-1} : L'épuisement de l'humidité du sol du mois précédent (mm d'eau);

SMC_i : La variation de l'humidité du sol du mois considéré (mm d'eau).

NB: S'il y a un surplus d'eau c'est à dire quand la valeur SMCi est négative et celle de SMDi-1 est égale à zéro, celle de SMDi sera pris égal à zéro.

A Montréal, le sol se recharge complètement chaque printemps après la fonte de la neige et le dégel du sol. Donc dans le calcul du déficit d'une année, nous ne tenons pas compte le déficit de l'année précédente.

La figure (2.10) montre qu'à Montréal la valeur moyenne de l'épuisement de l'humidité du sol de 1930 à 1988 atteint un maximum de 130 mm/mois. Les études faites par Bozozuk et Burn (1960) montrent qu'au delà de 180 mm d'épuisement, des problèmes d'affaissement et de retrait commencent à apparaître au-dessous du niveau de fondations superficielles (≈ 1.8 m). Nous avons illustré aussi sur la même figure l'année la plus sèche de 1955 dont l'épuisement a atteint 264 mm en septembre et l'année la plus humide de 1972 dont l'épuisement n'a pas excédé 20 mm.

Même si la quantité annuelle des précipitations dépasse

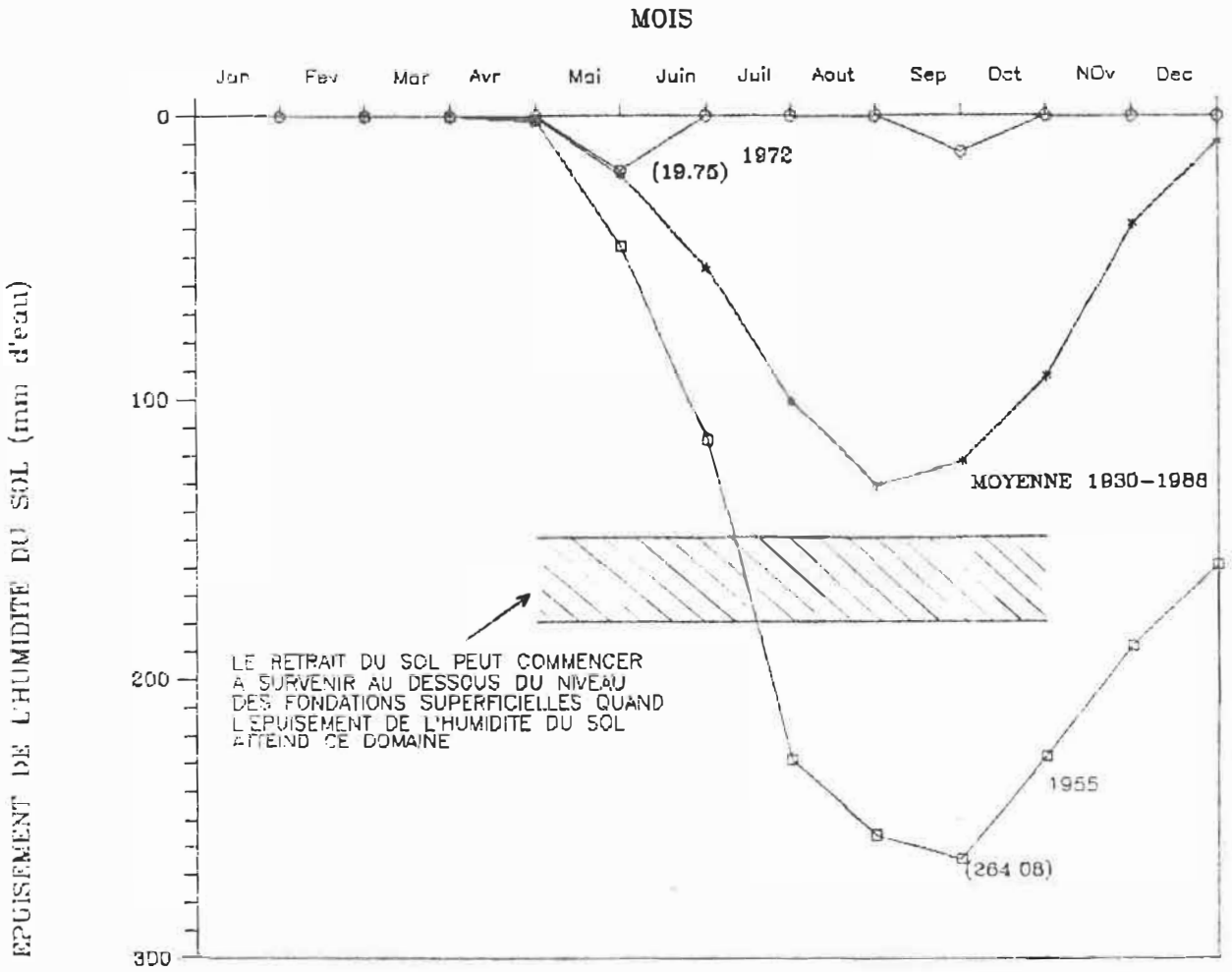


Figure 2.10
Conditions de l'humidité du sol moyenne et extrêmes (1955 et 1972) pour la période allant de 1930 à 1988 (l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite)

celle de l'évapotranspiration, un déficit d'eau dans le sol peut survenir puisque les précipitations et l'ETP sont dues à des différentes causes météorologiques d'où elles n'ont pas la même distribution en quantité durant l'année.

Les résultats de calcul de l'épuisement de l'humidité du sol montrent que la région de Montréal a été l'objet de plusieurs saisons de sécheresse. Parmi ces saisons on cite celle de 1941, 42, 46, 48, 49, 53, 55, 59, 60, 64, 65, 68, 70, 71, 78, 79, 82, 83 et 88 ayant un épuisement supérieur à 180 mm dans les quatre méthodes (voir annexe 2). Récemment en 1983, l'épuisement de l'humidité atteignait 254 mm d'eau et des problèmes d'affaissement de fondations sont survenus.

On constate aussi que dans la période de 1930 à 1988, l'épuisement de l'humidité du sol (SMD) peut dépasser le seuil de 180 mm (la valeur au-delà de laquelle, un affaissement peut survenir au-dessous du niveau des fondations superficielles). Cette valeur peut être dépassée une fois chaque trois ans et elle est atteinte généralement aux mois de juillet ou aout. A Montréal, l'épuisement de l'humidité du sol moyenne à long terme est de 130 mm et elle est atteinte une fois chaque deux années au mois de juillet ou aout.

2.3.4 Résultats des analyses théoriques

La majorité des paramètres météorologiques utilisés dans le calcul de l'épuisement de l'eau du sol tels que la température, la précipitation, l'humidité relative, la vitesse du vent, et l'insolation ont été tirés du sommaire météorologique mensuel et annuel du service climatologique de l'Environnement Canada pour Montréal.

A côté des apports naturels que représentent les précipitations et que l'on sait mesurer avec une précision suffisante, un autre élément capital intervenant dans le calcul de l'épuisement de l'humidité du sol qui est la capacité d'absorption de l'atmosphère qui est représenté l'évapotranspiration potentielle qu'il convient d'estimer. La mesure de ce paramètre se révèle délicate car elle met en oeuvre un matériel biologique, la surface évaporante, qu'il est difficile de maintenir dans un état physiologique comparable tout au long de la durée de mesure et dans de sites très divers du point de vue géographique et climatique. Aussi, dans la majorité des cas, on est amener à substituer à cette mesure, une évaluation de l'ETP basée sur un calcul approché.

Une série de diagrammes (figs. 2.11 à 2.15) montre, les

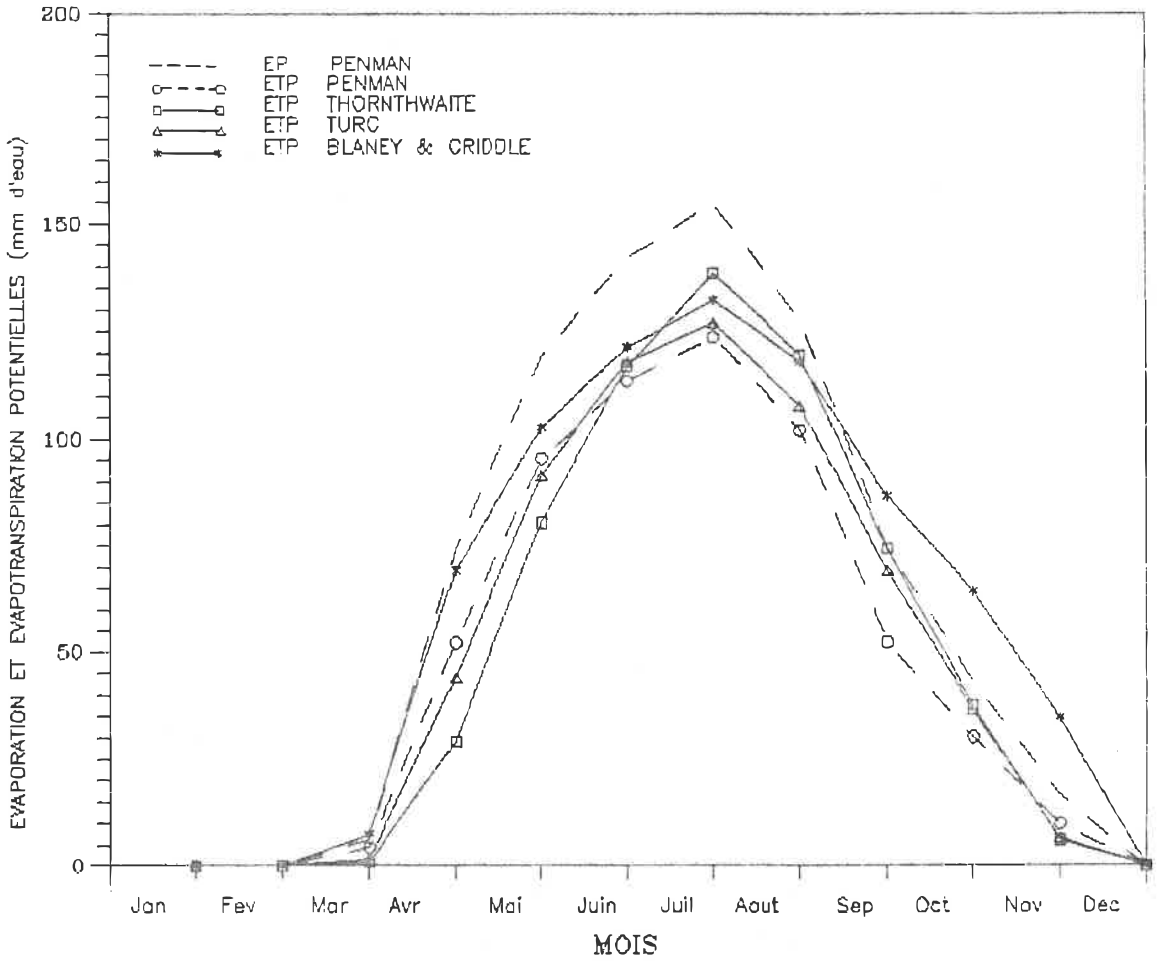


Figure 2.11
Distributions moyennes mensuelles de l'ETP et l'EP calculées par différentes méthodes (1930-1988)

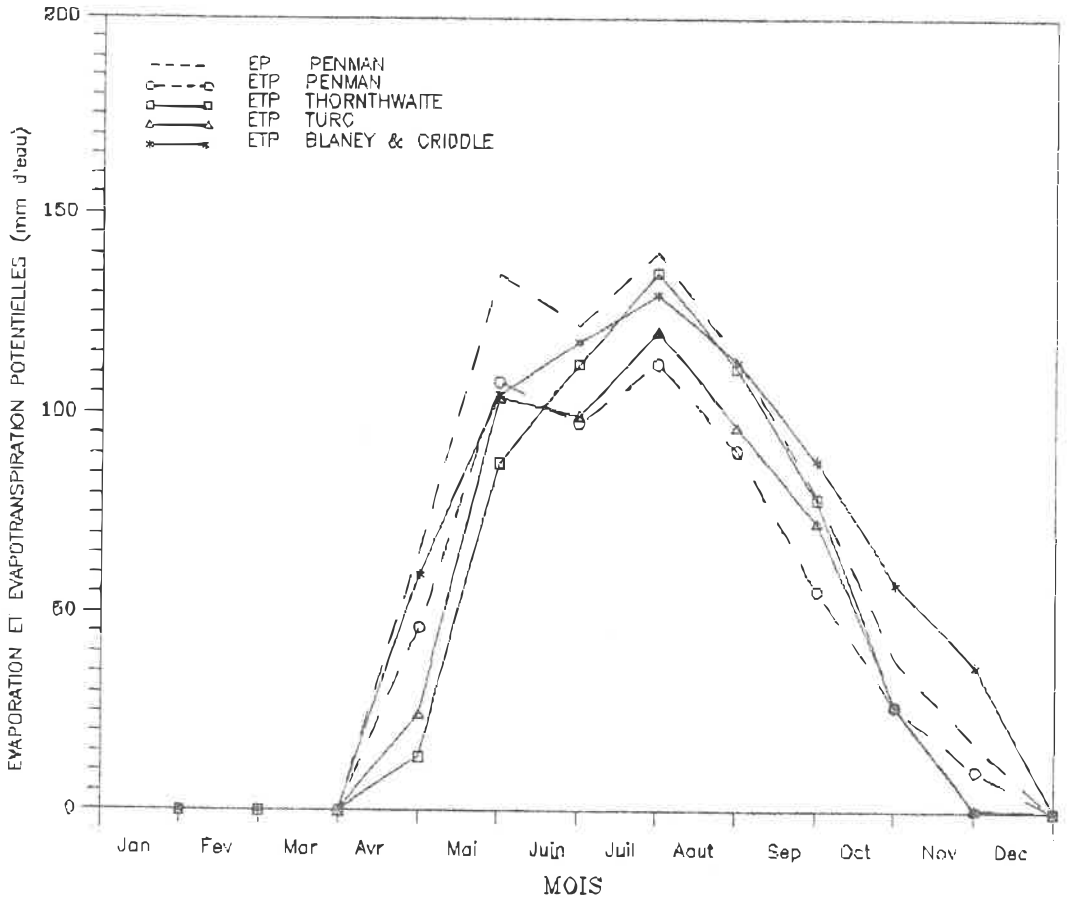


Figure 2.12
Distributions mensuelles de l'ETP et l'EP calculées par différentes méthodes pour l'année 1972

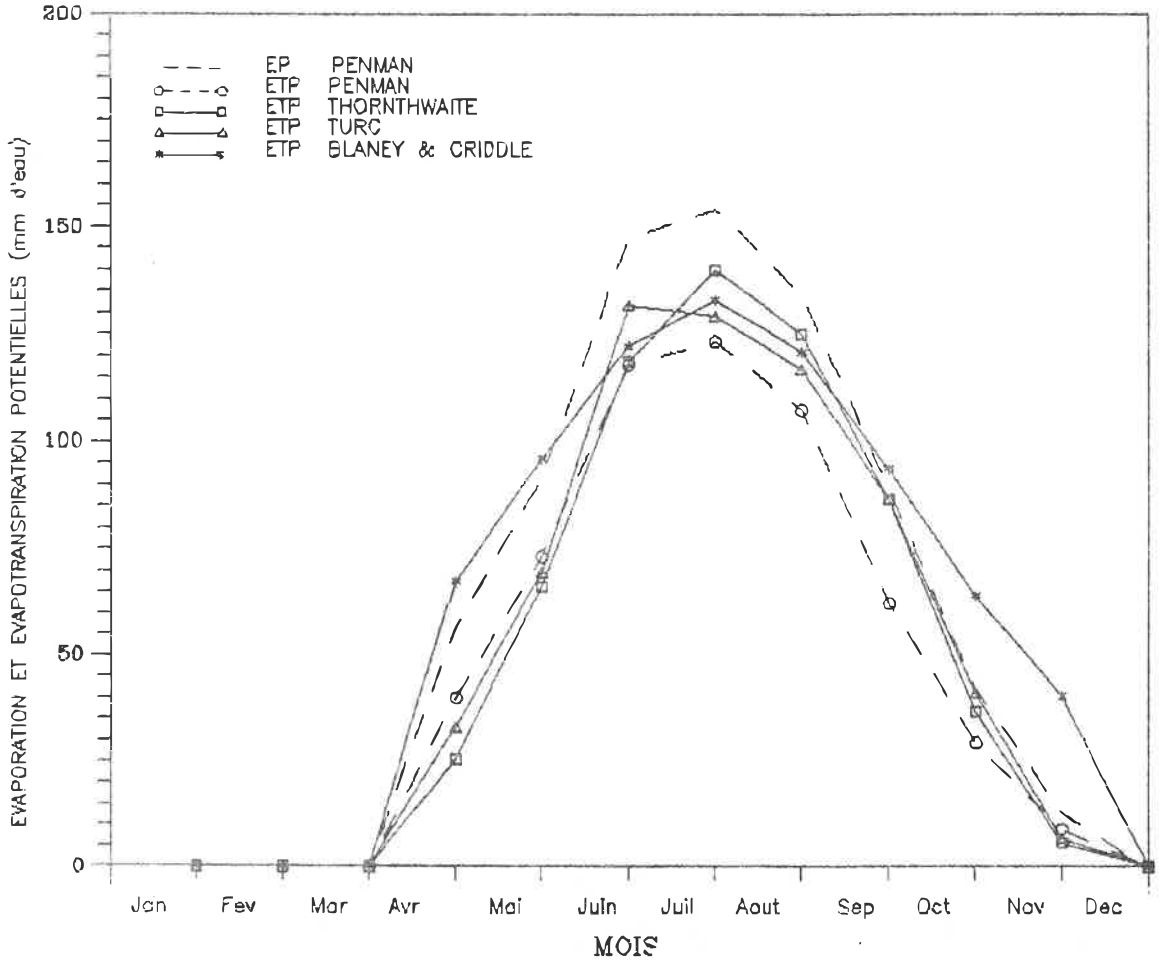


Figure 2.13
Distributions mensuelles de l'ETP et l'EP calculées par différentes méthodes pour l'année 1983

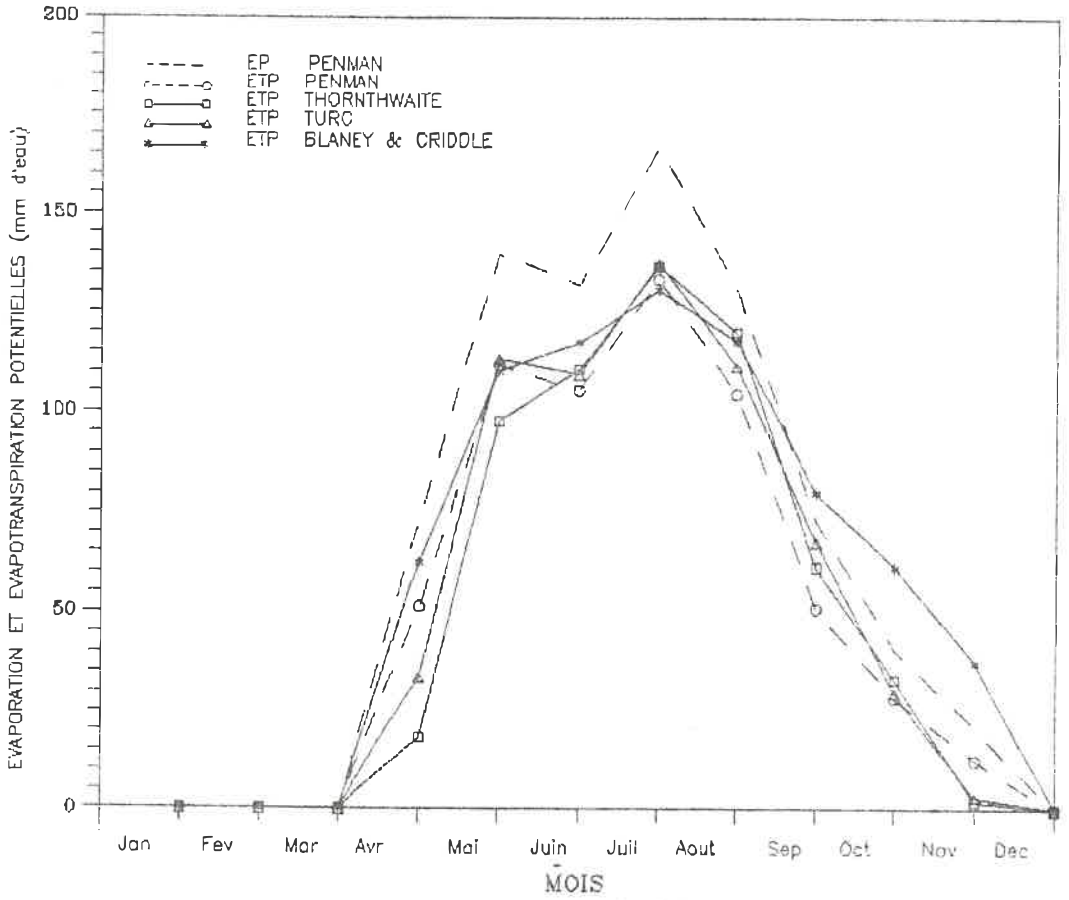


Figure 2.14
Distributions mensuelles de l'ETP et l'EP calculées par différentes méthodes pour l'année 1978

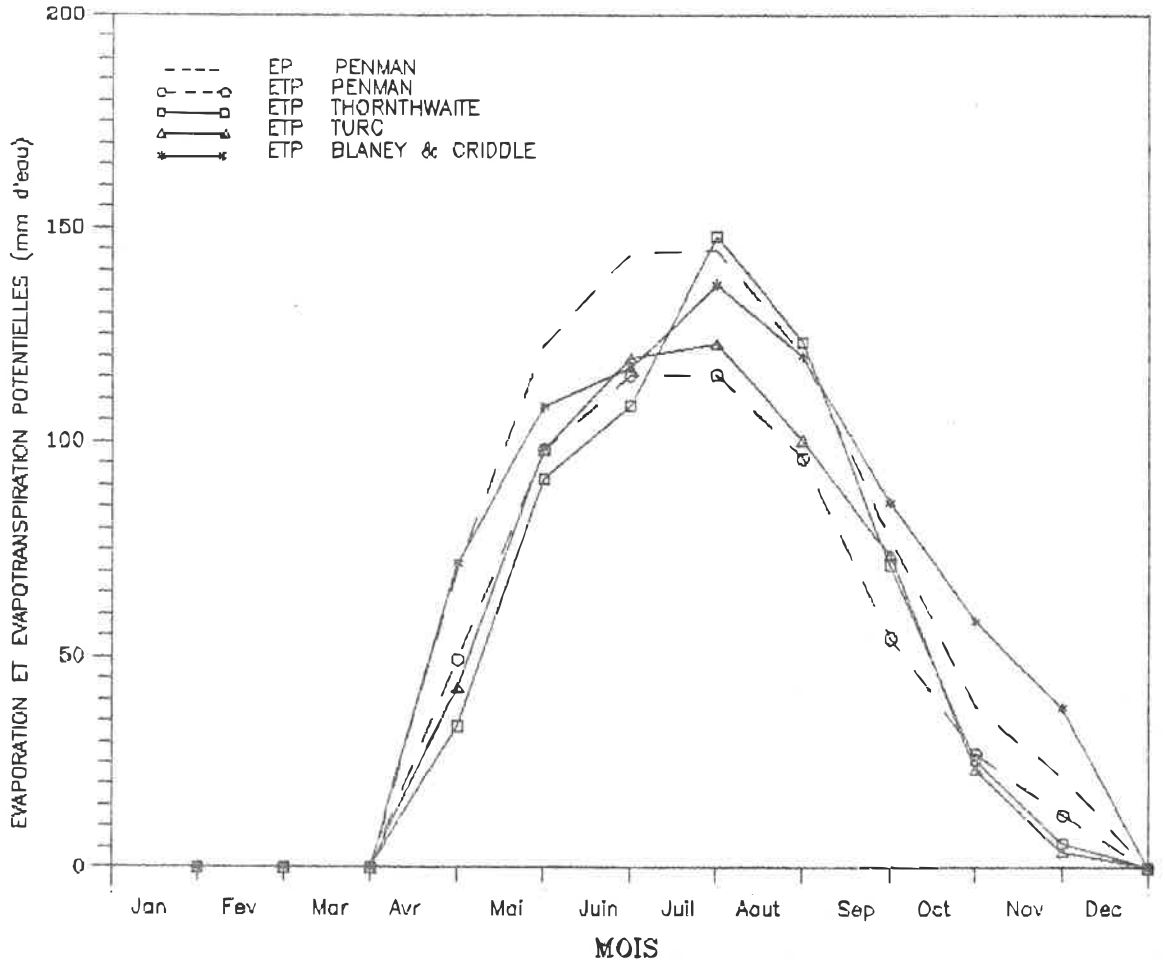


Figure 2.15
Distributions mensuelles de l'ETP et l'EP calculées par différentes méthodes pour l'année 1988

répartitions mensuelles de l'ETP calculée par les méthodes de Penman, Thornthwaite, Turc, Blaney et Criddle et l'évaporation d'une surface d'eau libre calculée par la formule de Penman . On constate immédiatement qu'à patir de mois de juillet, il y a un rapprochement de toutes les distributions de l'ETP et de celle de l'évaporation d'une nappe d'eau, ce qui veut dire qu'en plein période de croissance l'ETP tend vers l'évaporation potentielle d'une nappe d'eau; avant juillet, on observe un étalement des courbes de distribution, l'évaporation potentielle d'une nappe d'eau demeurant toujours supérieure à toutes les autres. De plus la distribution de l'ETP de Thornthwaite présente des valeurs plus élevées en été (juin, juillet, aout et septembre) que les autres distributions de l'ETP, rejoignant à peu près les valeurs de l'évaporation d'une nappe.

De l'analyse du tableau (2.6) qui met en regard les valeurs d'ETP annuelle obtenue par les quatres méthodes (Penman, Blaney & Criddle, Thornthwaite et Turc) on constate immédiatement que la méthode de Blaney & Criddle pour K=0.7, donne des valeurs nettement plus élevées que les trois autres. D'ailleurs le choix du coéfficient K pose un problème qui ne peut être résolu qu'expérimentalement. C'est pour cette raison qu'il ne faut exprimer l'ETP qu'en fonction des facteurs climatiques et ensuite, on le multi-

	Evapotranspiration potentielle (mm d'eau/an)				Précipitation (mm d'eau/an)
	Penman	Thornthwaite	Blaney & Criddle	Turc	-
ETP_{MA}	584	603	737	602	-
ETPsc	487	530	561	513	-
$\frac{ETPsc}{ETP_{MA}}$	.83	.88	.76	.85	-
P_{MA}	-	-	-	-	978
Psc	-		-	-	426
$\frac{Psc}{P_{MA}}$	-	-	-	-	.44

Tableau (2.6): Comparaisons entre l'ETP, précipitation moyennes annuelles (ETP_{MA}, P_{MA}) et l'ETP , précipitation moyenne de la saison de croissance (ETPsc, Psc).

plie par K, si ce dernier est disponible.

Les trois autres méthodes cependant donnent des valeurs assez comparables (voir tableau 2.6), un écart négligeable de l'ordre de 0.3% entre les valeurs de l'ETP moyennes annuelles calculées par les expressions de Thornthwaite et Turc, et un écart de 3.8% entre ces dernières et l'ETP moyenne annuelle calculée par la formule de Penman.

Afin de discuter la validité de ces formules pour la région de Montréal, il faudrait recueillir les données expérimentales necessaires pendant de longues périodes et les comparer avec les valeurs estimées par ces méthodes, de cette manière on pourra ajuster ces formules par des coefficients expérimentaux qui tiendront compte du climat de la région.

Les résultats de l'ETP mensuelle calculée pour chaque décennie pour une période allant de 1930 à 1988 par la méthode de Thornthwaite sont montrés aux figures (2.16 à 2.21). Nous constatons qu'il y a des fluctuations annuelles non négligeable bien que largement moins accusées que celles des précipitations (voir fig. 2.22).

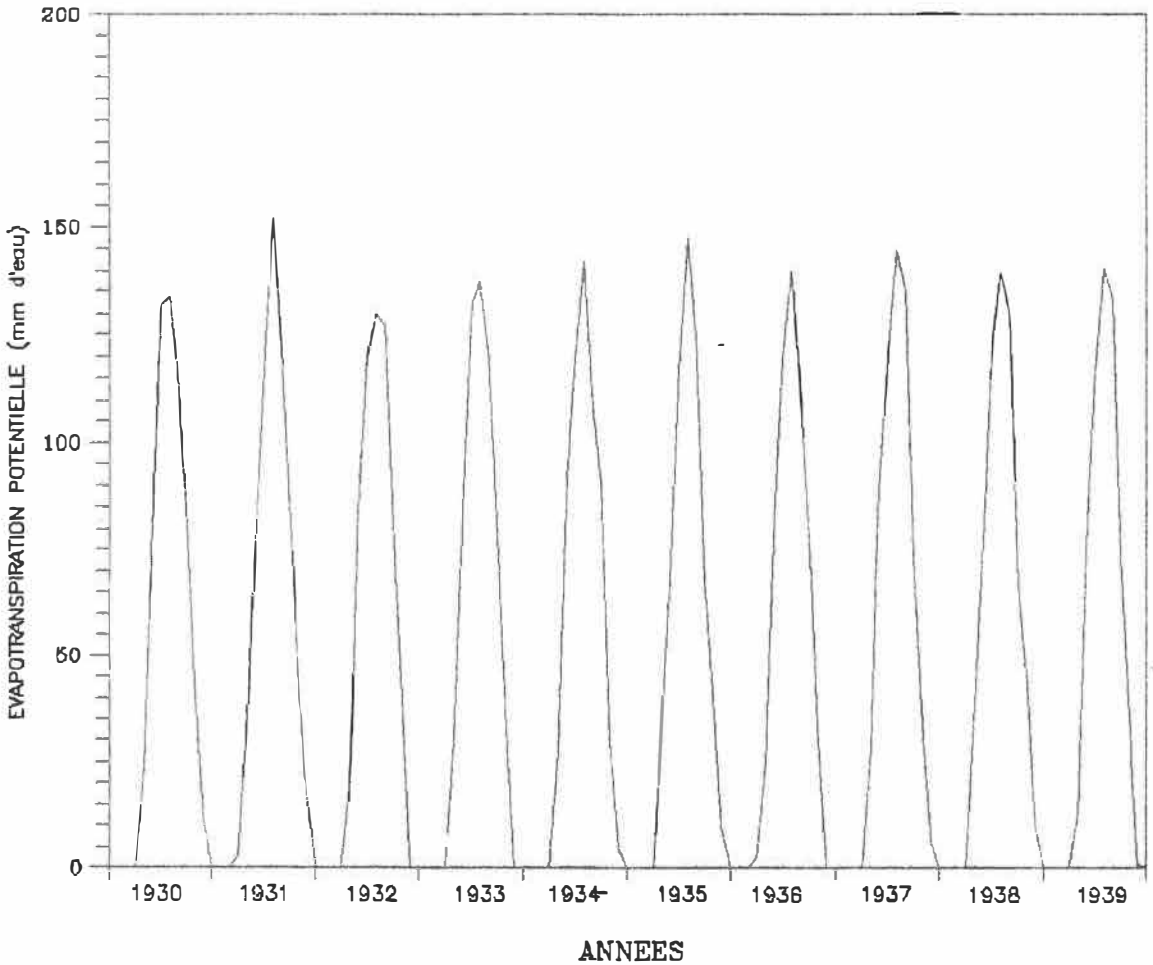


Figure 2.16
Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période (1930-1939)

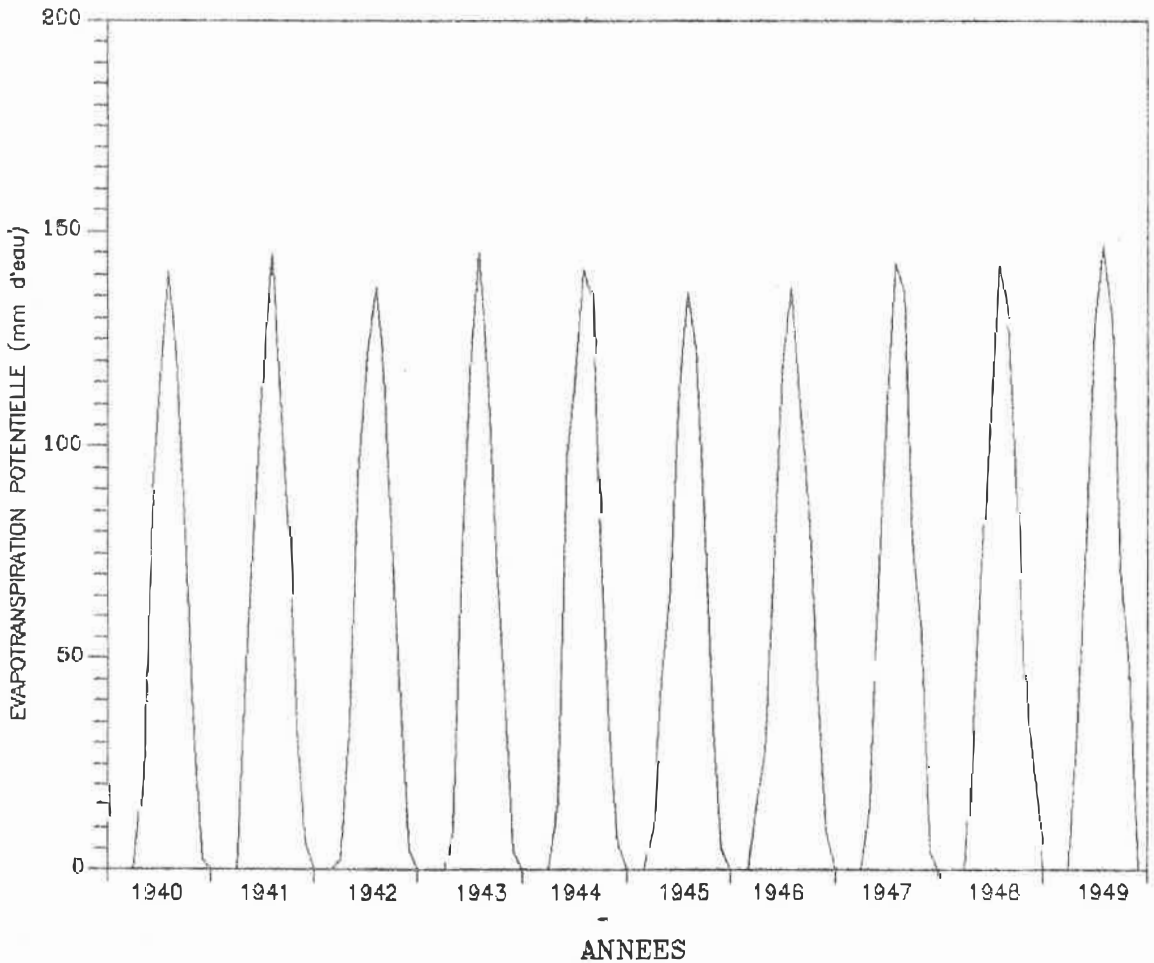


Figure 2.17
Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période (1940-1949)

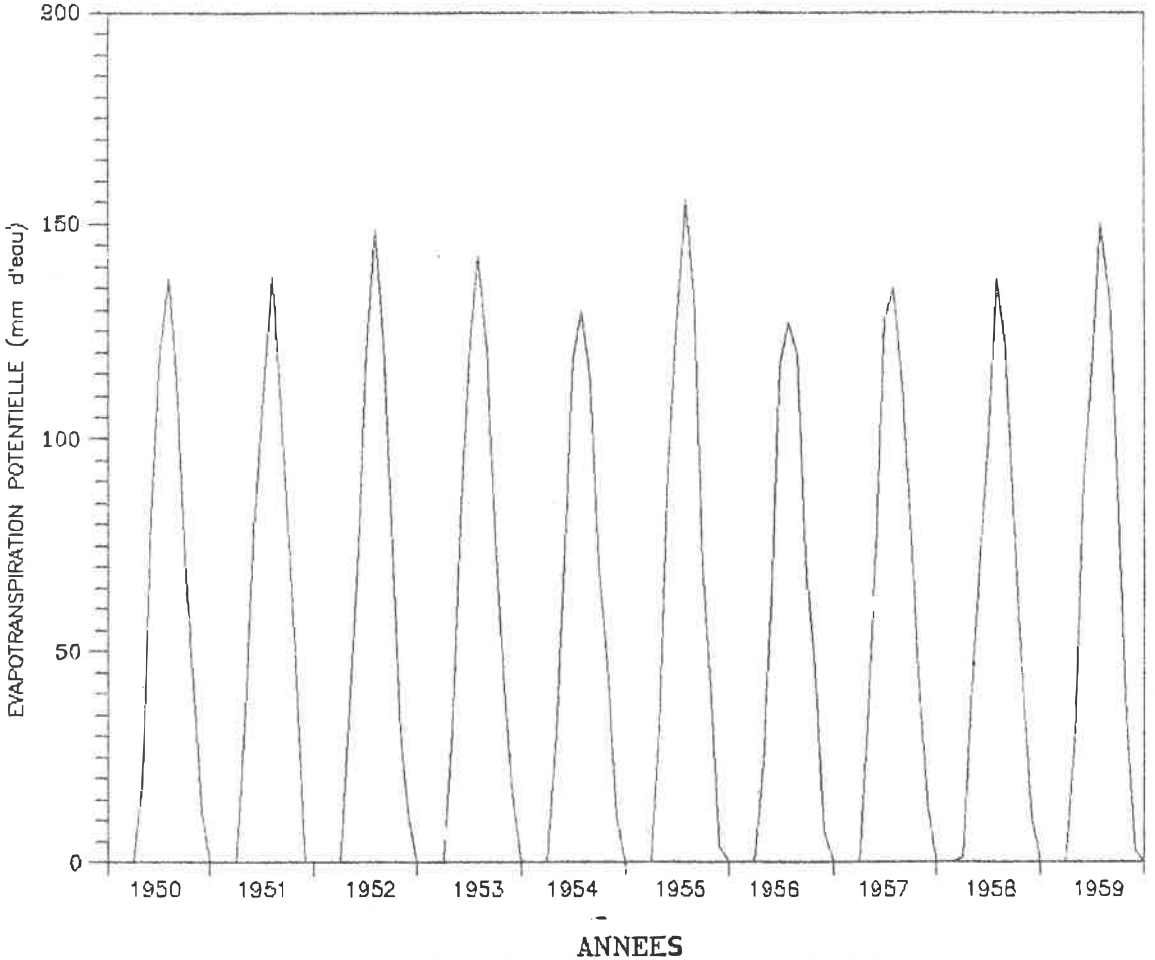


Figure 2.18
Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période (1950-1959)

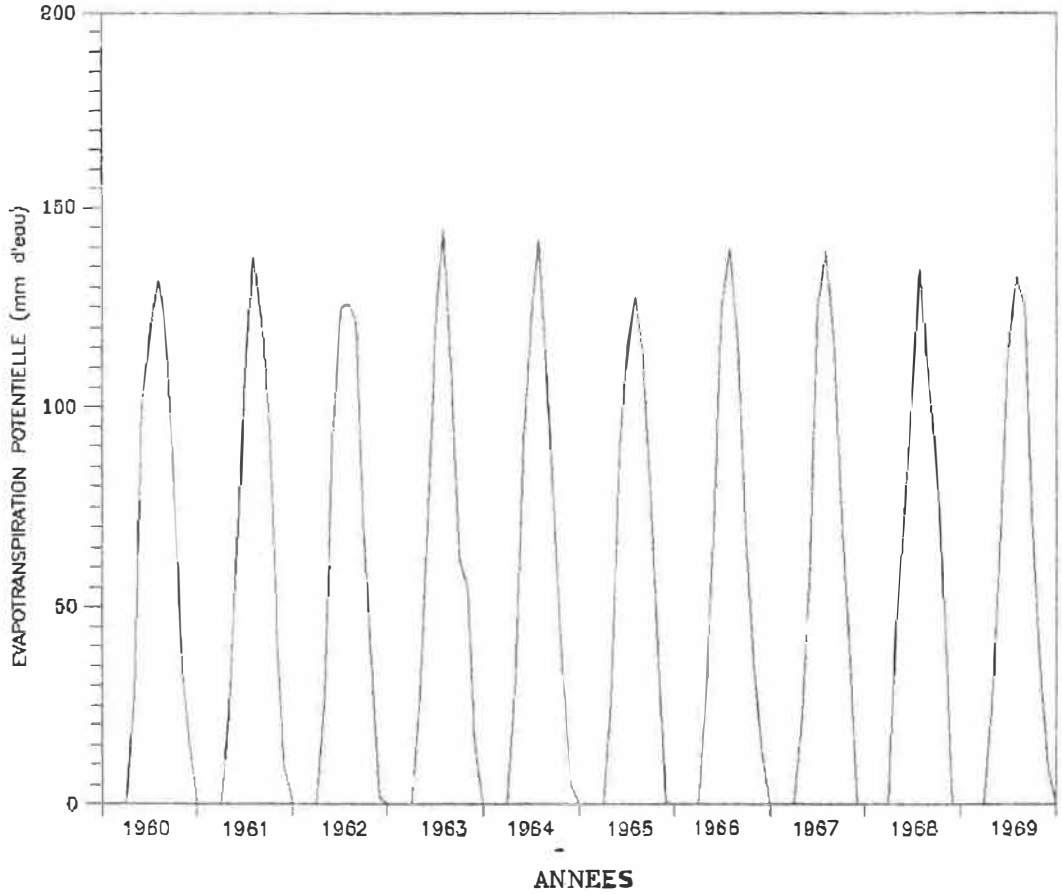


Figure 2.19
Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période (1960-1969)

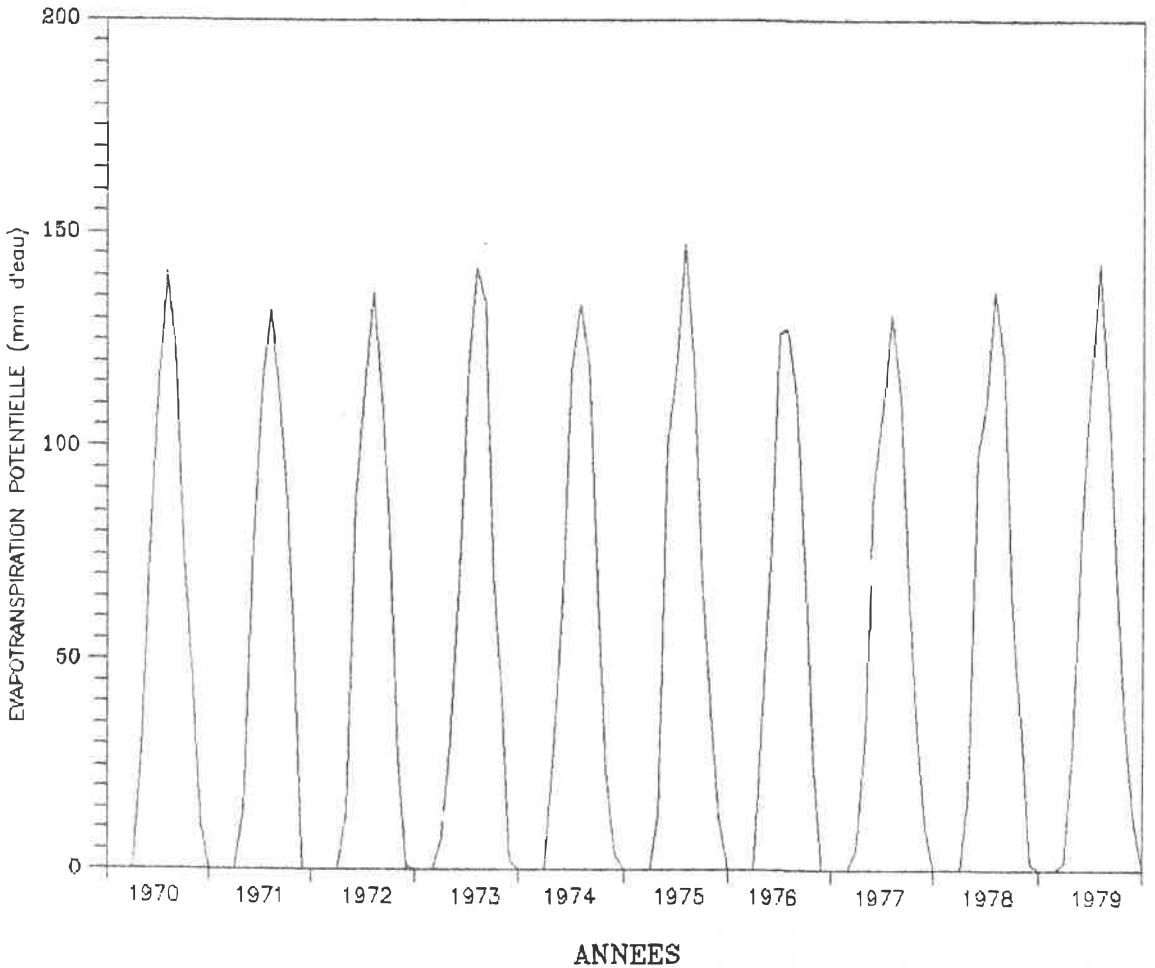


Figure 2.20
Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période (1970–1979)

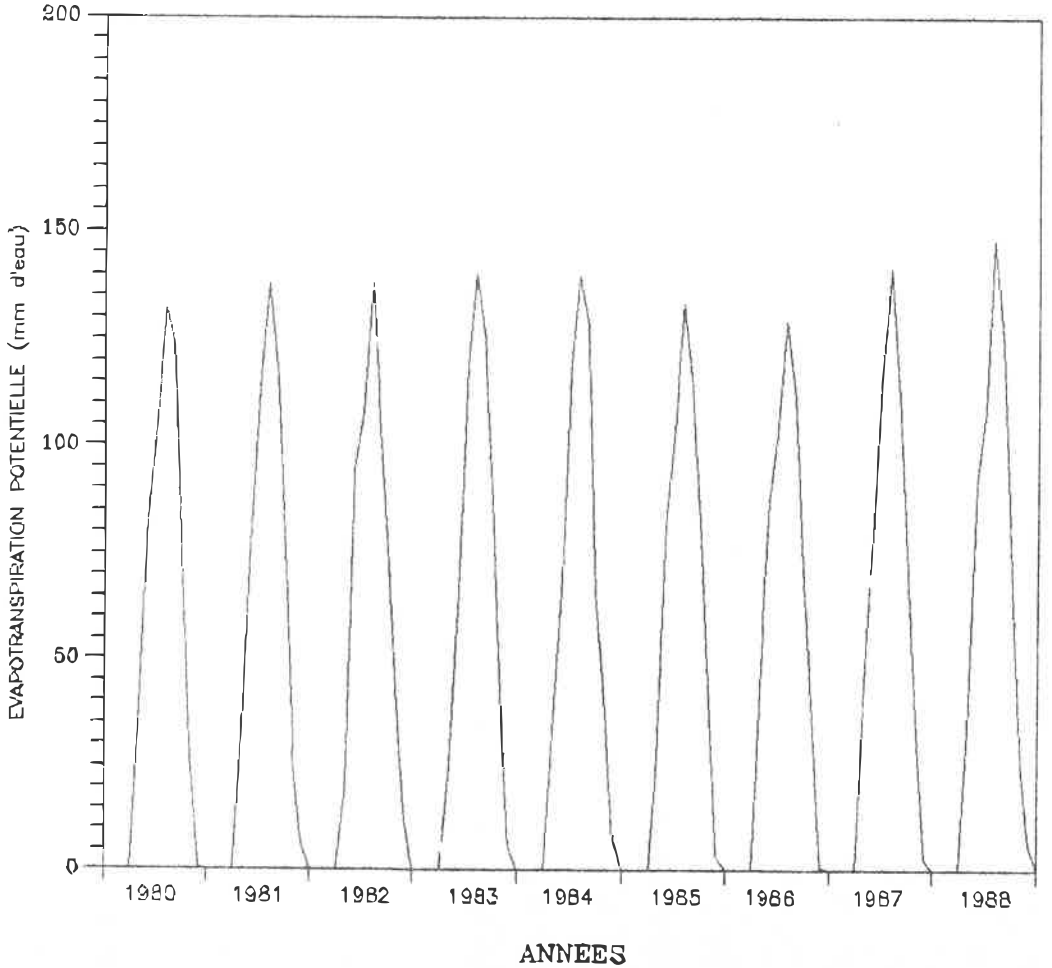


Figure 2.21
Evapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite pour la période (1980-1988)

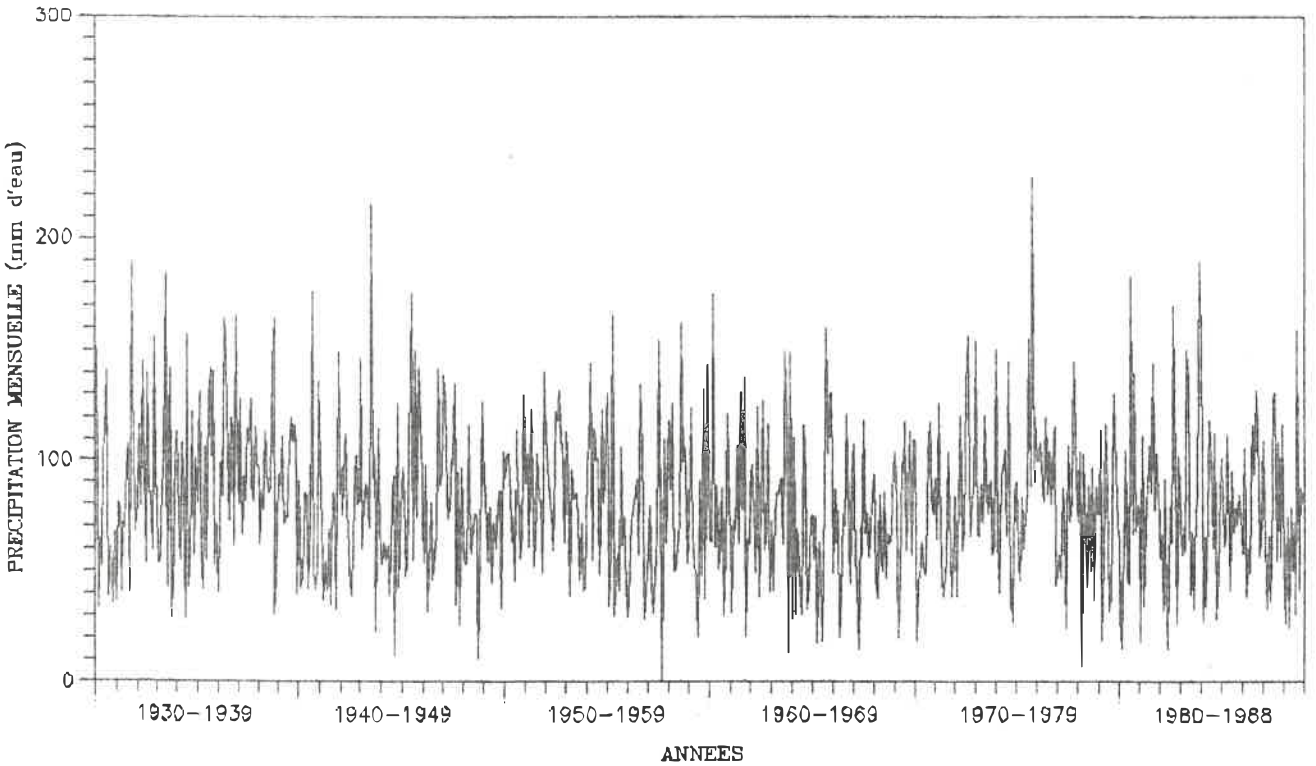


Figure 2.22
Précipitations mensuelles à Montréal
pour la période de 1930 à 1988

En comparant l'ETP moyenne annuelle calculée par la méthode de Thornthwaite aux autres méthodes, nous distinguons que celle de Penmam donne une valeur moins élevée pour l'ETP tandis que celle de Turc donne des résultats légèrement inférieures et celle de Blainey-Criddle surestime considérablement l'ETP. Pour Montréal, l'ETP calculée par la méthode de Blainey calculée avec un coefficient d'évapotranspiration de 0.70 donne une ETP moyenne annuelle de l'ordre de 737 mm tandis que les autres méthodes donnent des valeurs autour de 600 mm (voir fig. 2.23 à 2.27). Un coefficient K approximativement égal à 0.55 permet à la méthode de Blaney et de Criddle s'approcher plus des autres méthodes.

Les paramètres dont dépend l'ETP étant soumis à des variations cycliques saisonnières accentuées telle que la fluctuation de la température moyenne mensuelle (voir fig. 2.28) nous devons nous attendre à rencontrer une variation mensuelle bien marquée de cette ETP. Effectivement, l'ETP est négligeable en hiver et elle peut dépasser 120 mm en été.

Il est bon de noter qu'un grand pourcentage de l'évapotraspiration prend place pendant la saison de croissance (de mai à septembre). Ce pourcentage varie de 76 à 88 pourcent selon la méthode utilisée. Tandis que les préci-

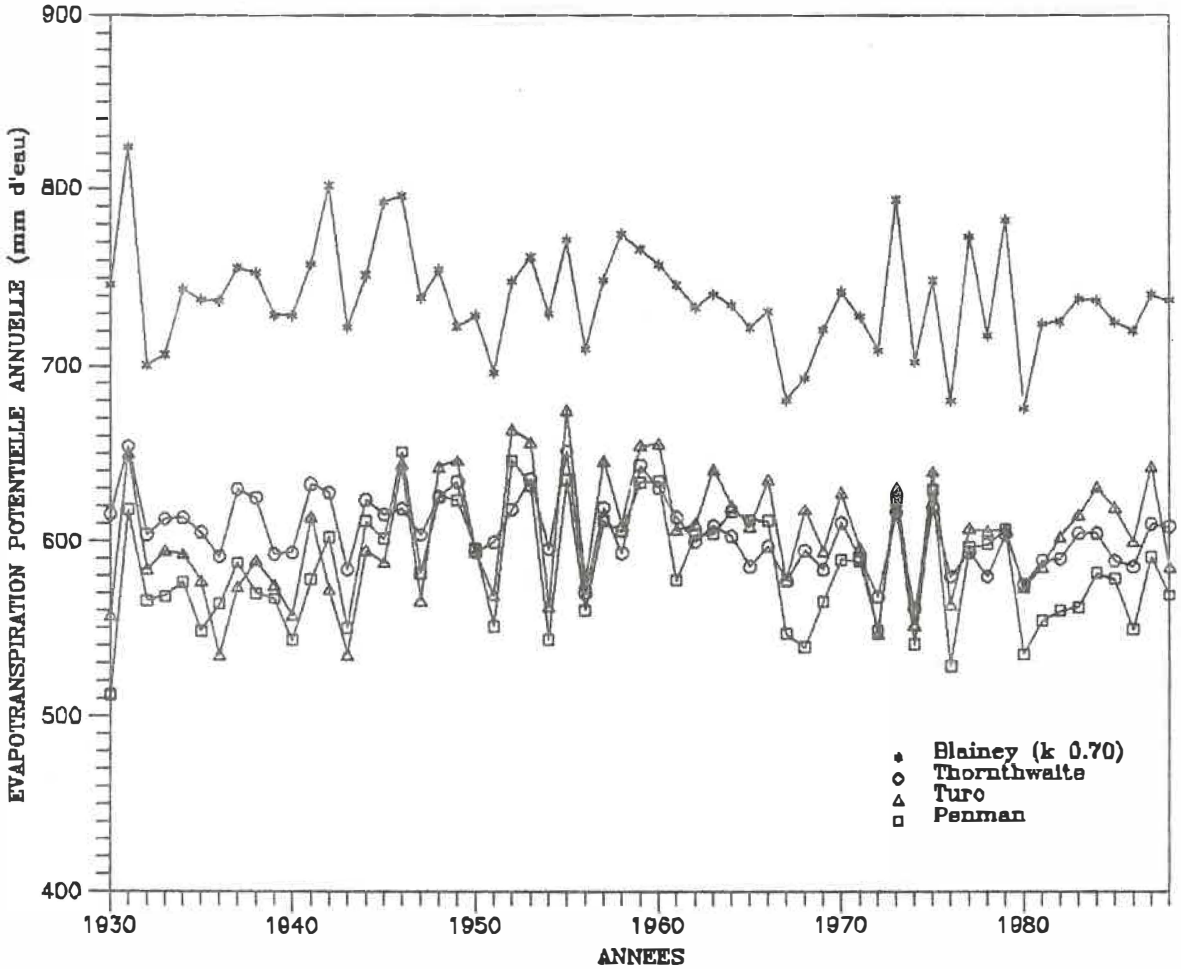


Figure 2.23
Evapotranspiration potentielle annuelle (1930–1988) calculée selon différentes méthodes

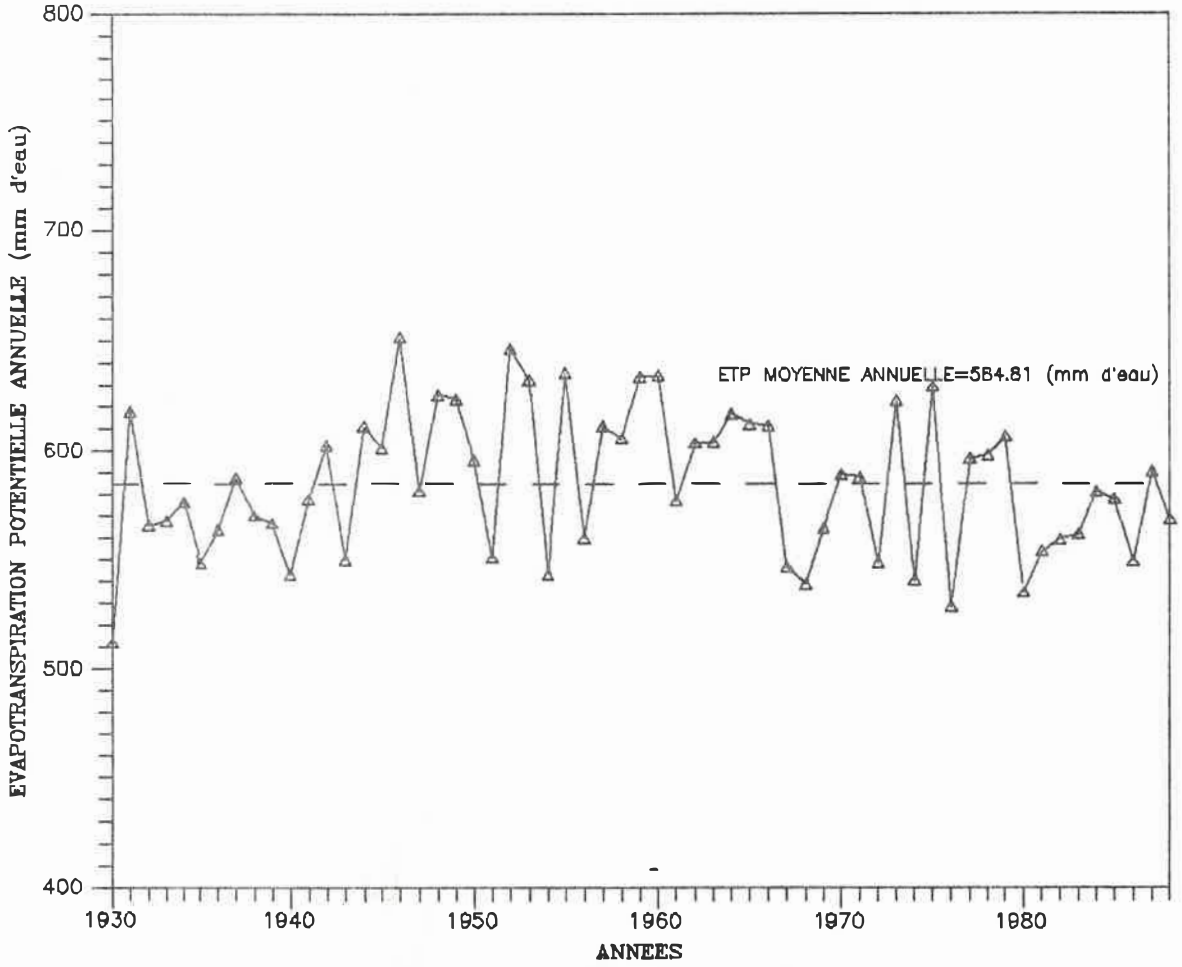


Figure 2.24
Evapotranspiration potentielle annuelle et moyenne annuelle (1930–1988) calculée par la formule de Penman

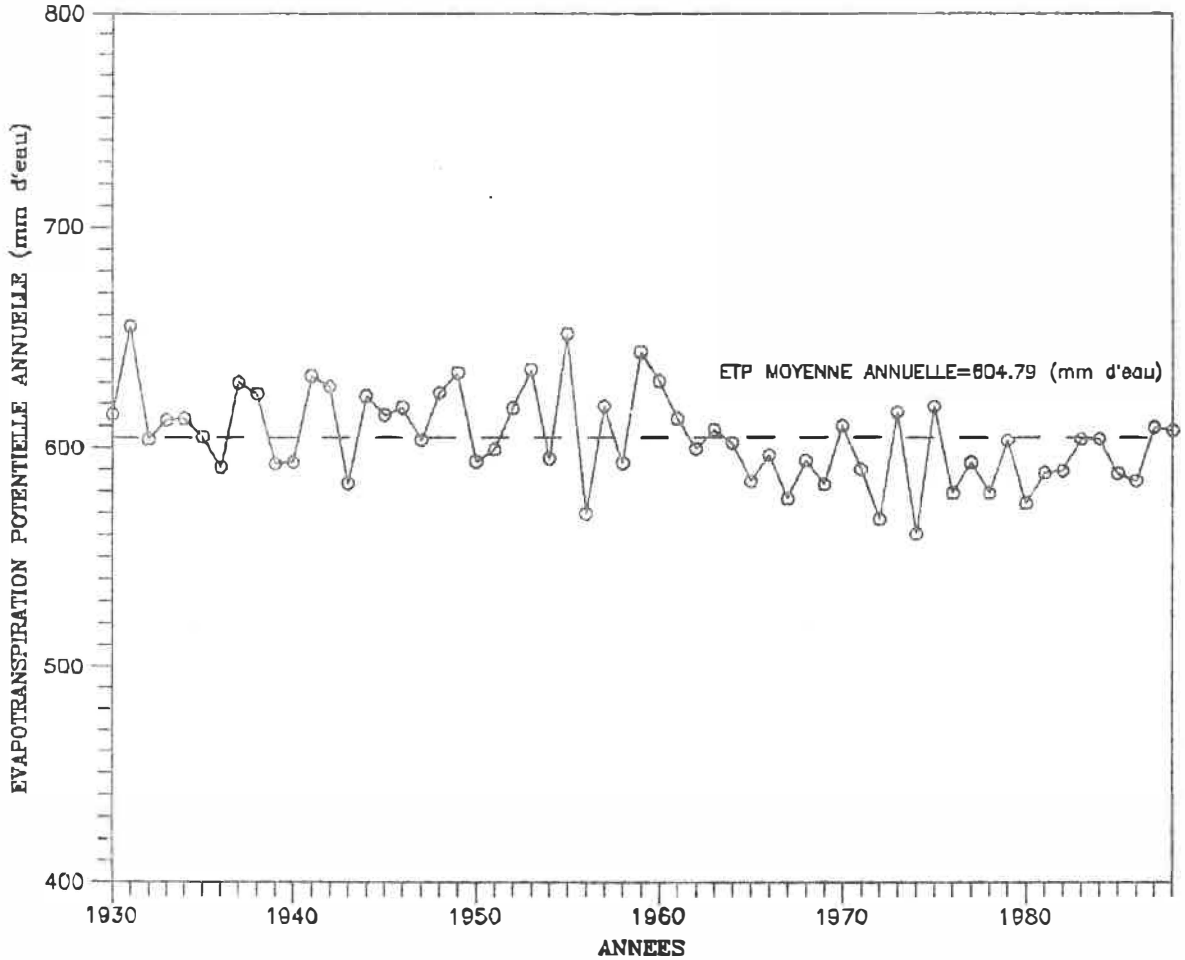


Figure 2.25
Evapotranspiration potentielle annuelle et moyenne annuelle (1930-1988) calculée par la formule de Thornthwaite

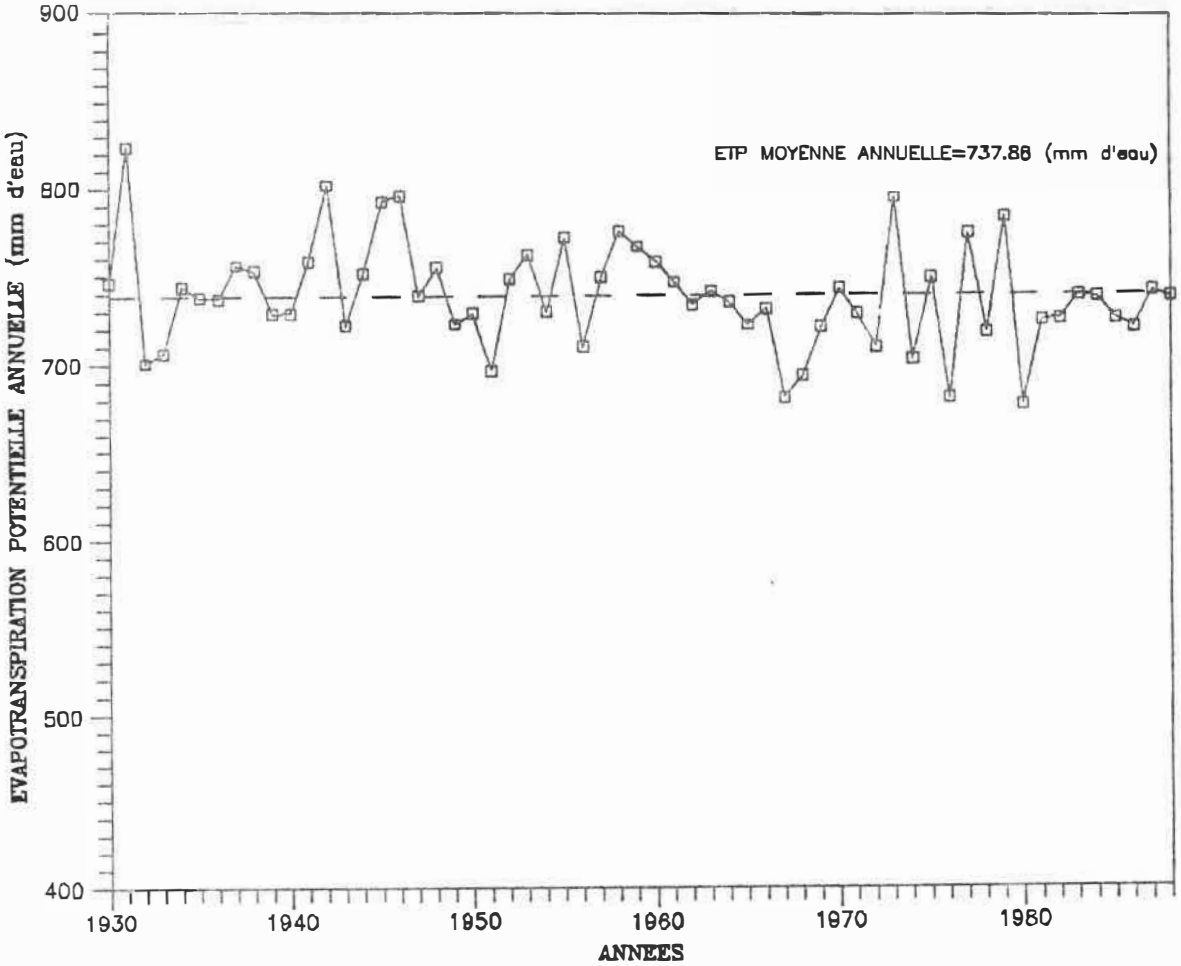


Figure 2.26
Evapotranspiration potentielle annuelle et moyenne annuelle (1930–1988) calculée par la formule de Blaney et Criddle

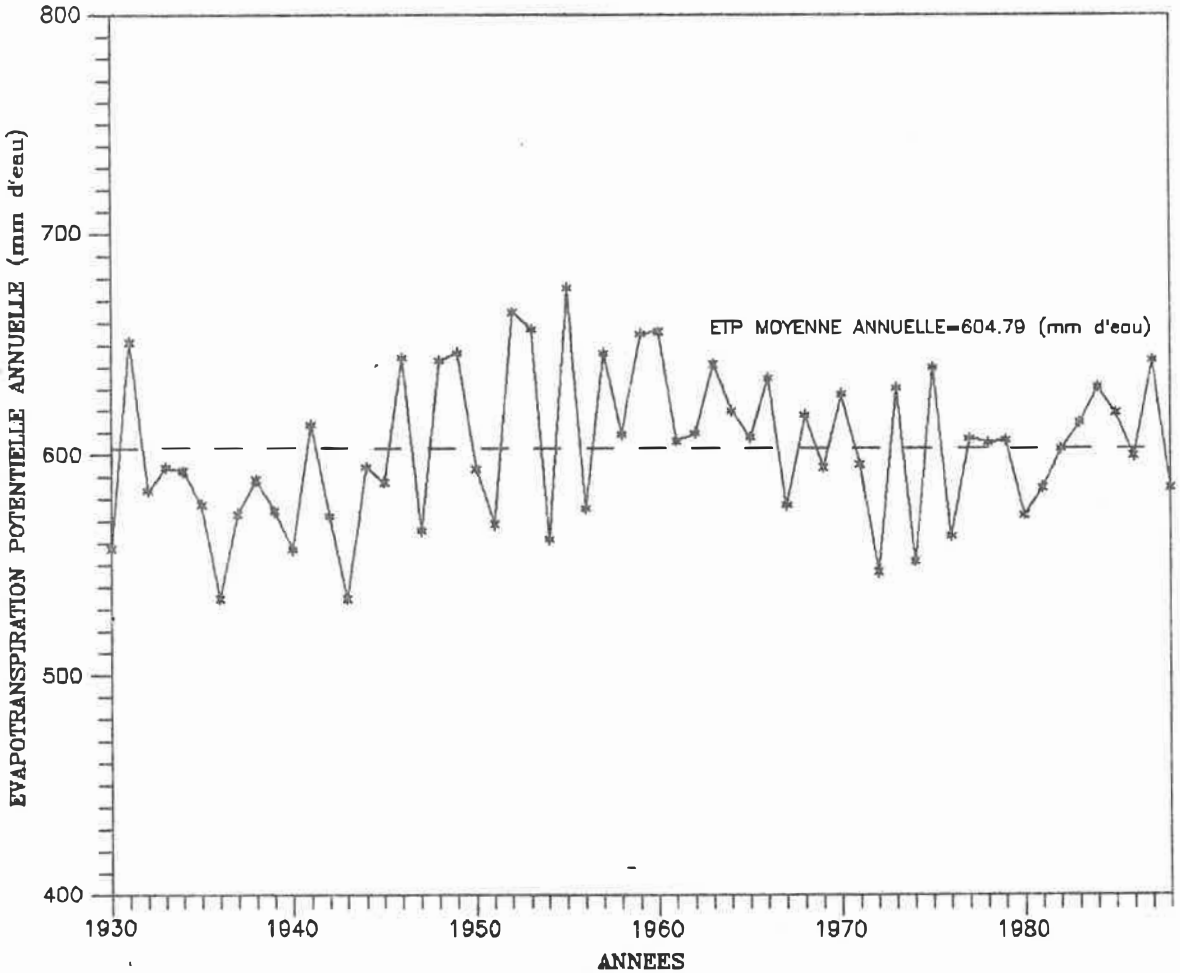


Figure 2.27
Evapotranspiration potentielle annuelle et moyenne annuelle (1930–1988) calculée par la formule de Turc

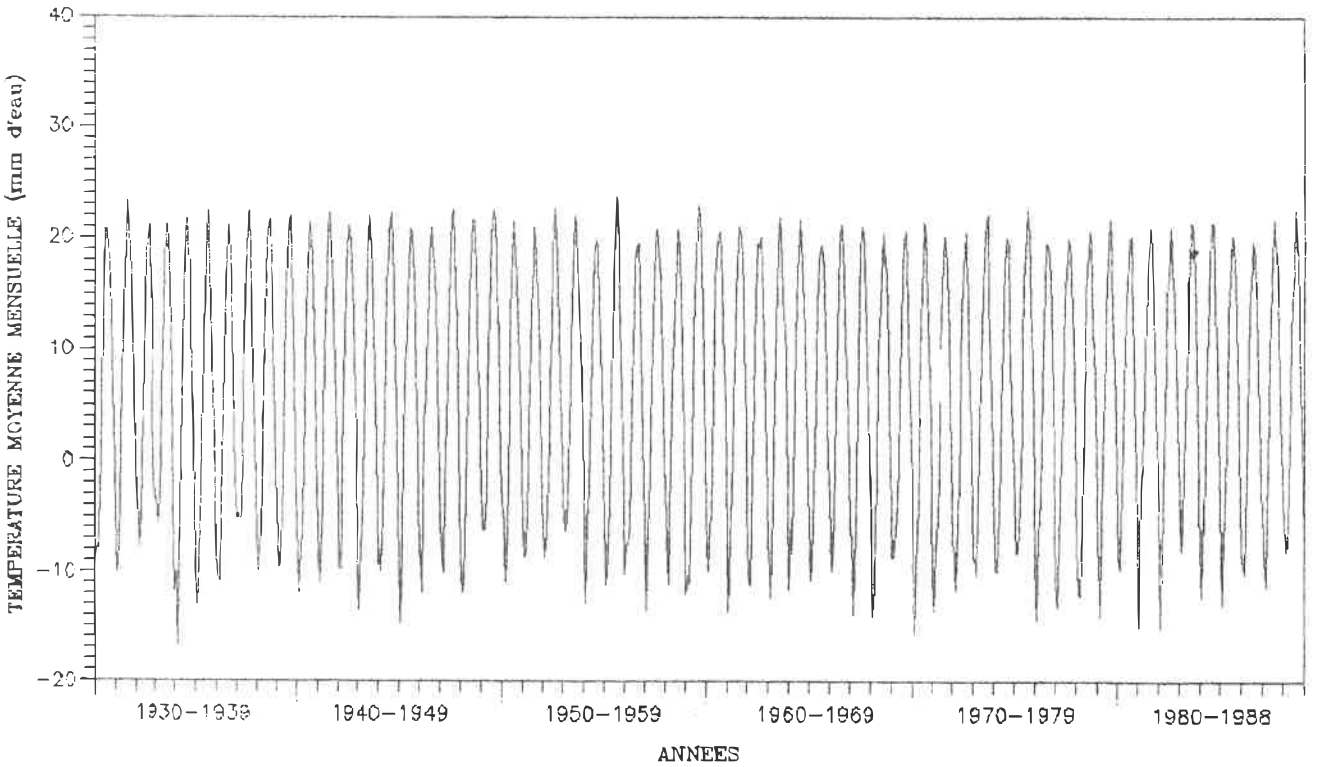


Figure 2.28
Températures moyennes mensuelles à Montreal
pour la période de 1930 à 1988

pitations sont bien réparties durant l'année et le taux de précipitation pendant la saison de croissance est de 44% (voir tableau (2.6).

Il semble que certaines expressions de l'ETP ne soient applicables qu'à un type de climat particulier. En fait ces incertitudes dans les résultats de l'ETP calculée sont liées aux hypothèses simplificatrices qui ont été adoptées et qui aboutissent à négliger ou tout au moins sous-estimer les incidences de l'un ou l'autre des facteurs climatiques susceptibles d'intervenir et qui sont essentiellement:

- le rayonnement net, c'est à dire le bilan entre la radiation globale solaire, le rayonnement de l'atmosphère et celui de la terre,
- la température de l'air,
- le déficit de saturation ($e_w - e_t$),
- les mouvements de l'air tant verticaux qu'horizontaux responsables des échanges par conduction, convection et turbulence.

La formule de Thornthwaite est très pratique vue sa simplicité d'utilisation, en fait elle n'exige qu'un minimum de données climatiques puisque dans la formule (2.25) seule la température de l'air est prise en compte. Mais en

général, les valeurs obtenues ne peuvent être utilisées qu'à titre indicatif, vu que dans cette formule, on ne tient pas compte de deux facteurs importants dont le pouvoir évaporant dépend, qui sont le déficit de saturation et la vitesse du vent.

L'utilisation de la formule de Turc est facile, puisqu'elle n'introduit que deux variables météorologiques: la température moyenne et la durée d'insolation. Cette formule est valable pour les régions semi-humide. Ni le vent ni le déficit de saturation n'y apparaissent explicitement.

La formule de Blaney-Criddle a été développée dans l'Ouest des Etats-unis et elle est mieux applicable pour les régions arides.

Parmi les méthodes proposées, la solution de Penman basée sur une évaluation objective du bilan énergétique de surface évaporante tient bien compte du processus physique réel. Toutefois, l'une des limitations dans l'emploi de la formule est qu'elle implique la connaissance de paramètres atmosphériques tels que l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent, la durée d'insolation qui ne sont pas disponibles dans la majorité des stations météorologiques.

Le nombre des formules qui ont été proposées montre combien dans ce domaine il est difficile d'aboutir à une conception universelle satisfaisante. Les ajustements statistiques ou bien masquent la variabilité réelle du phénomène ou ne sont applicables qu'à des secteurs géographiques limités. Les évaluations basées sur les aspects énergétique de l'ETP doivent pour être opérationnelles, faire l'objet de simplifications empiriques. En général on peut avancer que la validité des résultats est fonction du nombre des facteurs atmosphériques pris en compte dans l'évaluation. Le choix d'une méthode dépendra essentiellement de la précision requise.

Dans le cadre de cette étude, les méthodes de Thornthwaite, Turc et Penman sont suffisamment valables.

CHAPITRE 3

TRAVAUX AU LABORATOIRE ET IN-SITU

3.1 Généralités

Dans ce chapitre, on parlera de la calibration et de fontionnement de l'appareil de mesure de la teneur en eau du sol; ensuite on discutera de la nature des travaux exécutés au laboratoire et in-situ pour chacun des deux sites (Hôtel de ville de Montréal-Est et l'Epiphanie) qui ont pour but de recueillir des informations qui permettent de déterminer les causes possibles de la fissuration de la structure de chacune des deux bâtisses. Enfin les travaux exécutés sur le site no.3 (Parc Maisonneuve), renseignent sur l'évolution des profils de l'humidité du sol à différentes distances des arbres, ainsi que sur la zone affectée par les racines, c'est-à-dire le champ d'action du système radiculaire.

Les résultats de cette étude sont applicables aux dépôts argileux de la mer Champlain. Les caractéristiques de retrait et de gonflement de ces argiles ont été étudiées par plusieurs chercheurs, par exemple, Warkentin et Bozozuk (1961), et Silvestri et al. (1990).

3.2 Calibration de la sonde à neutrons

3.2.1 Introduction

La sonde à neutrons est devenue aujourd'hui un outil très utilisé pour mesurer la teneur en eau du sol in-situ. Son utilisation est très diversifiée dans le domaine du génie civil, notamment dans l'étude des mouvements des fondations dus à des variations de la teneur en eau du sol. Cette méthode de détermination de la teneur en eau in-situ est très rapide et non déstructive. Une calibration adéquate est décisive pour une bonne précision.

La calibration donnée par l'usine est parfois inadéquate (Rawls et Assussen 1973). Il n'y a pas de consensus à savoir qu'une seule courbe de calibration est valide pour tous les sols. Quelques chercheurs proclament qu'une seule courbe de calibration est suffisante (Gardner et Khirkham 1952; Van Bavel, Underwood, et Siwanson 1956; Rawls et Asmussen 1973). D'autres chercheurs disent que différents sols nécéssitent différentes courbes de calibration dans le but de tenir compte de l'effet de la densité,la minéralogie, la texture, et la salinité des sols sur la thermalisation des neutrons émis par la sonde (Mortier et De Boodt 1956; Holmes 1966; Lal 1977; Babalola

1977).

3.2.2 Déscription et Fonctionnement de la sonde à neutrons

La sonde à neutrons utilisée, de type "503 DR", est construite par CPN Corporation (Martinez, Californie) (voir fig.3.1). Elle se compose d'une source radioactive de neutrons à hautes énergies (50 mCi Américium -241/Be) et d'un détecteur de neutrons lents ou thermiques. Les neutrons rapides émis par la source seront ralentis par les atomes d'hydrogène puisque la masse du noyau est égale à celle du neutron libre. La présence d'hydrogène donne naissance à un champ élevé de neutrons thermiques. Les neutrons rapides perdent leurs énergies en heurtant les atomes d'hydrogène qui se trouvent dans les molécules du sol et deviennent des neutrons thermiques qui pourront être absorbés ou détectés par le détecteur. Les neutrons rapides pourront aussi être ralentis par les matières lourdes composant le sol, mais d'une façon moins efficace que les atomes d'hydrogène. Le flux de neutrons thermiques résultant dépend de nombreux facteurs liés à la création et l'absorption de neutrons thermiques; mais le facteur le plus important est la quantité d'hydrogène (et donc d'eau) présente dans le sol; puisqu'il ne faut que 18 collisions avec un atome de l'hydrogène pour ralentir un neutron rapide, alors qu'il faudrait 200 collisions avec les autres éléments qui compo-

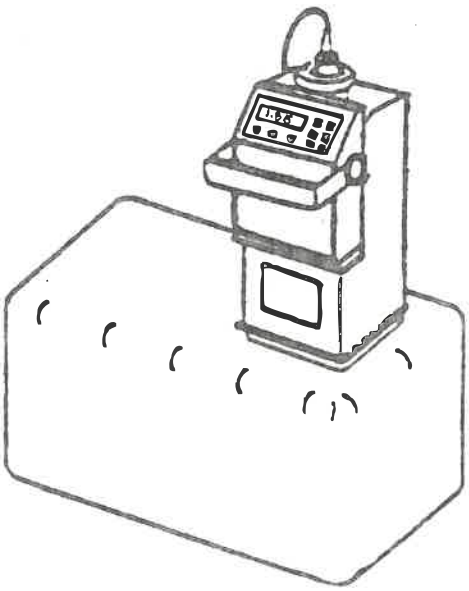


Figure 3.1
L'appareil à neutrons de type "503 DR"

sent le sol. En conclusion, la sonde à neutrons peut être utilisée comme un dispositif de mesure de l'humidité du sol.

3.2.3 Le ratio

Le ratio est une quantité mesurée par l'appareil à neutrons, et représente le rapport entre le compte (nombre) de neutrons réfléchis, détectés par l'appareil et le compte standard.

Le compte standard représente une mesure de la quantité d'hydrogène existante dans la cire protégeant la sonde à neutrons et à l'intérieur de la boîte protectrice. En prenant le compte exactement de la même manière à chaque fois, on peut vérifier la validité de l'appareil et surtout le bon fonctionnement du compteur. On vérifie le bon fontionnement de la sonde à l'aide de la règle suivante: il faut que la différence entre deux comptes standards consécutifs soit inférieure à 0.707 fois la racine carrée de la moyenne des deux comptes (D'après "503 DR" Hydro probe users manual CPN corp., 1987).

3.2.4 Calibration in-situ

En général, il existe deux méthodes de calibration in-situ. La première méthode consiste à placer le tube d'accès en des points représentatifs du sol, à prendre des lectures à une profondeur bien déterminée et à prélever deux échantillons à l'intérieur d'un rayon de 30 à 60 cm autour du tube et à la même profondeur. Ces échantillons servent à déterminer au laboratoire la teneur en eau par séchage au four et le poids volumique sec.

La deuxième méthode consiste à prélever des échantillons à différentes profondeurs en utilisant un échantillonneur de diamètre légèrement inférieur à celui du tube d'accès qui doit être placé par la suite dans le trou exécuté au préalable. Ces échantillons sont utilisés pour déterminer leurs teneurs en eau au four et leurs poids volumiques secs. Par la suite, des lectures à l'aide de la sonde sont prises à la même profondeur d'échantillonnage.

Dans nôtre cas des échantillons ont été prélevés à l'aide d'un tube mince de diamètre légèrement inférieur à 5 cm de diamètre et de 50 cm de longueur, dans chacune des pentes de l'excavation expérimentale de Sainte-Hilaire, à différentes niveaux (voir figure 3.2) afin d'avoir une marge de teneur en eau assez étendue. Ces échantittons ont été soumis à des mesures de teneurs en eau et de densité

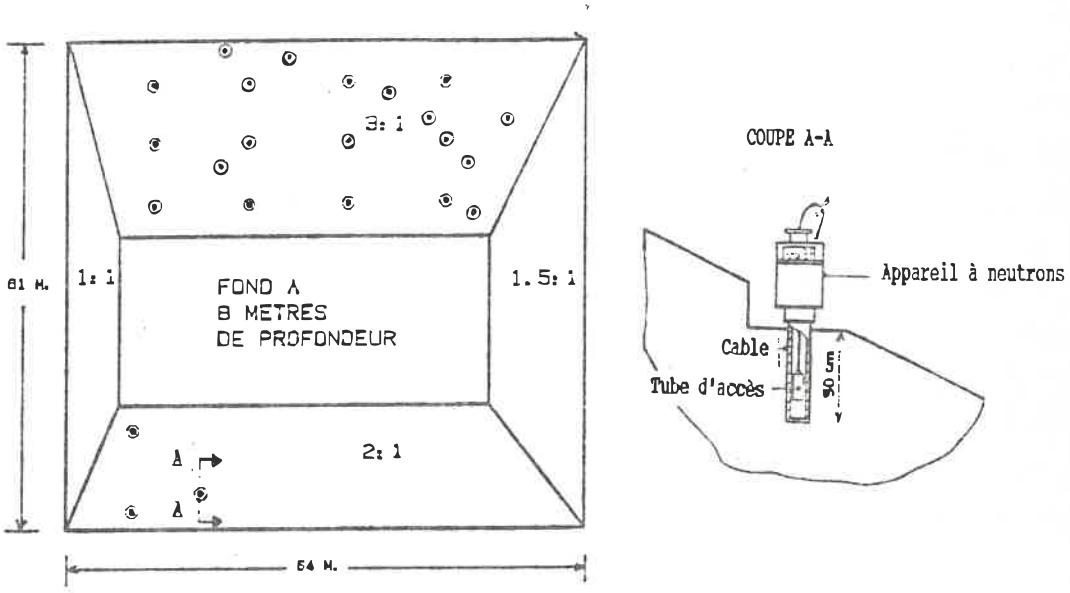


Figure 3.2
Calibration in-situ de la sonde à neutrons

sèche. Puis, un tube d'aluminium de 5 cm de diamètre fermé à son extrémité inférieure, servant d'accès à la sonde à neutrons, a été introduit dans chaque trou afin de mesurer le ratio à la même profondeur que celle de l'échantillon prélevé (voir figure 3.2). L'excavation de Sainte-Hillaire a été décrite par Lafleur et al. (1988).

Les résultats des mesures sont montrés au tableau 3.1:

# échantillon	W (%)	ρ_d g/cm3	Ratio	$\Theta=\rho_d.W$ (%)
1	12.00	1.51	1.5017	18.12
2	34.33	1.29	2.3136	44.28
3	63.80	0.98	2.6946	62.52
4	87.93	0.80	2.6981	70.34
5	68.69	0.93	2.7836	63.66
6	74.12	0.89	2.5618	65.97
7	76.00	0.88	2.6889	66.88
8	83.14	0.85	2.2270	70.67
9	36.20	1.31	1.5128	47.42
10	46.50	1.25	2.4684	58.12
11	45.60	1.22	1.9005	55.63
12	38.30	1.29	1.7465	49.41
13	65.60	0.95	2.3808	62.97
14	44.76	1.23	2.2589	55.05
15	42.53	1.24	2.1972	52.73
16	73.94	0.89	2.7213	65.81
17	89.22	0.82	2.8076	73.16
18	34.89	1.28	2.1984	44.66
19	78.56	0.87	2.8062	68.35
20	64.18	0.97	2.7410	62.25
21	33.55	1.29	2.2679	43.28
22	76.35	0.88	2.7400	67.19
23	77.41	0.88	2.7853	68.12
24	42.3	1.22	2.2849	51.61
25	10.8	1.19	0.8663	12.85

Tableau 3.1: Résultats de calibration in-situ. (D'après Silvestri et al., 1989)

3.2.5 Calibration au laboratoire

Pour la calibration au laboratoire, nous avons utilisé un réservoir en plastique d'une capacité de 120.71 litres et dont les dimensions exactes sont montrées à la figure 3.3. Un tube d'aluminium de 5 cm de diamètre et de 90 cm de longueur a été installé au centre du réservoir. En premier lieu une lecture de ratio correspondante a été prise dans l'air ambiant dans le réservoir à l'aide de la sonde nucléaire. Les résultats sont les suivants:

$$\text{Ratio} = 0.0116$$

$$\Theta = 0.00$$

Ensuite, le réservoir a été rempli d'eau potable. Trois mesures ont été effectuées à différentes profondeurs dont les résultats sont les suivants:

Profondeur (cm)	Ratio
30	3.1896
35	3.1921
40	3.1938

Des lectures dans un réservoir d'eau cylindrique de dimensions plus grandes 82 cm de profondeur et 76 cm de diamètre montrent une légère différence par rapport au pre-

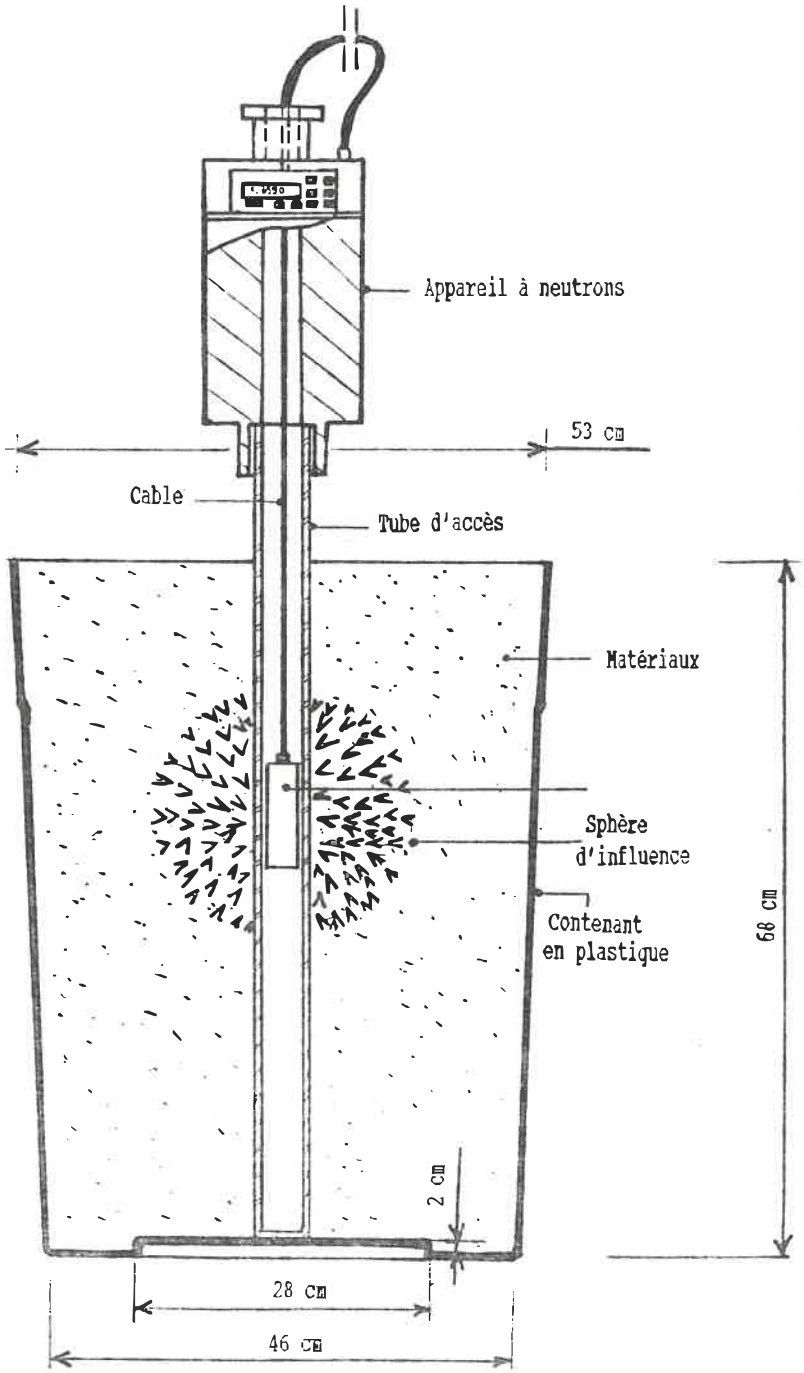


Figure 3.3
Calibration au laboratoire de la sonde à neutrons

mier réservoir:

Profondeur (cm)	Ratio
37	3.1429
42	3.1424
47	3.1720

Nous concluons donc que les dimensions de notre premier réservoir sont valables pour fin de calibration.

En troisième étape, le réservoir a été rempli de 195.8 kg de sable lâche, séché au four et à l'air, ayant une teneur en eau de 0.144 %. Les lectures à la sonde nucléaire dans ce sable étaient de:

Profondeur (cm)	Ratio
30	0.0275
40	0.0350
50	0.0438

Ensuite, une quantité d'eau de 39.76 kg a été ajoutée à ce sable jusqu'à ce que le niveau d'eau atteigne la surface. Les teneurs en eau massique et volumétrique ainsi que le degré de saturation ont été calculés.

Teneur en eau finale du sable : W = 20.48%

Teneur en eau volumétrique : Θ = 33.17%

Degré de saturation : S_r = 83.83%

Les lectures avec l'appareil nucléaire correspondantes sont:

Profondeur (cm)	Ratio	Θ (%)
32	1.7893	32.17
42	1.7580	31.13
52	1.7769	31.47
62	1.6053	29.76

Afin d'obtenir d'autres points sur la courbe de calibration ayant une teneur en eau volumétrique supérieure à 35%, nous avons combiné différentes proportions de sable, de filler, d'eau ainsi que de kaolinite. Plusieurs mélanges ont été effectués. Les particules fines de filler et de la kaolinite ont permis d'atteindre des teneurs en eau supérieurs à 35%. Dans le but d'avoir un matériau homogène, le mélange a été malaxé en premier lieu manuellement puis à l'aide d'un malaxeur mécanique. Les résultats sont montrés au tableau (3.2).

N°	Mélange	Ratio	Θ (%)	W (%)
1	l'air	0.0116	0.00	-
2	l'eau	3.1721	100.00	-
3	sable sec	0.0354	0.00	0.11
4	sable + eau	1.7324	33.17	20.48
5	"	1.5555	29.98	17.42
6	"	0.6783	11.92	6.64
7	"	0.7412	12.80	7.29
8	"	0.7817	13.69	7.86
9	"	0.9223	16.30	14.10
10	"	0.1264	3.21	2.36
11	"	0.5395	10.00	9.93
12	"	0.8358	15.00	14.9
13	"	1.2550	20.00	19.86
14	"	1.4032	27.68	27.50
15	sable + eau + Filler	1.2469	20.91	12.66
16	"	1.5602	28.64	14.47
17	"	1.7171	31.26	15.96
18	"	2.1084	38.11	23.65
19	kaolinite + eau	3.0568	75.92	20.0
20	"	2.9822	71.10	93.6
21	"	2.8037	54.63	48.23
22	"	2.8843	60.21	56.83
23	"	2.9064	67.35	76.01
24	"	2.9572	67.86	79.02
25	"	2.9819	69.72	83.46
26	kaolinite + eau + sable	2.6065	44.89	30.68
27	"	2.5326	42.05	27.34
28	kaolinite + eau + sable + filler	2.4464	40.32	25.54

Tableau (3.2): Résultats de la calibration au laboratoire (D'après Silvestri et al., 1989)

3.2.6 Courbe de calibration de l'appareil

Le manuel de l'appareil (CPN 1985) précise qu'un minimum de vingt points est nécessaire pour établir une courbe de calibration représentative. Dans notre cas, 48 points ont été utilisés pour l'établissement de la courbe de calibration, dans laquelle la teneur en eau volumétrique varie entre 0 et 100%. Pour fin de calcul pratique, une régression polynominale a été obtenue. Parmi les régressions effectuées, celle d'ordre 5 (voir fig. 3.4) a été retenue grâce à sa faible variance.

L'équation de cette courbe est la suivante:

$$\theta\% = 18.520\ R + 0.682\ R^2 + 0.373\ R^3 - 1.163\ R^4 + 0.433\ R^5 \qquad (3.1)$$

La courbe de calibration pour une teneur en eau volumétrique inférieure à 35% est une droite ayant une pente de 18.75. Au delà de cette valeur la pente change subitement et l'équation de la courbe est donnée par la relation (3.1).

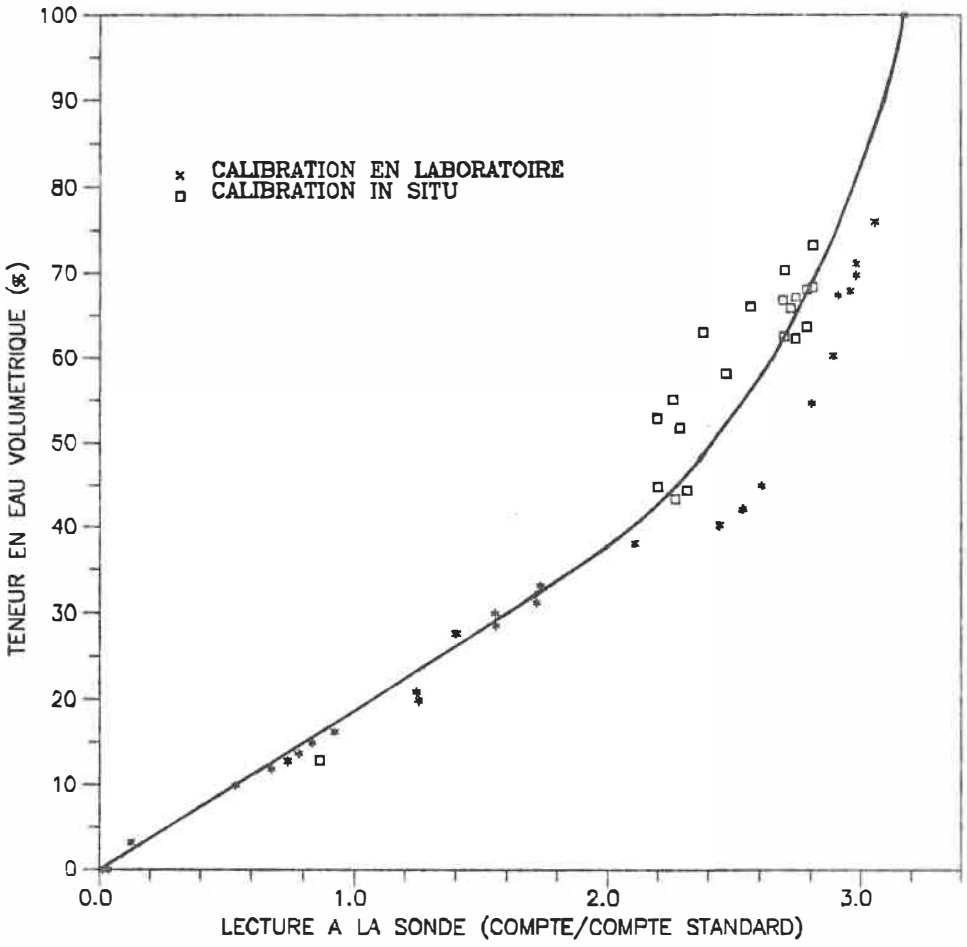


Figure 3.4
Courbe de calibration de la sonde à neutrons

3.3 Site no.1 (Hôtel de ville de Montéal-Est) (Silvestri et al.,1989)

3.3.1 Déscription du site et de l'édifice

L'Hôtel de ville est situé au 11730 rue Notre-Dame à Montréal-est. L'édifice a deux étages avec sous sol et a été construit en 1937. Il a une forme rectangulaire et mesure 10.75 m de largeur par 21.42 m de longueur . La charpente est en béton armé. Le toit et le plancher sont constitués d'un système de poutre et dalles. Le type de fondation est un radier renforcé par des poutres transversales.

Le terrain entourant l'Hôtel de ville est relativement plat et possède une pente déscendante environ de 2.5 pourcent vers le nord et l'ouest, et de 3 pourcent vers le sud. Sur le côté ouest on trouve un gros arbre de type "catalpa" ayant un diamètre de 66 cm et une hauteur de 15 m, situé à une distance de 4.6 m de l'édifice. Sur le côté est on trouve un autre "catalpa" de 33 cm de diamètre et de 14 m de hauteur, situé à une distance de 5.6 m de l'édifice. Sur les quatres côtés du bâtiment, des rangées d'arbres du type "érable argenté" espacés de 6 à 10 m sont disposés parallèlement aux façades de l'édifice et à des distances de 18 m du côté nord et ouest, et 4.5 m du côté sud (voir fig. 3.5).

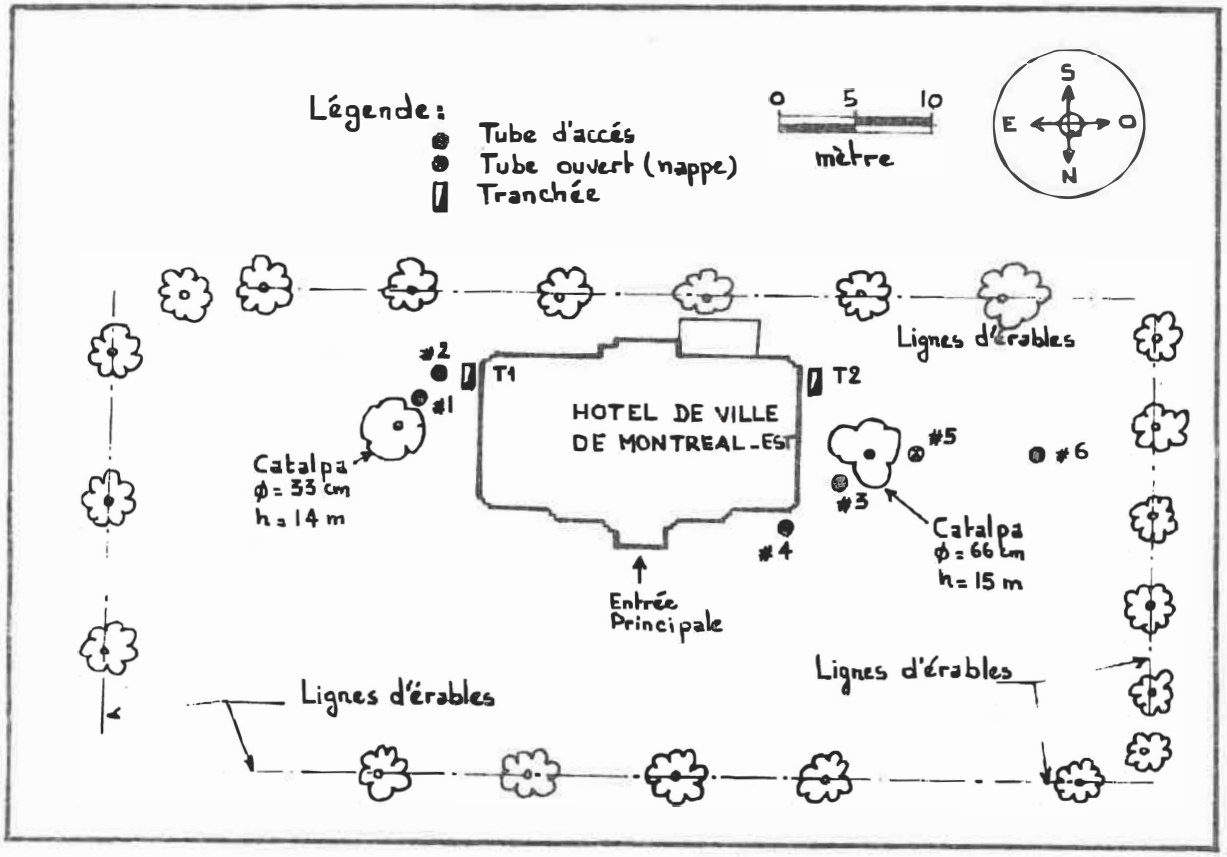


Figure 3.5
Plan du site no.1 (Hotel de ville)

3.3.2 Investigations sur terrain et en laboratoire

En premier temps, on a creusé deux tranchées de reconnaissance de 2.7 m de profondeur à l'aide d'une rétrocaveuse mécanique, respectivement au coins sud-est et sud-ouest à l'endroit où des tassements ont été observés (voir fig. 3.5). Des échantillons remaniés ont été à prélevés à différentes profondeurs. ces échantillons ont été ensuite transportés au laboratoire afin de déterminer leurs propriétés géotechniques, notamment la teneur en eau, les limites de consistance, la granulométrie et la résistance de cisaillement non drainé au cône suédois. Les résultats de ces essais apparaîssent sur les rapports de forage montrés aux figures 3.6 et 3.7 (Sivestri et al., 1989).

La stratigraphie du site pour les trois premières mètres est formée essentiellement de:

i) **Terre végétale:**

Une couche de terre végétale de 20 cm a été recontrée à la surface des deux tranchées.

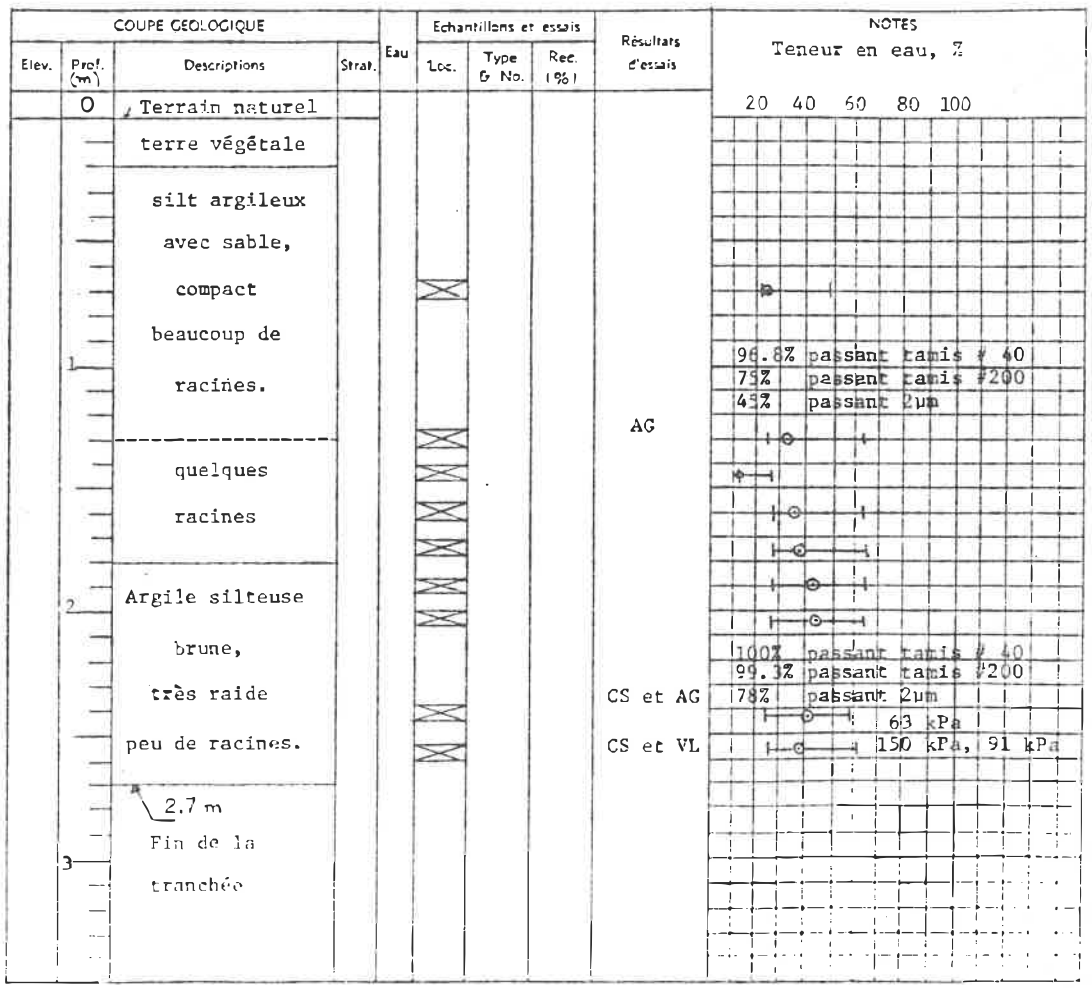


Figure 3.6
Rapport de tranchée #1 (Hotel de ville)

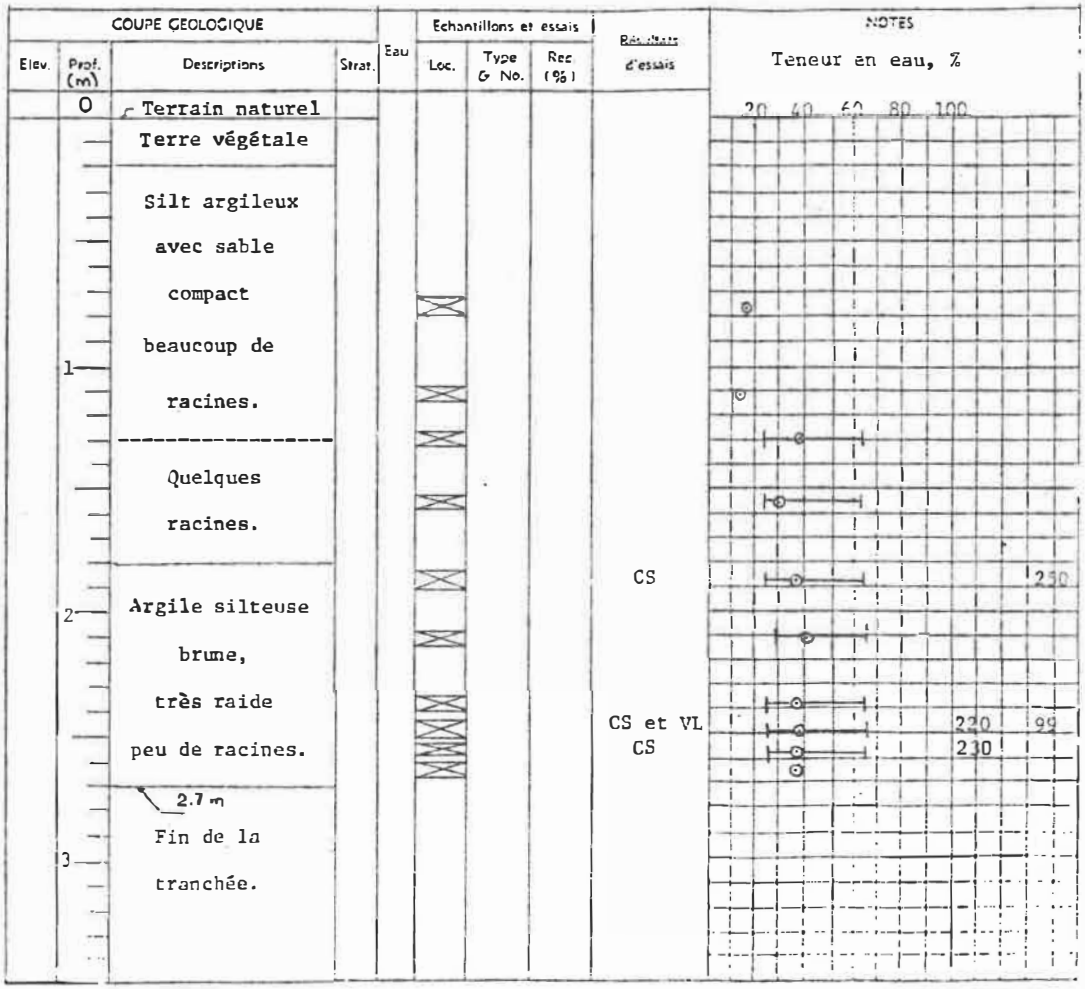


Figure 3.7
Rapport de tranchée #2 (Hotel de ville)

ii) **Silt argileux avec sable:**

Sous la couche de terre végétale, les tranchées ont montré un dépôt de silt argileux avec sable compact de couleur brun. Son épaisseur est de 1.8 m. Beaucoup de racines ont été observées dans cette couche. Les teneurs en eau varient de 15 à 40%.

iii) **Argile silteuse:**

Directement sous le dépôt de silt décrit précédemment, on rencontre un dépôt d'argile brune et trés raide. Peu de racines ont été observées dans le sol. Les teneurs en eau variées de 37 à 45% , la limite de liquidité est de 65% et la limite de plasticité est de 25 à 28% .

Dans un deuxième temps, on a exécuté à l'aide d'une tarière mécanique cinq forages de 3 m de profondeur et 5 cm de diamètre. Puis on a installé des tubes d'accés en aluminium de même dimension, fermés à leur extrémités inférieures, pour mesurer périodiquement à l'aide de la sonde à neutrons la teneur en eau volumétrique à différentes profondeurs (voir fig. 3.8). Un autre forage de 5 mètres de profondeur et de 6 cm de diamètre a été réalisé pour installer un tube ouvert en PVC en vue de suivre les

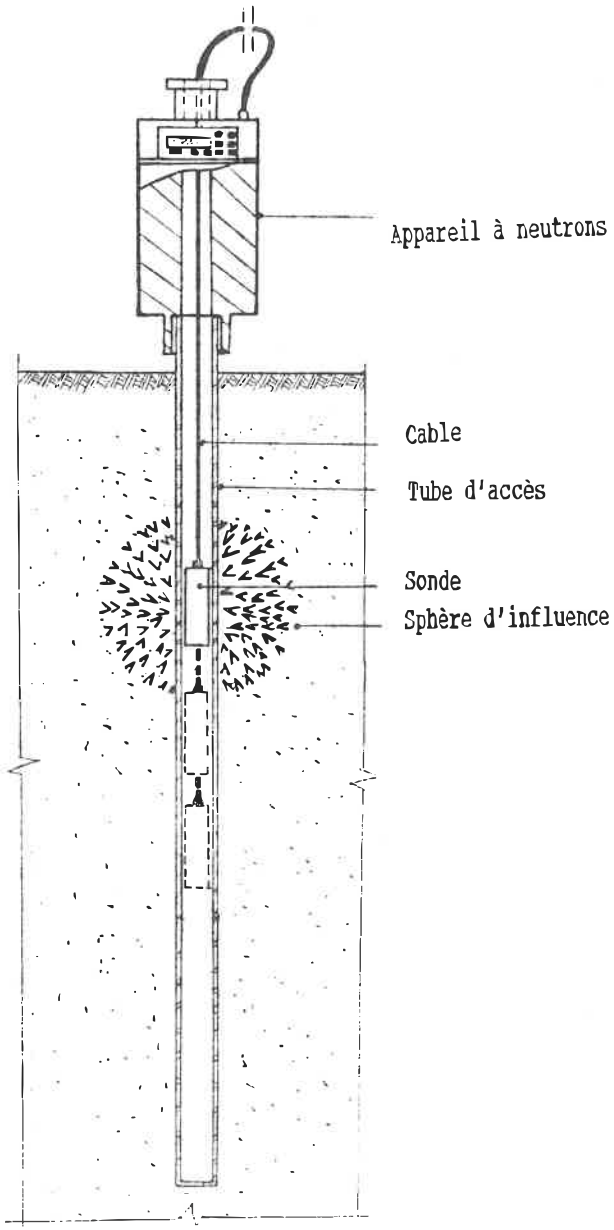


Figure 3.8
Mesure de la teneur en eau in-situ

fluctuations de la nappe.

3.3.3 Travaux d'arpentage

Des travaux de nivellement ont été effectués sur tout le périmètre de l'édifice afin de déterminer le tassement différentiel et de pouvoir suivre l'évolution du tassement avec le temps. Le tassement total de l'édifice n'a pas pu être mesuré puisqu'aucun relevé n'a été pris immédiatement aprés la construction. Selon les relevés fait en 1987, 1988 et 1989, on a constaté que l'arrière de l'édifice a tassé par rapport à l'avant, tel qu'indiqué à la figure 3.9 (Silvestri et al., 1989).

Les mouvements différentiels correspondants représentent des distorsions angulaires variant de 1/100 à 1/150. Selon les critères généralement acceptés, des distorsions de cet ordre peuvent causer des dommages structuraux et une fissuration considérables des murs . C'était le cas lors de nos relevés. Nous avons en effet constaté plusieurs fissures excessives dans les murs de fondations, les poutres et les dalles du rez de chaussée ainsi que sur les murs extérieurs et les cloisons (voir figs 3.10 à 3.14). Certaines de ces fissures sont récentes et datent probablement de l'année de sècheresse de 1978. Cependant vers la

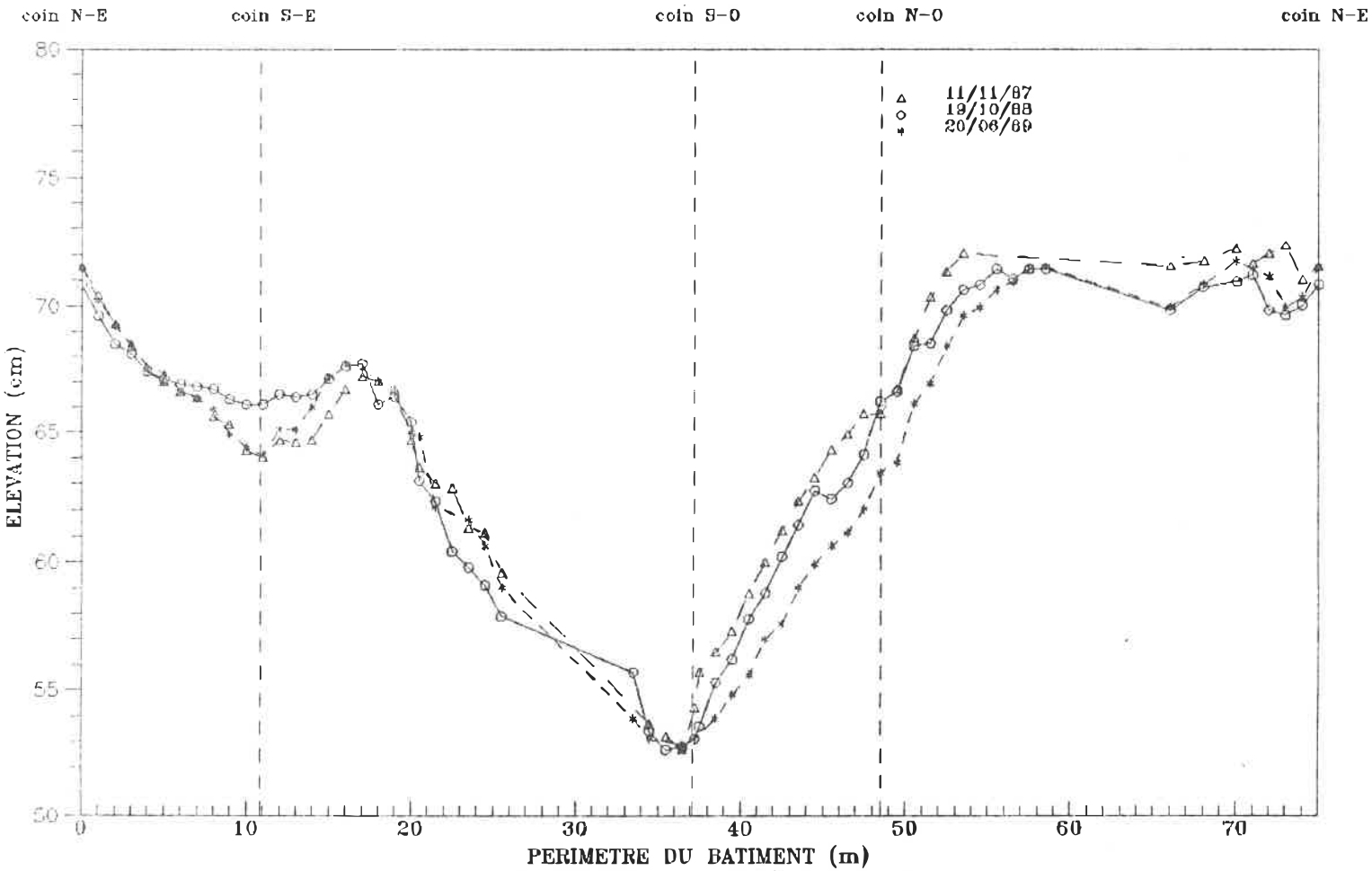


Figure 3.9
Tassements (Hotel de ville)

National Library
of Canada

Canadian Theses Service

Bibliothèque nationale
du Canada

Service des thèses canadiennes

NOTICE

AVIS

E QUALITY OF THIS MICROFICHE
HEAVILY DEPENDENT UPON THE
ALITY OF THE THESIS SUBMITTED
R MICROFILMING.

FORTUNATELY THE COLOURED
LUSTRATIONS OF THIS THESIS
N ONLY YIELD DIFFERENT TONES
GREY.

LA QUALITE DE CETTE MICROFICHE
DEPEND GRANDEMENT DE LA QUALITE DE LA
THESE SOUMISE AU MICROFILMAGE.

MALHEUREUSEMENT, LES DIFFERENTES
ILLUSTRATIONS EN COULEURS DE CETTE
THESE NE PEUVENT DONNER QUE DES
TEINTES DE GRIS.



Figure 3.10
Vue de la fissuration de la poutre dans la chambre de chauffage (Hôtel de ville)



Figure 3.11
Vue des dommages du palier d'escalier
(Hôtel de ville)



Figure 3.12
Vue du coin N.O montrant les dommages extérieurs
(Hôtel de ville).



Figure 3.13
Vue des dommages du cloison (Hôtel de ville)



Figure 3.14
Vue des dommages intérieurs (Hôtel de ville)

fin de l'été de 1983, les fissures se sont élargies et d'autres fissures importantes se sont développées.

3.4 Site no.2 (Epiphanie).(Silvestri et al., 1989)

3.4.1 Déscription de l'édifice et du site

La maison en question est une résidence unifamiliale à un étage avec sous-sol. Elle a été construite en 1956 à côté d'un fossé encore existant aujourd'hui et qui longe le côté ouest de la résidence. Le comportement de la structure était satisfaisant jusqu'au mois d'aout 1987, quand des fissures importantes sont apparues dans le coin sud-ouest de la résidence (voir fig. 3.15). Certains travaux ont été effectués il y a quelques années à l'emplacement d'un ancien balcon en béton. Ce dernier a été fissuré et les propriétaires ont décidé de le remplacer par un solarium en bois. En aout 1987 les supports de ce dernier ont commencé à perdre leur verticalité.

La maison repose sur un mur de solage en béton, qui repose à son tour sur une semelle filante faiblement armée.

Le terrain entourant la maison est presque entièrement couvert de gazon, et limité du côté ouest par un fossé



Figure 3.15
Vue des dommages causés au coin S.O (Epiphanie)

situé à 8m de la résidence. Du même coté, on a deux rangées d'arbres formées de 7 érables et un saule situés respectivement à 7.25 m et 9.70 m de la maison. Ces arbres ont un diamètre moyen de 20 cm et une hauteur moyenne de 12 m.

A l'arrière de la maison le terrain est relativement incliné, avec une pente de 5%. On y trouve deux saules ayant une hauteur de 15 m et un diamètre de 50 cm, qui sont situés recpectivement à des distances de 15.8 m et 24.3 m de la maison . Pour plus de détails voir le plan de la maison avec le terrain qui l'entoure montré à la figure 3.16.

3.4.2 Investigations in-situ et au laboratoire

Trois tranchées de reconnaissance ont été creusées aux endroits indiqués à la figure 3.16. Des échantillons ont été prélevés dans ces tranchées afin de déterminer les propriétés physiques et mécaniques; notamment les teneurs en eau naturelles, les limites de consistance et la résistance au cisaillement non drainée. Les résultats sont présentés dans les rapports des tranchées (voir figs. 3.17 à 3.19).

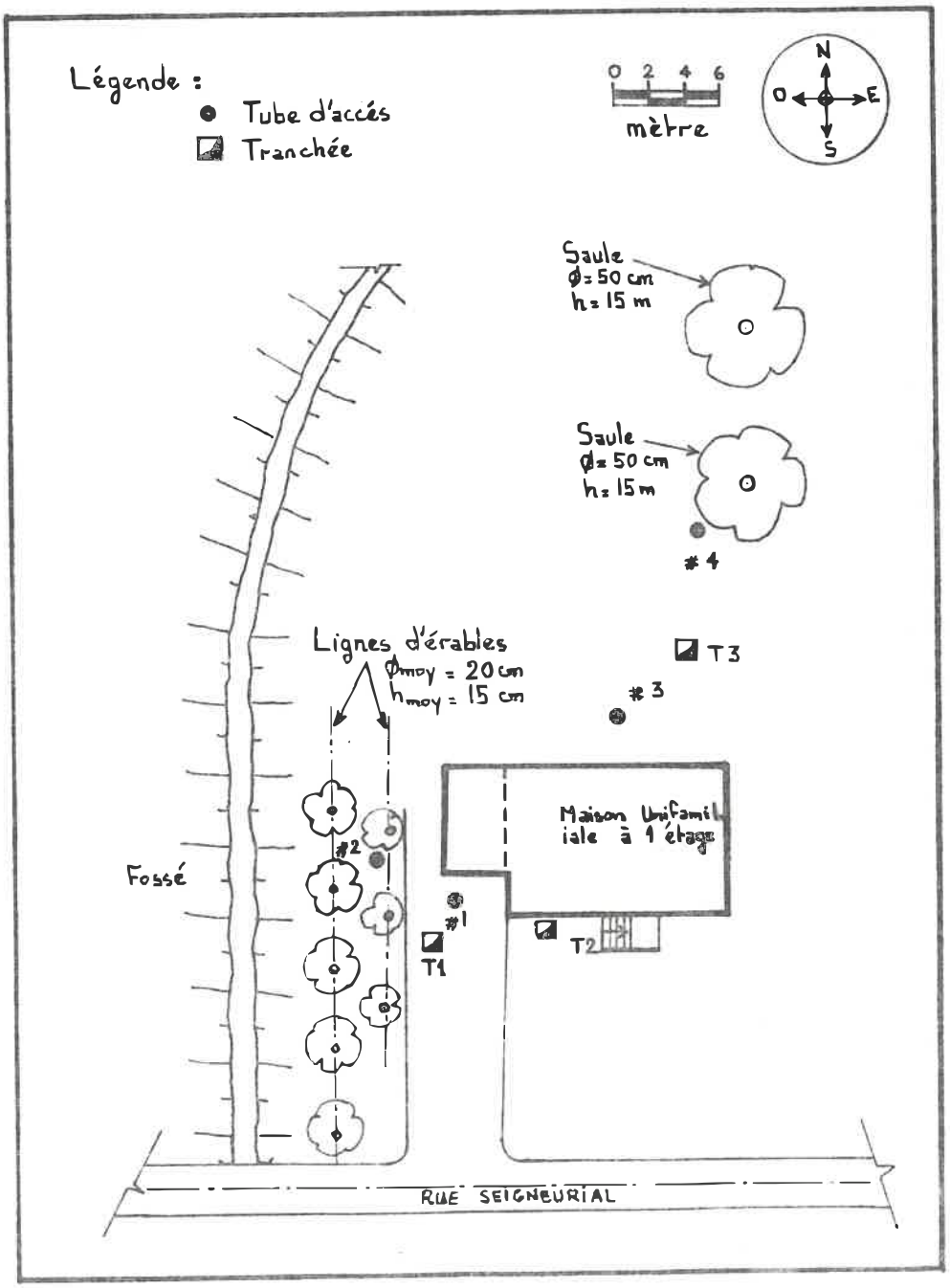


Figure 3.16
Plan du site no.2 (Epiphanie)

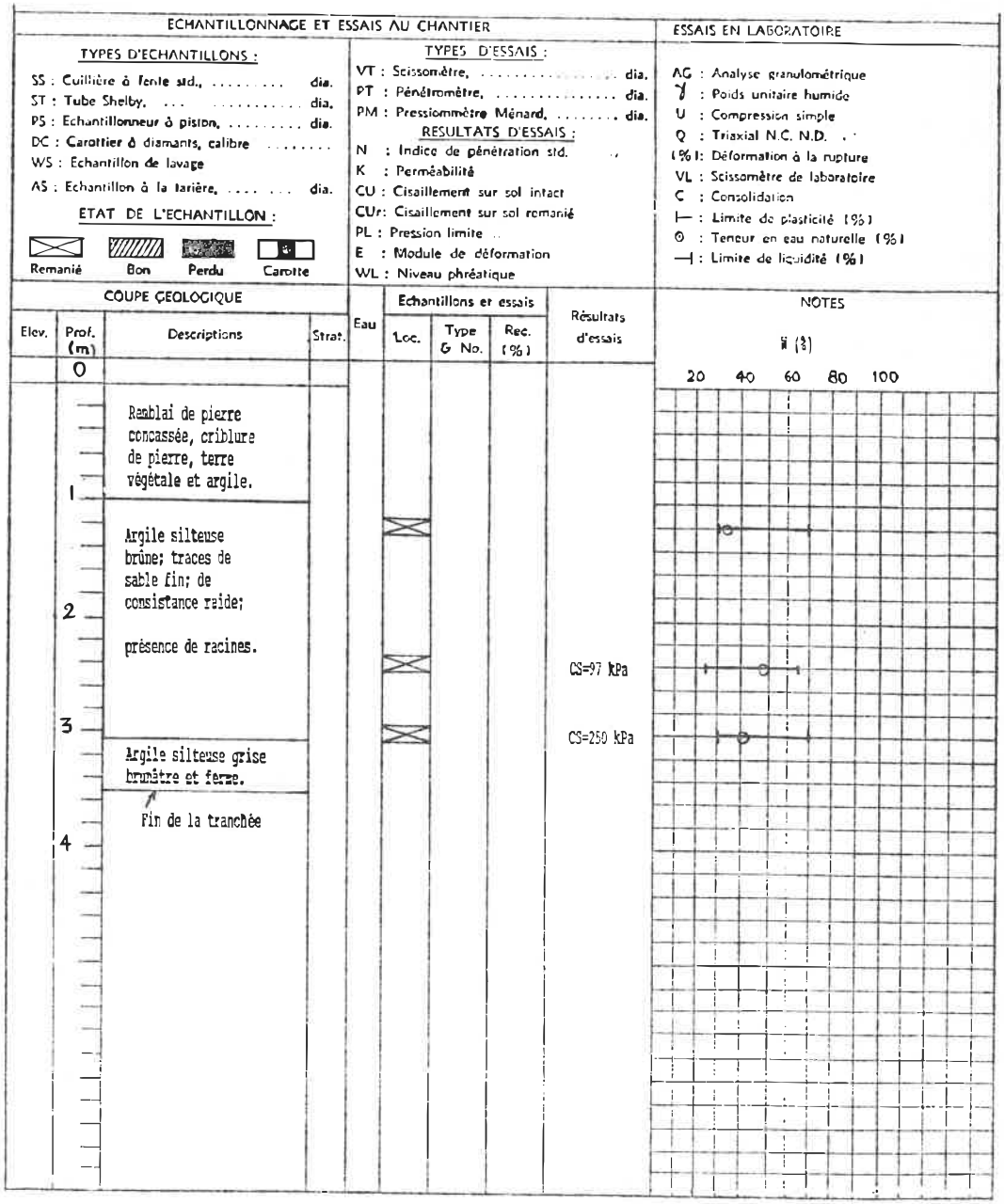


Figure 3.17
Rapport de la tranchée #1 (Epiphanie)

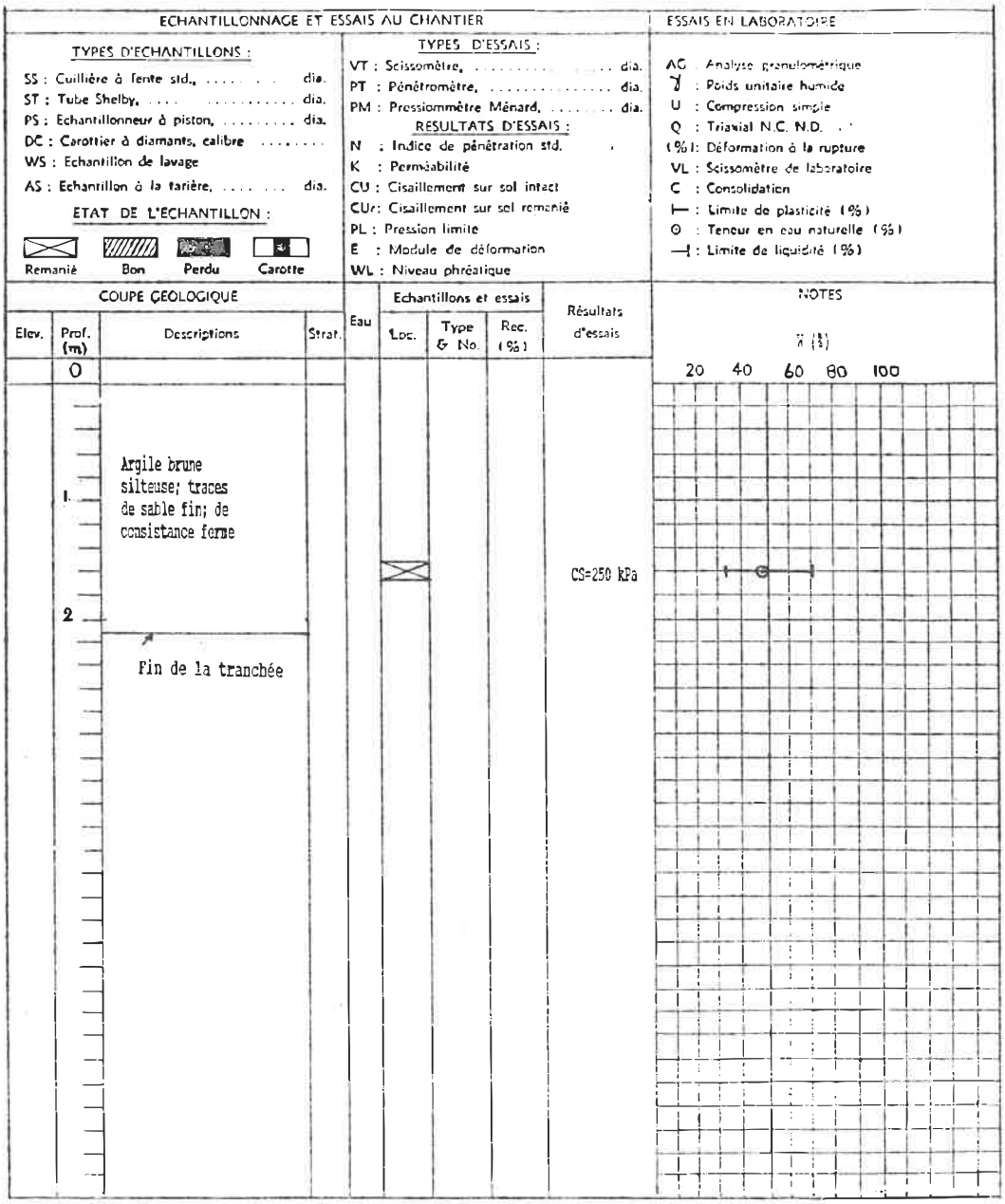


Figure 3.18
Rapport de la tranchée #2 (Epiphanie)

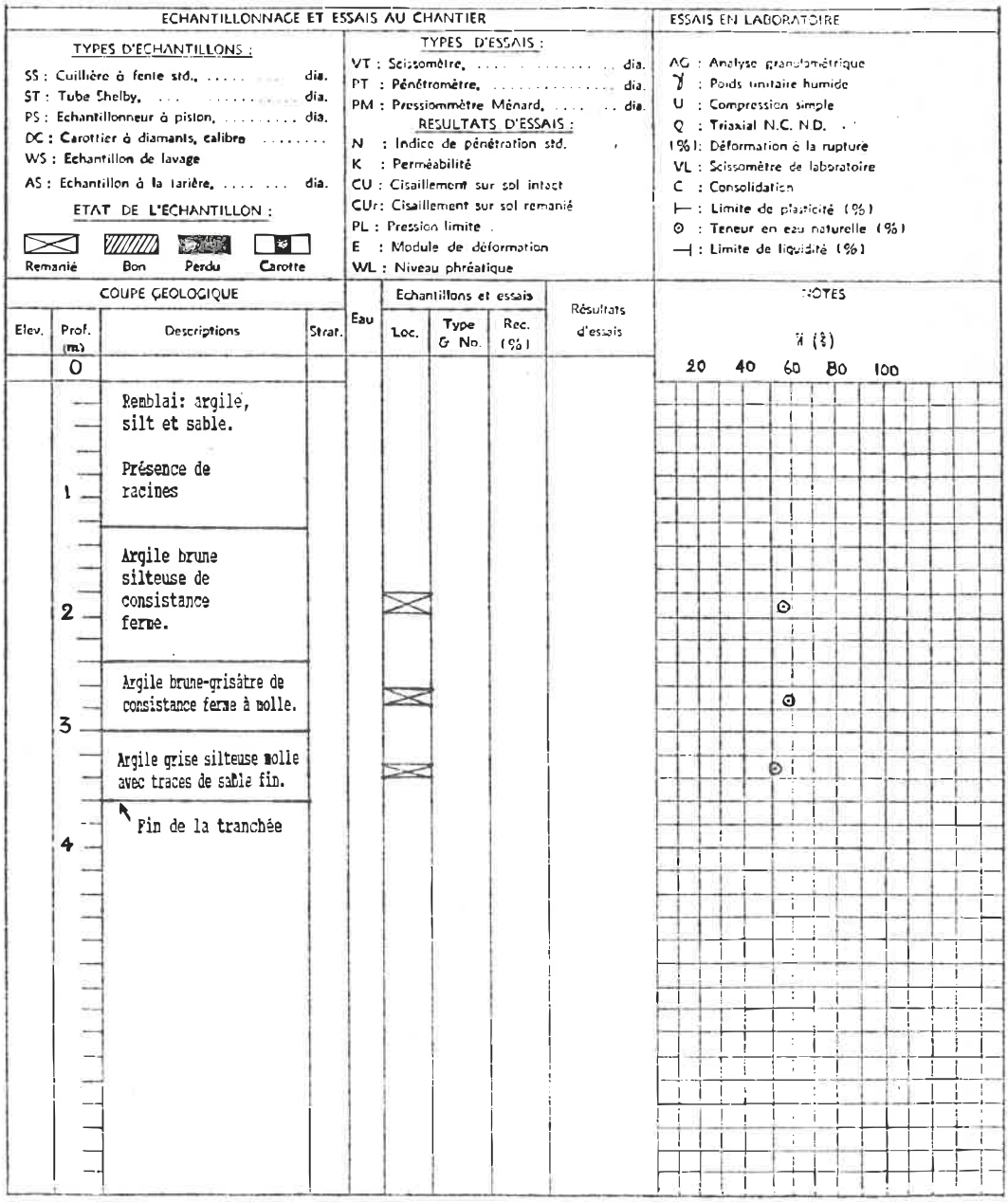


Figure 3.19
Rapport de la tranchée #3 (Epiphanie)

La stratigraphie du site est essentiellement formée de:

i) une couche de remblai de 1.0 à 1.25 m d'épaisseur,

ii) un dépot d'argile silteuse brûne avec des traces de sable se situe entre 1.0 et 3.0 m de profondeur avec une teneur en eau de 40%,

iii) L'argile brûne est suivie d'une argile silteuse grise de consistance ferme à molle avec une teneur en eau de 50%.

Lors de l'analyse des échantillons au laboratoire, on a remarqué que la teneur en eau du sol à l'avant de la maison (sondages #1 et #2) est plus faible que celle que l'on retrouve à l'arrière de la maison (sondage #3). Ceci est dû probablement à la présence de la ligne d'arbres prés de l'avant de la maison. On a remarqué aussi lors du creusage des sondages #1 et #2 la présence de racines jusqu'à une profondeur de 3.3 m, tandis qu'aucune présence de nappe n'a été observée.

Quand les travaux de reconnaissance furent terminés, quatre tubes en aluminium fermés à leurs extrémités inférieures, de 3 m de longueur et de 5 cm de diamètre, ont

été installés aux emplacements montrés à la figure 3.16. Ces tubes servent d'accès à la sonde à neutrons pour mesurer périodiquement la teneur en eau du sol. Afin de pouvoir suivre les fluctuations de la nappe, le tube d'accès no.1 a été remplacé par un autre tube ouvert en PVC.

3.4.3 TRAVAUX D'ARPENTAGE

Comme pour le site no.1, des travaux d'arpentage ont été effectués afin de localiser la position des arbres et des tubes par rapport à la maison. Pour qu'on puisse évaluer le tassement différentiel que la bâtisse a subi, on a éffectué des relevés de nivellement tout au tour de la maison (voir fig. 3.20). Cette figure montre que la maison a été l'objet des mouvements différentiels représentant des distorsions angulaires très élevées surtout au coin sud-ouest, là où la distorsion est de 18%. Selon les normes, des distorsions de cet ordre causent des dommages structuraux et des fissurations très appréciables aux murs et cloisons. C'est exactement ceci que nous avons constaté lors de nos relevés où des fissures ont atteint un maximum de 5 cm de largeur (voir fig. 3.21).

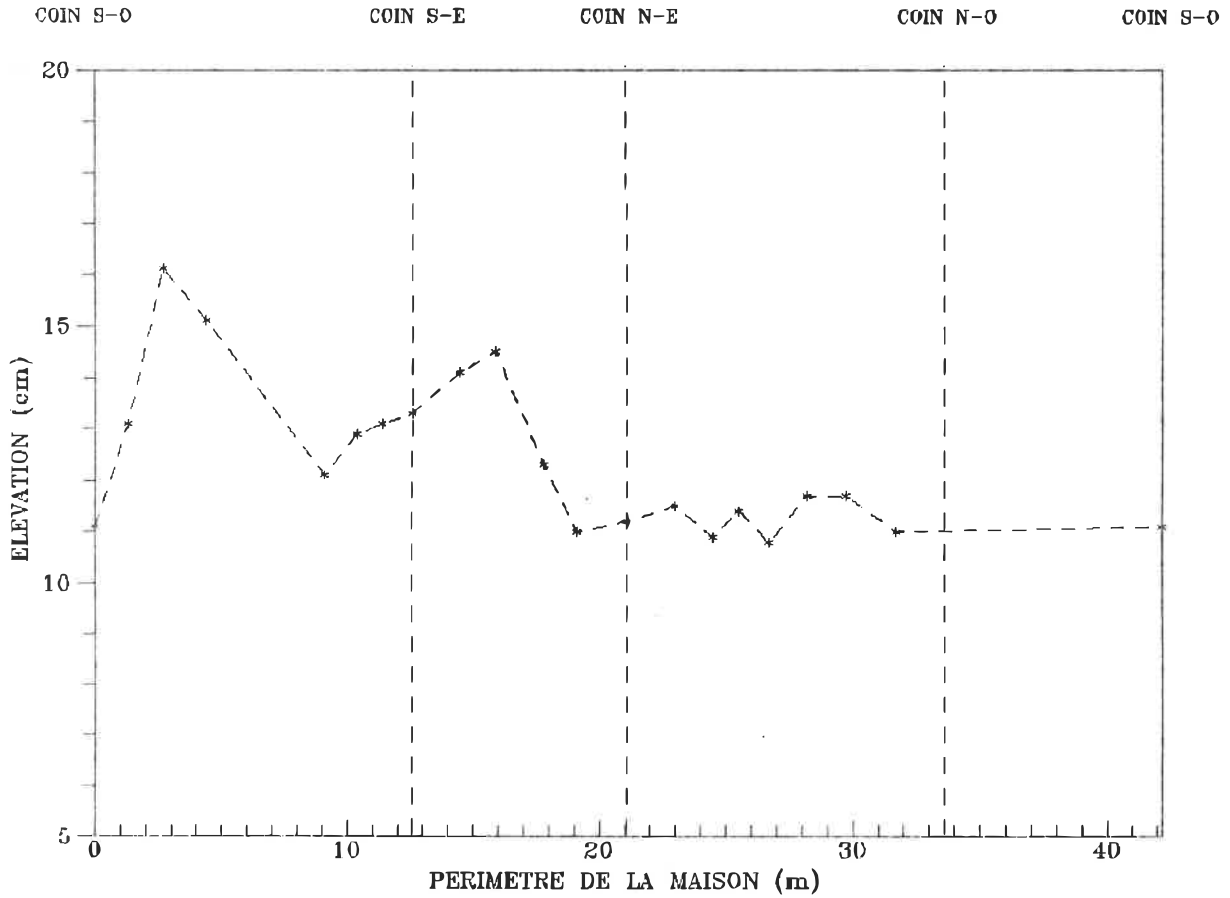


Figure 3.20
Tassements (Epiphanie)



Figure 3.21
Vue des dommages intérieurs (Epiphanie,

3.5 Site no.3 (Parc Maisonneuve) (Silvestri et al.,1989)

Afin d'étudier l'effet des arbres et l'ampleur de dessèchement qu'ils peuvent causer aux sols argileux dans un milieu naturel, on a choisi un autre site dans le parc De Maisonneuve loin de la ville de Montréal. On y étudie l'effet de quatre essences d'arbres à croissance rapide (un orme, un peuplier à feuilles daltoniennes, un érable et une ligne de peupliers de Lombardie) poussant dans un sol argileux.

3.5.1 Déscription du site

Le choix du site pour chacune des essences d'arbres à étudier a été fait sur la base que le terrain dans lequel pousse l'arbre soit argileux et loin de l'effet des facteurs qui peuvent influencer la teneur en eau du sol autres que les arbres à étudier (rivière, fossé,...). Aprés avoir contacté les autorités de la ville de Montréal, on a réussit a obtenir un site dans le parc Maisonneuve qui répond à tous les exigences citées ci-haut.

Dans le parc, on a retenu quatre endroits où poussent les espèces d'arbres choisis. Le premier et le second endroits sont prés l'un de l'autre. Sur le premier pousse

un orme ayant une hauteur de 22 m et un diamètre de 97 cm tandis que sur le deuxième pousse un érable de 20 m de hauteur et 150 cm de diamètre. Le terrain qui les entoure est plus ou moins plat et couvert de gazon. Sur le troisième site, on trouve une ligne de peupliers de Lombardie, espacés de 2.9 m et ayant une hauteur moyenne de 18.5 m et un diamètre moyen de 30 cm. Le quatrième site est un terrain gazonné, trés peu accidenté et on y trouve un peuplier à feuilles daltoniennes ayant une hauteur de 30 m et un diamètre de 82 cm.

3.5.2 Travaux in-situ et au laboratoire

On a commencé par mesurer le diamètre et la hauteur de chacune des espèces d'arbres à étudier. Afin de vérifier le champ d'action de chacune des espèces d'arbres, sept tubes d'accés ont été installés à différentes distances des arbres, le long d'un rayon unique. Ces distance sont en fonction de la hauteur h de l'arbre , sauf pour l'orme où on n'a placé que trois tubes d'accés de l'orme (voir figs. 3.22 à 3.25). Trois tubes en PVC de 4.5 m de long ont été placés sur le premier, le deuxième et le quatrième sites afin de pouvoir suivre les fluctuations de la nappe.

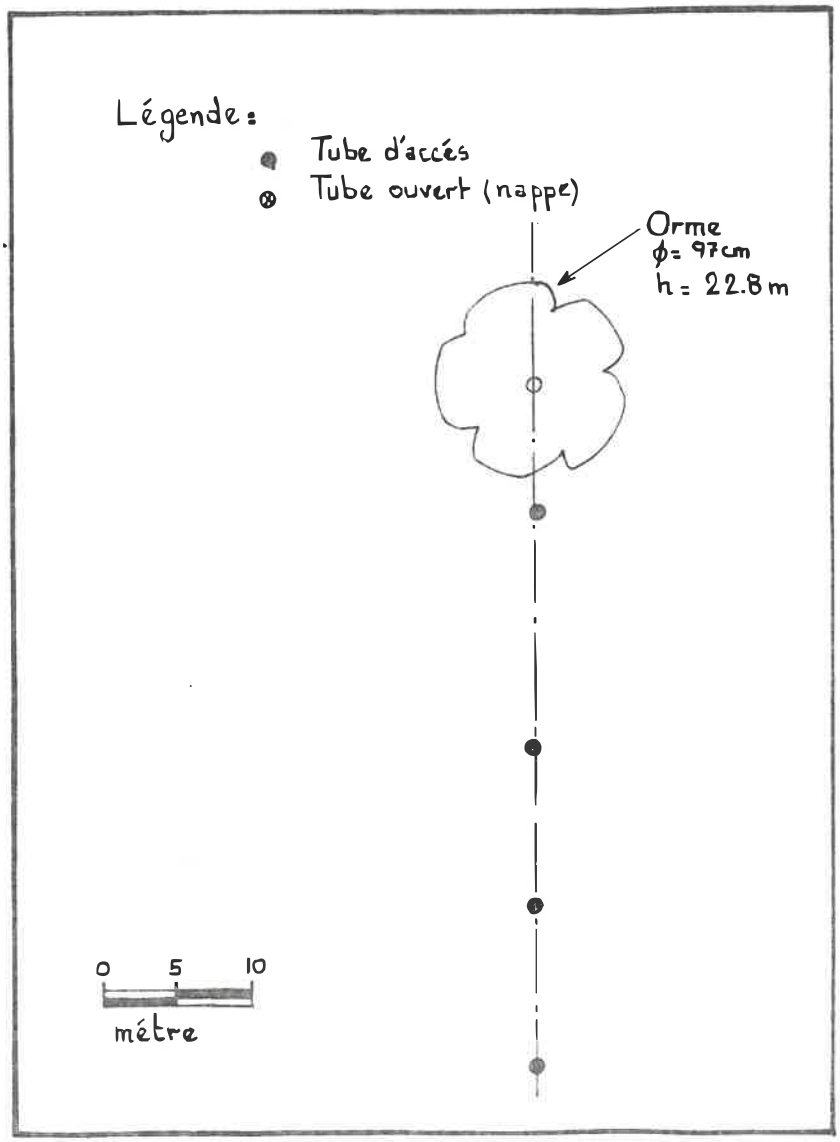


Figure 3.22
Plan de l'instrumentation du site no.3 (orme)

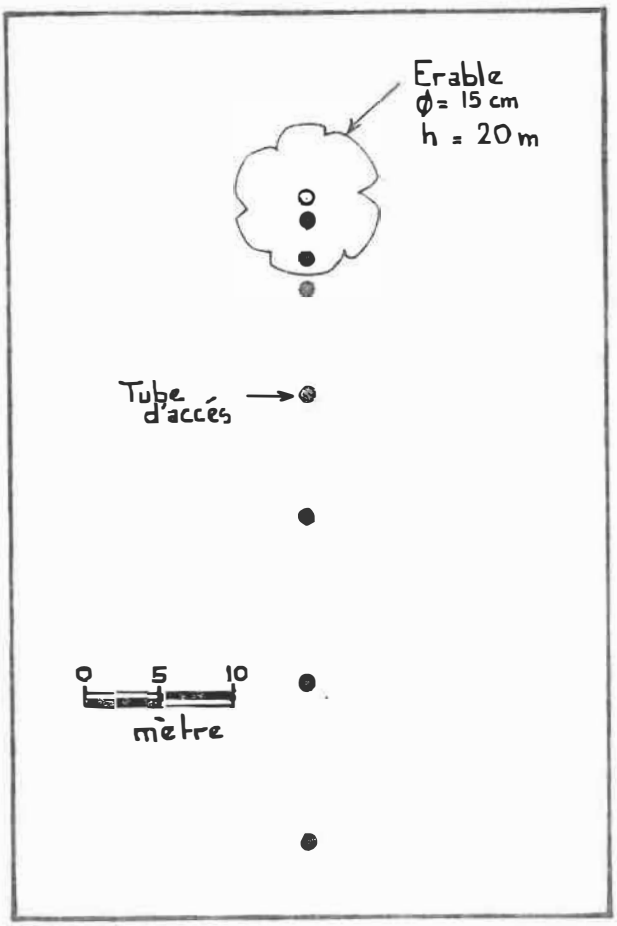


Figure 3.23
Plan de l'instrumentation du site no.3 (érable)

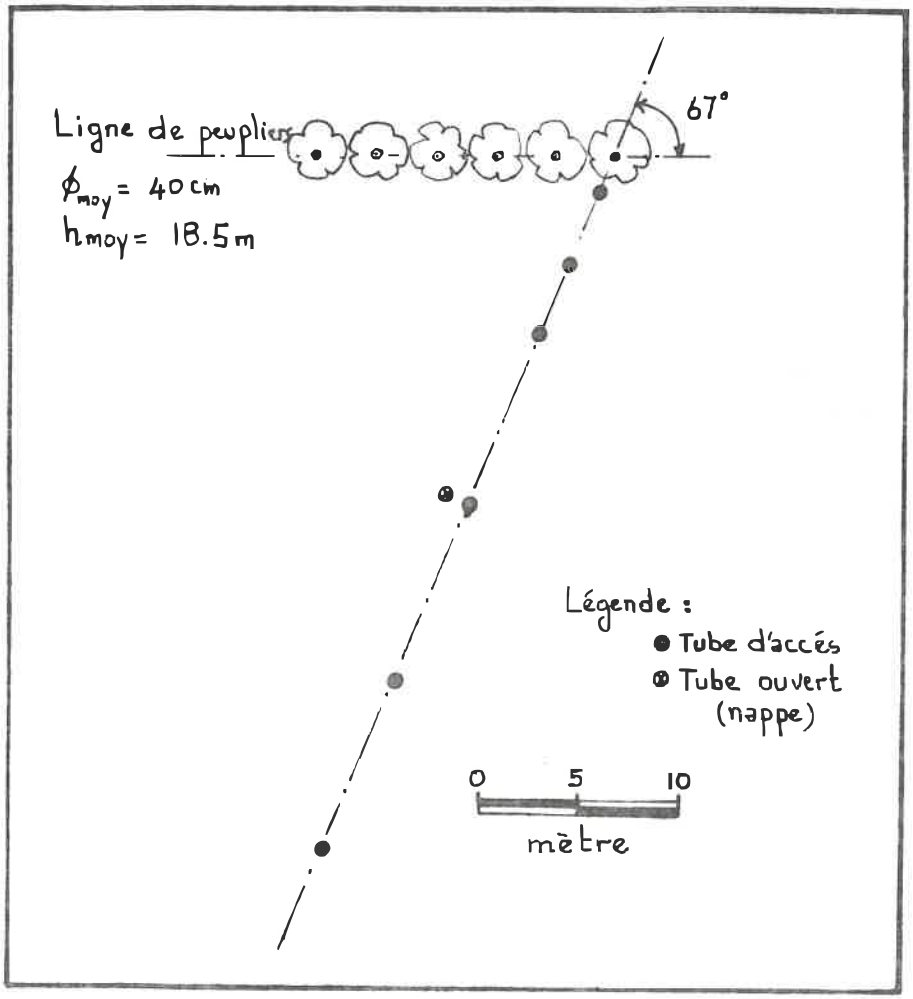


Figure 3.24
Plan de l'instrumentation du site no.3
(ligne de peupliers)

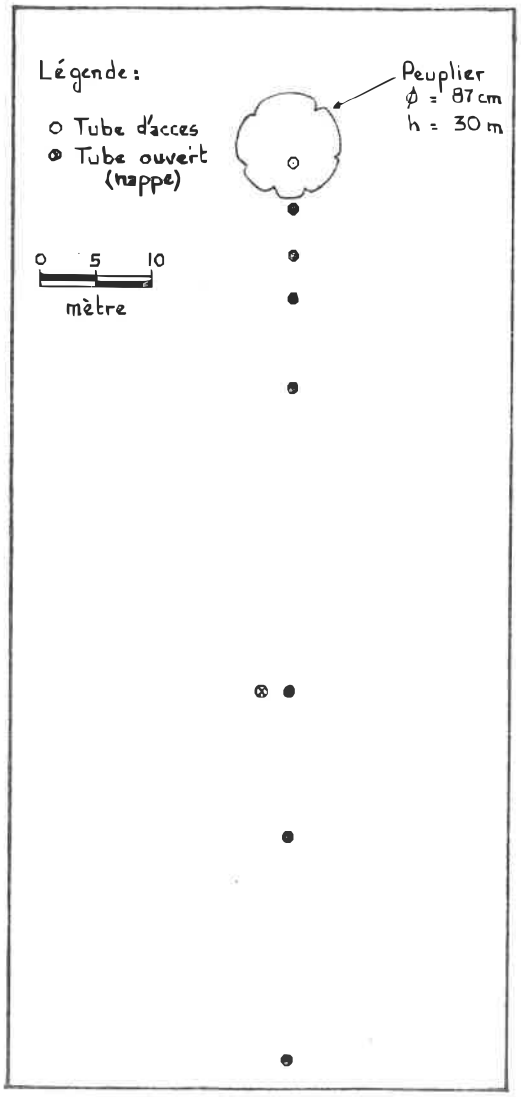


Figure 3.25
Plan de l'instumentation du site no.3 (peuplier)

Afin d'avoir une idée des propriétés géotechniques du site, on a creusé 2 tranchées de reconnaissance et des échantillons ont été prélevés à différentes profondeurs. Les propriétés de ces échantillons récupérés ont été évaluées par des essais au laboratoire et les résultats sont montrés dans le rapport de tranchée (voir fig. 3.26).

La stratigraphie est formée essentiellement de:

i) un remblai de sable silteux et du silt argileux avec des traces de sable et matière organique, entre 0 et 90 cm de profondeur; et

ii) une argile brune fissurée avec des traces de matière organique ayant une teneur en eau de 47%, située entre 0.9 m et 2.1 m de profondeur.

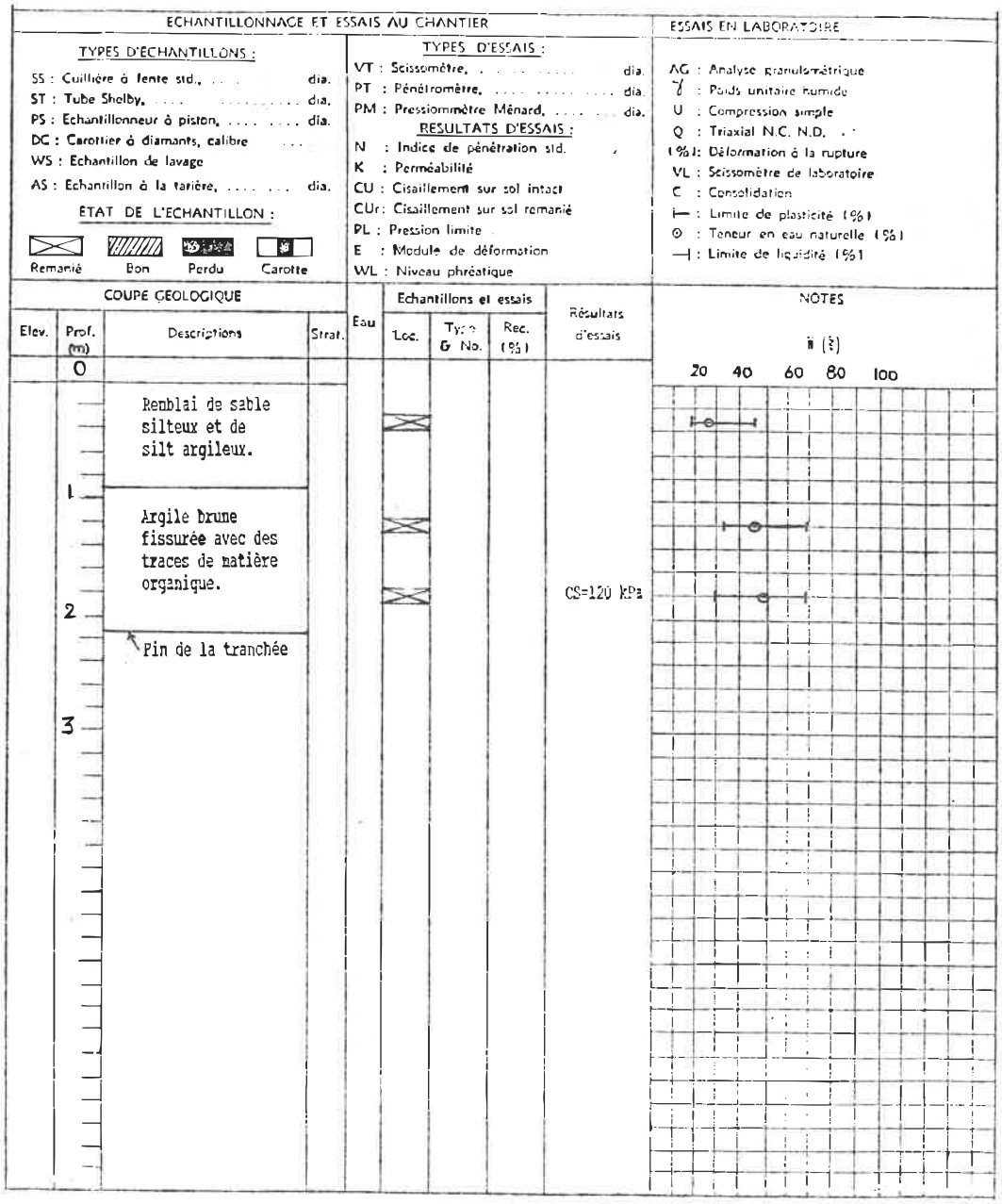


Figure 3.26
Rapport de Tranchée, site no.3 (Parc Maisonneuve)

CHAPITRE 4

ANALYSES ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

4.1 Généralités

Dans ce chapitre, en premier lieu, on discutera des résultats de mesure de teneur en eau in-situ pour les deux sites décris au chapitre précédent et sur lesquels deux édifices ont été endommagés: l'édifice de l'Hotel de ville et la maison unifamiliale à l'Epiphanie. On va essayer de relier les tassements différentiels calculés à partir des profils de la teneur en eau du sol à ceux mesurés, et le déficit calculé à partir des mesures in-situ de la teneur en eau à celui estimé par des formules empiriques ou analytiques. On analysera ensuite les mesures de la teneur en eau du sol pour chacune des essences d'arbres du site #3.

4.2 Etude de cas

4.2.1 Hotel de ville (site no.1)

Selon les détails obtenus, les fissures ont commencé à apparaître en été 1978. Cependant vers la fin de l'été 1983, les fissures se sont élargies et d'autres fissures importantes sont apparues. En mai 1988, les responsables

de la ville de Montréal-est ont décidé de couper tous les arbres qui sont situés près de l'édifice. Parmi les arbres qui ont été coupés on retrouve les deux Catalpas sur les côtés est et ouest, et la ligne d'érables argentés sur le côté sud (voir fig 3.5).

Les constations qu'on peut tirer des figures 4.1 et 4.2 sont les suivantes: en hiver, il n'y a presque pas de différences de teneurs en eau du sol entre les profils mesurés autour des tubes d'accès #1 à #4, sauf à l'endroit du tube d'accès #6 où on constate que les profils de teneur eau du sol sont plus faibles surtout entre 1.5 et 2.8m de profondeurs. Tandis qu'au printemps, après la fonte des neiges, les profils de teneur en eau du sol tendent à revenir à leur état le plus humide et tous les profils tendent à coïncider (voir figs 4.3 et 4.4).

En été 1988, et plus précisemment après l'abattage des arbres le 22/05/88, la teneur en eau du sol à l'endroit du tube d'accès #6 commence à devenir plus faible et par conséquent les profils à l'endroit de ce tube commencent à s'éloigner par rapport aux profils des autres tubes, cette diminution étant surtout en profondeur (voir figs 4.5 à 4.8). En automne cette variation de la teneur en eau du sol s'amplifie et atteindra son maximum (voir figs 4.9 et

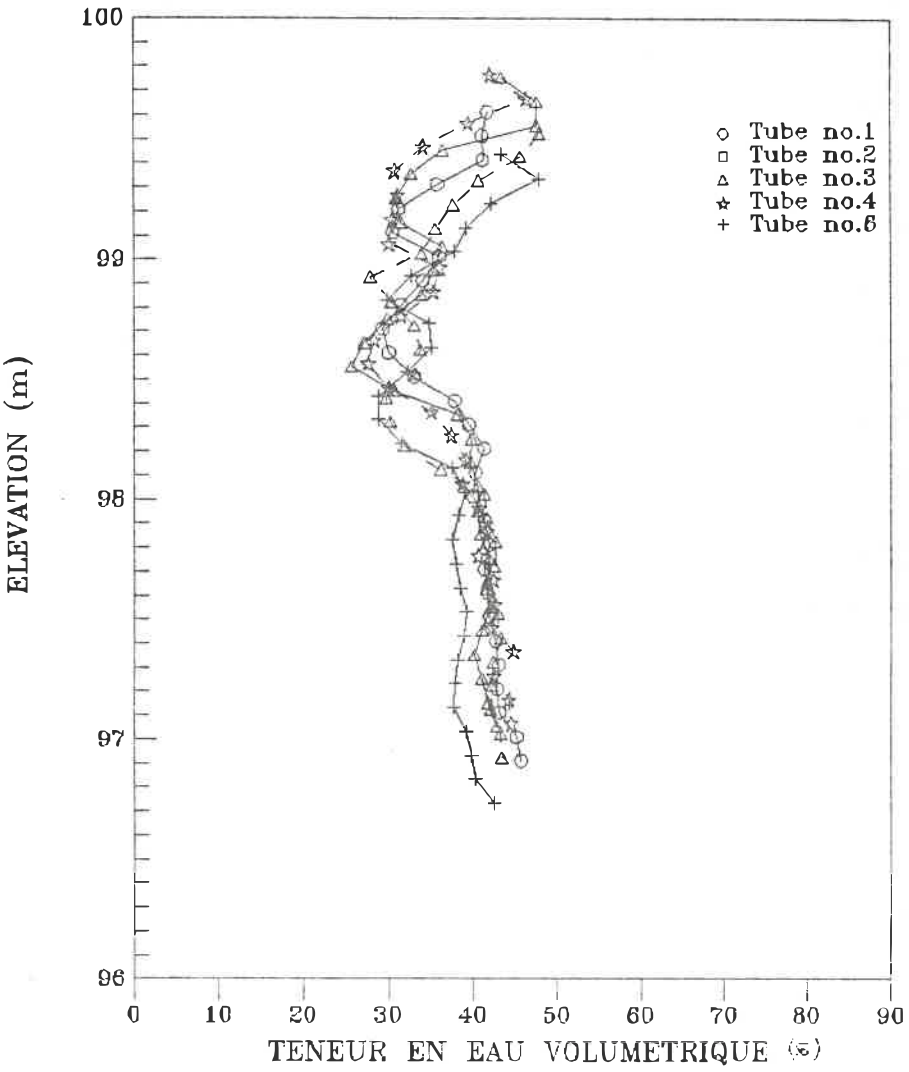


Figure 4.1
Profils de teneur en eau du sol pour différents tubes à l'hotel de ville (date de lecture: 15-03-88)

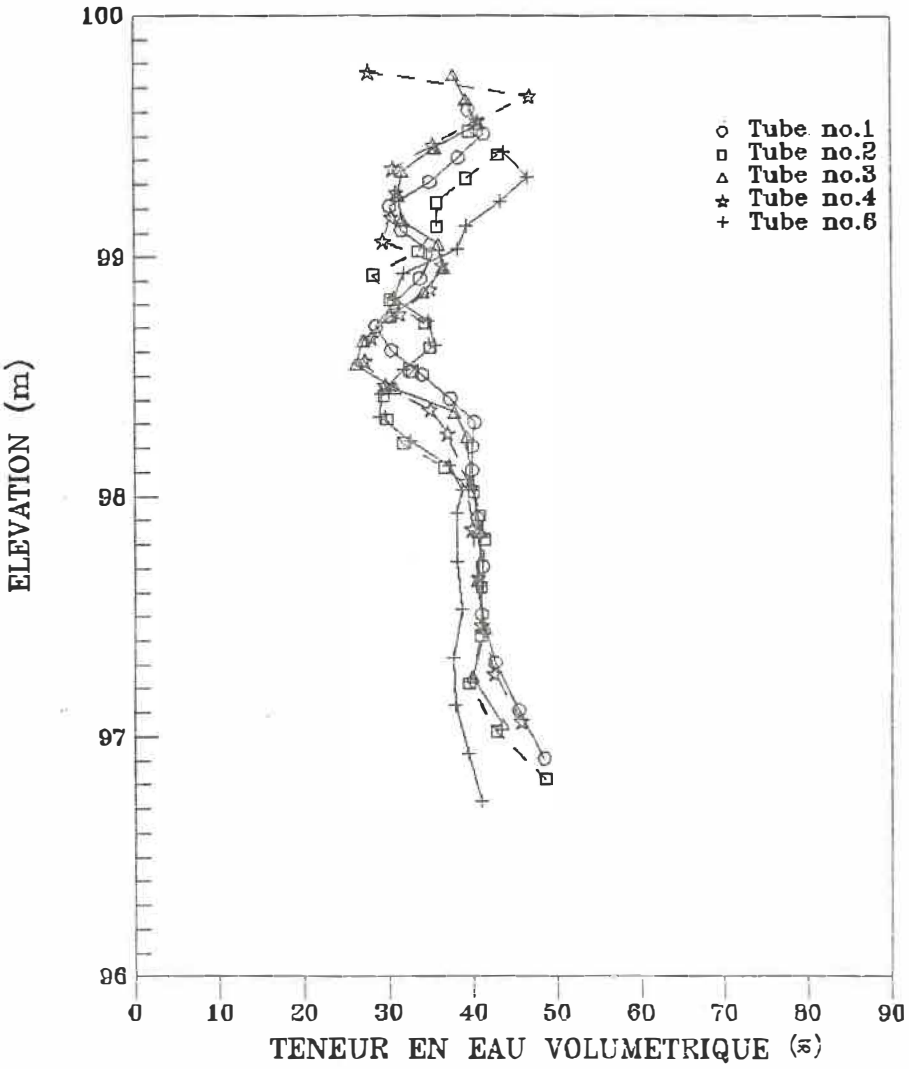


Figure 4.2
Profils de teneur en eau du sol pour différents tubes à l'hotel de ville (date de lecture: 01-02-88)

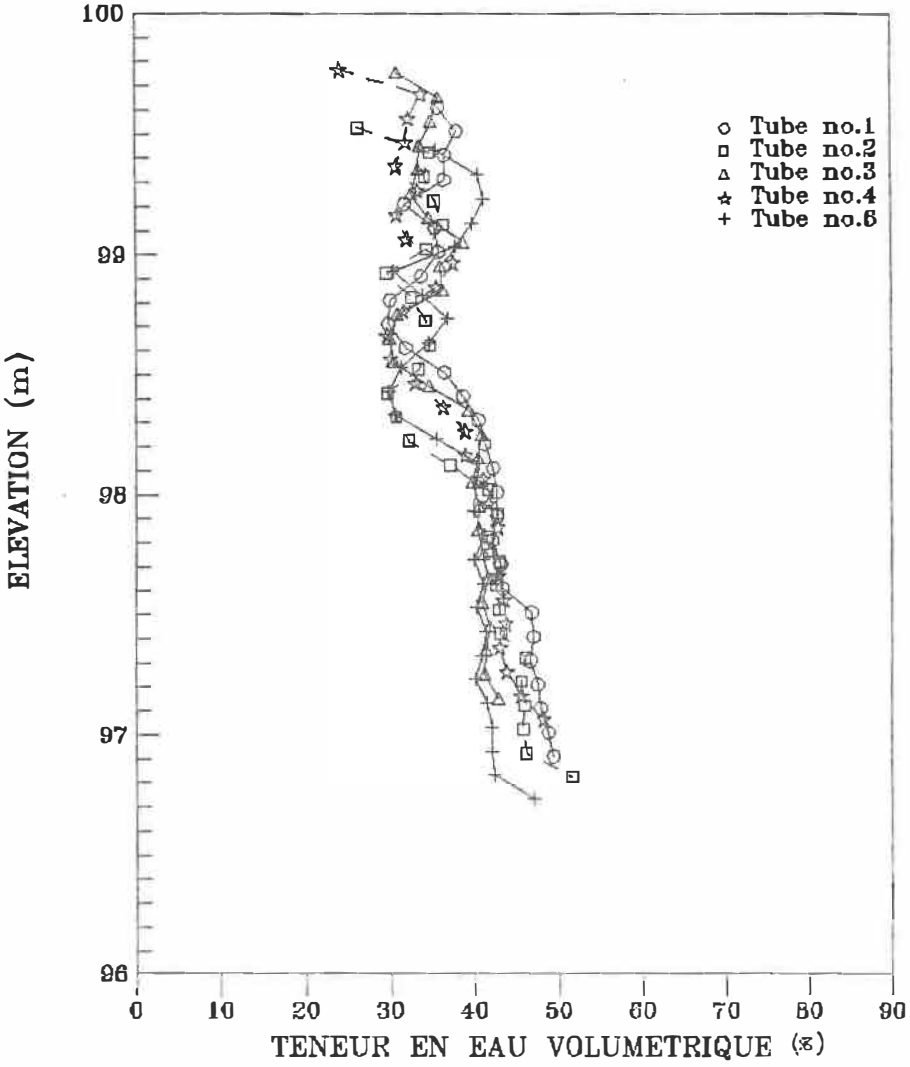


Figure 4.3
Profils de teneur en eau du sol pour différents tubes à l'hotel de ville (date de lecture: 02-05-88)

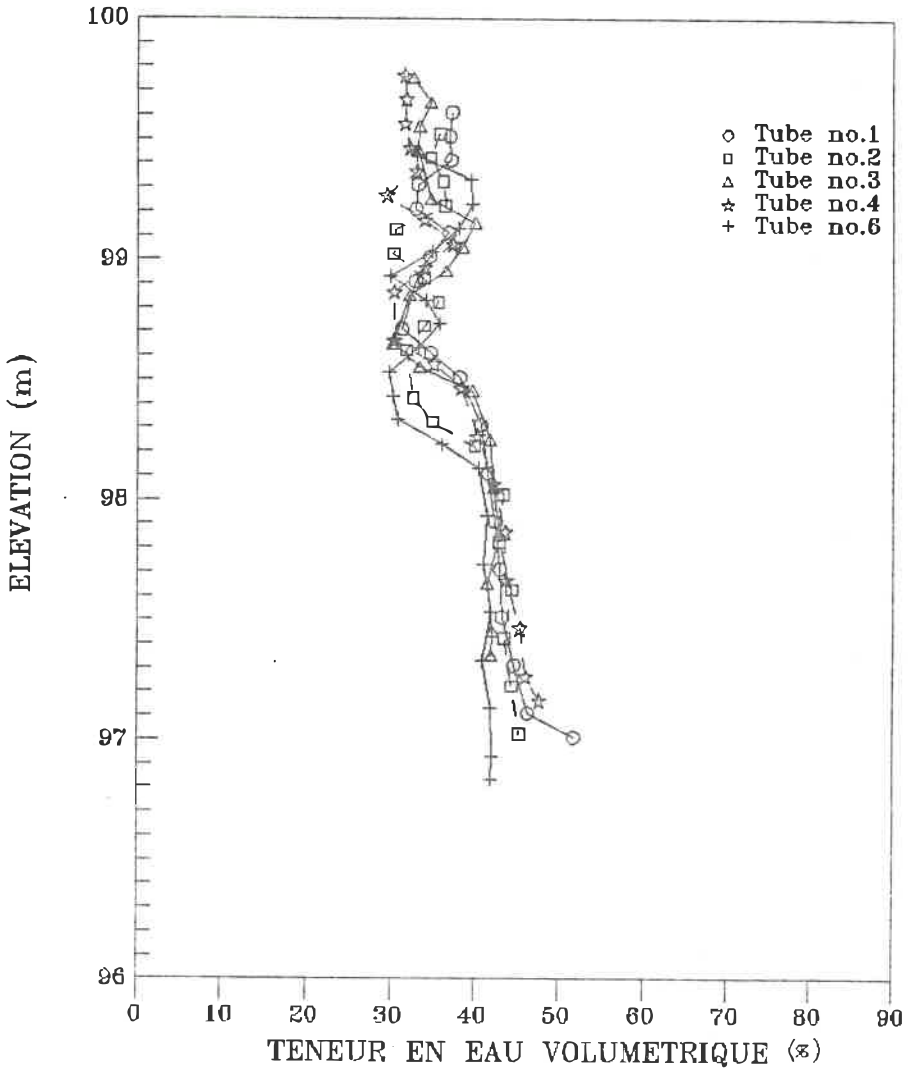


Figure 4.4
Profils de teneur en eau du sol pour différents tubes à l'hotel de ville (date de lecture: 01-05-89)

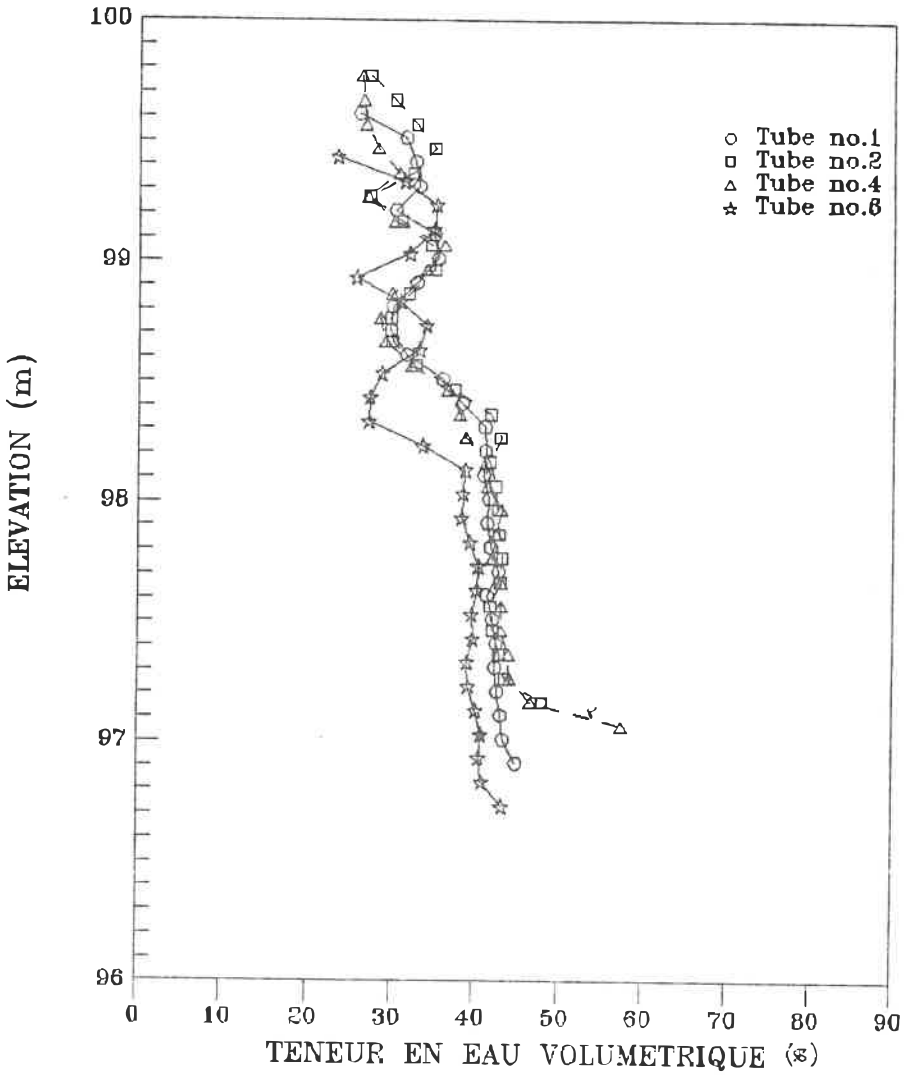


Figure 4.5
Profils de teneur en eau du sol pour différents tubes à l'hotel de ville (date de lecture: 06-06-88)

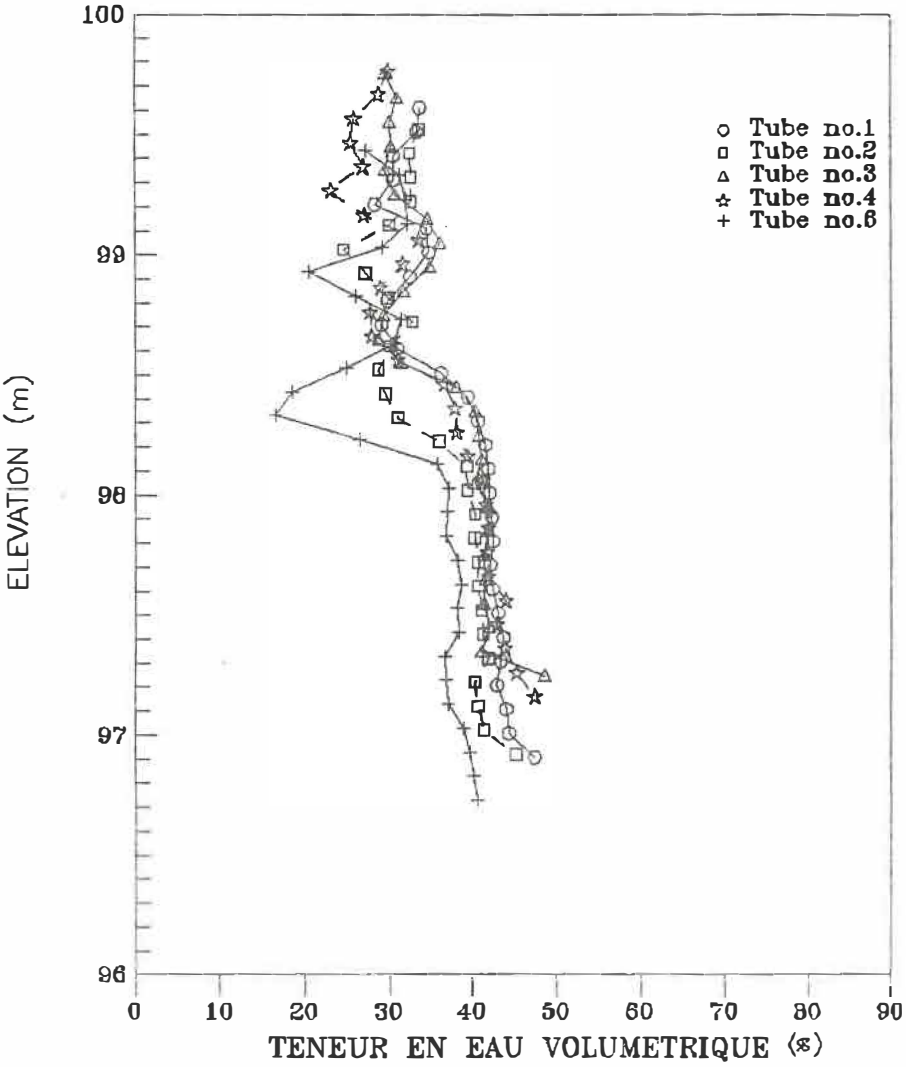


Figure 4.6
Profils de teneur en eau du sol pour différents tubes à l'hotel de ville (date de lecture: 04-07-88)

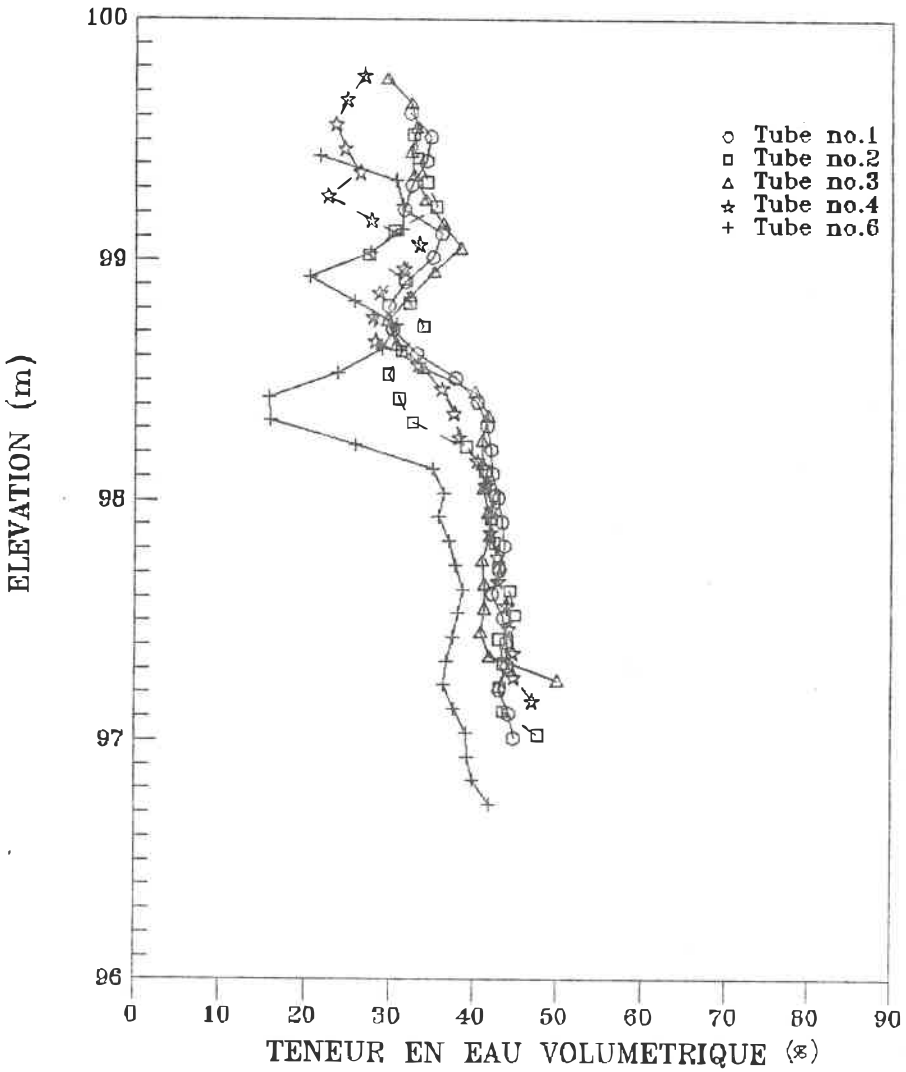


Figure 4.7
Profils de teneur en eau du sol pour différents tubes à l'hotel de ville (date de lecture: 26-07-88)

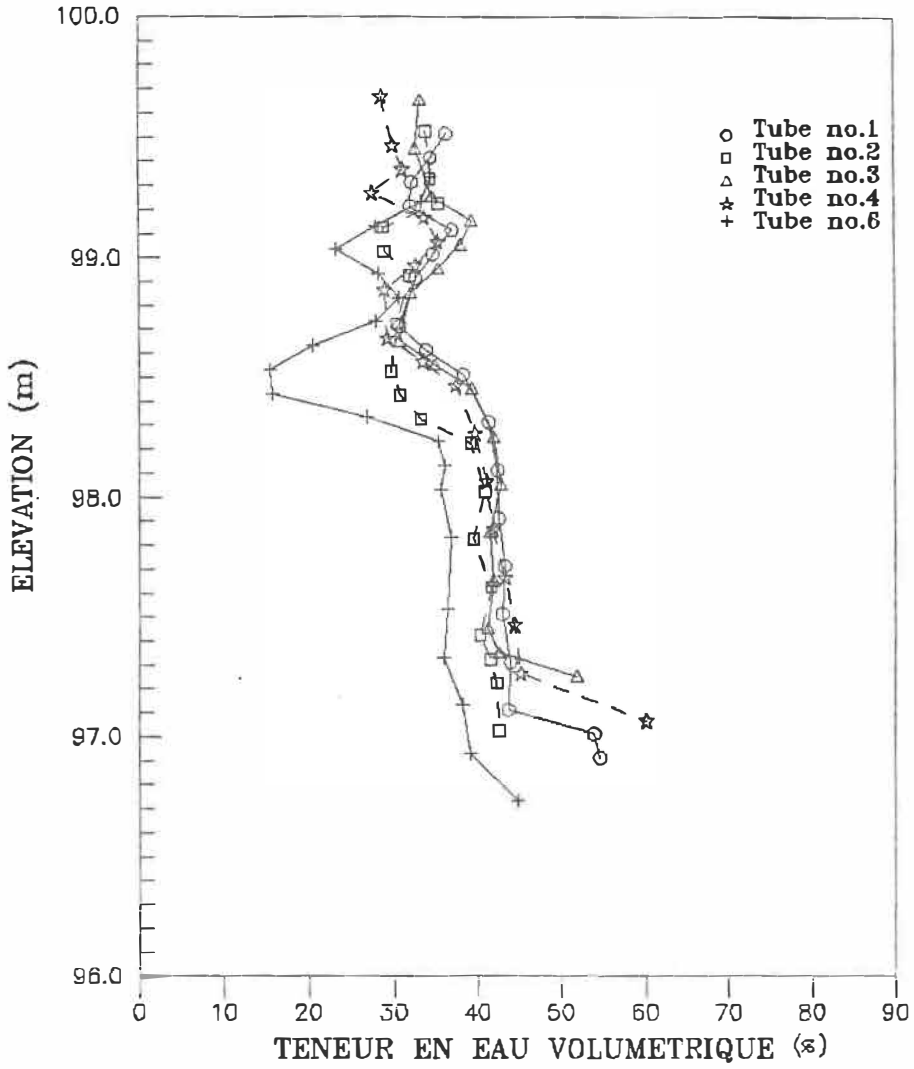


Figure 4.8
Profils de teneur en eau du sol pour différents tubes à l'hotel de ville (date de lecture: 01-09-88)

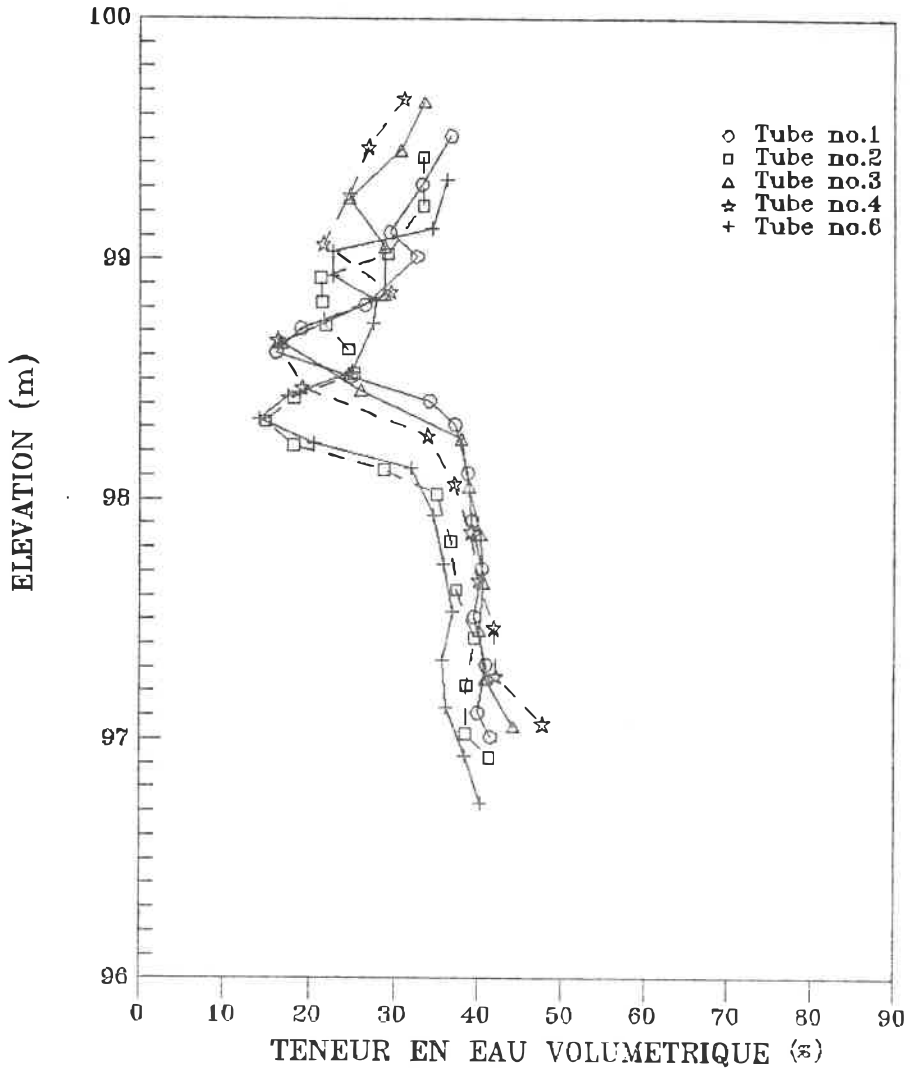


Figure 4.9
Profils de teneur en eau du sol pour différents tubes à l'hotel de ville (date de lecture: 24-11-87)

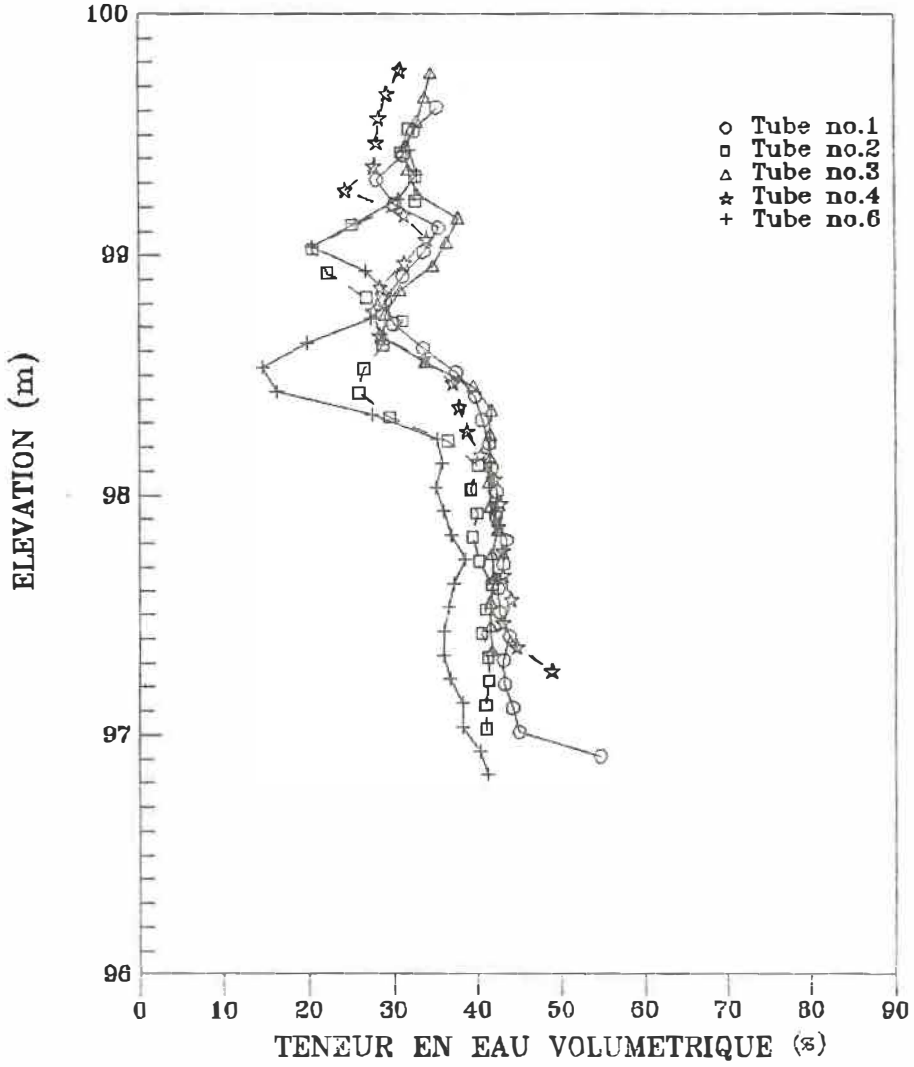


Figure 4.10
Profils de teneur en eau du sol pour différents tubes à l'hotel de ville (date de lecture: 19-10-88)

4.10). La variation prononcée du profil de la teneur en eau du sol autour du tube d'accès #6 seul est due à la présence de la rangée d'érables du côté est qui se trouvent à 7.5m du tube #6. En effet, tous les arbres qui étaient situés près des tubes d'accès #1 à #4 ont été coupés.

En comparant les profils de la teneur en eau mesurés dans les tubes #2 et #4, on remarque que le sol est plus asseché en arrière (côté sud) qu'en avant (côté nord). Ceci est parmi les causes qui ont conduit à des tassements différentiels de la fondation entraînant des distorsions variant entre 1/85 à 1/150 (voir fig. 3.9). Selon les critères généralement admis, la distorsion maximale admissible est de 1/180 pour ce genre de construction, par conséquent les distorsions subies par la fondation ont causé des dommages structuraux et des fissures sévères aux murs et cloisons. La distorsion maximale a été observée sur le côté ouest: un tassement différentiel de 13cm entre les coins S-O et N-O sur une distance de 11m résultant en une distorsions de 1/85 qui est beaucoup plus élevée que celle recommandée par les normes (1/180).

Relation entre tassements mesurés et calculés

Le tassement du radier est calculé à partir des variations de la teneur en eau du sol mesurées en supposant que le sol est saturé. Par exemple le tassement différentiel calculé le 24/11/87 entre les coins S-E et N-O est 23 mm (tubes #2 et 4) est comparable à celui mesuré par nivellement qui est de 17 mm. Consernant le tassement total, on a enregistré un tassement de 11 mm au coin S-E qui correspond à 20 mm de tassement calculé. Le tableau 4.1 donne les valeurs des tassements calculés et mesurés ainsi que leurs rapports qui varient entre 1.35 et 3. Cela veut dire qu'en moyenne le tassement réel est égal à la moitié de celui estimé à partir des profils de la teneur en eau volumétrique.

Tassements		
Calculés S_t (mm)	mesurés S_{tr} (mm)	S_t / S_{tr}
23	17	1.35
18	10	1.75
15	5	3

Tableau (4.1): Rapport entre tassements calculés et mesurés

Relation entre tassements calculés et SMD

Les mesures prises à différentes dates dans le tube d'accès #1 montrent que la profondeur d'assèchement est superfielle et va jusqu'à 50cm (voir fig. 4.11). La figure 4.12 montre la variation saisonnière du profil de la teneur en eau du sol autour du tube d'accès #2 pour l'année 1988: On constate qu'au debut de printemps, le sol est à sa pleine capacité de retention, puis sa teneur en eau commence à diminuer pendant l'été en atteignant généralement son minimun au debut de l'automne.

A l'endroit du tube d'accès #6, le sol a subi un assèchement sur une profondeur de 2.8m (voir fig. 4.13). Cet assèchement est en moyenne de 10% sur une profondeur de 1.2m et de 3.5% entre 1.2m et 2.8m. Le déficit calculé à partir des profils de la teneur en eau du sol est consiidérable dans le tube d'accès #6 par rapport aux autres tubes car celui-ci est le seul près des arbres. Afin de relier le déficit d'eau et le tassement à 7.5m de la ligne d'érables de 18m de hauteur au SMD estimé par différentes méthodes (Penman, Thornthwaite, Turc et Blaney & Criddle); des diagrammes ont été tracés en admittant que la valeur du tassement mesuré est égale à la moitié de celle du tassement calculé ou déficit d'eau (voir figs 4.14 à 4.17). On constate qu'il y a une corrélation entre ces paramètres. Chaque droite du diagramme correspond à une profondeur et

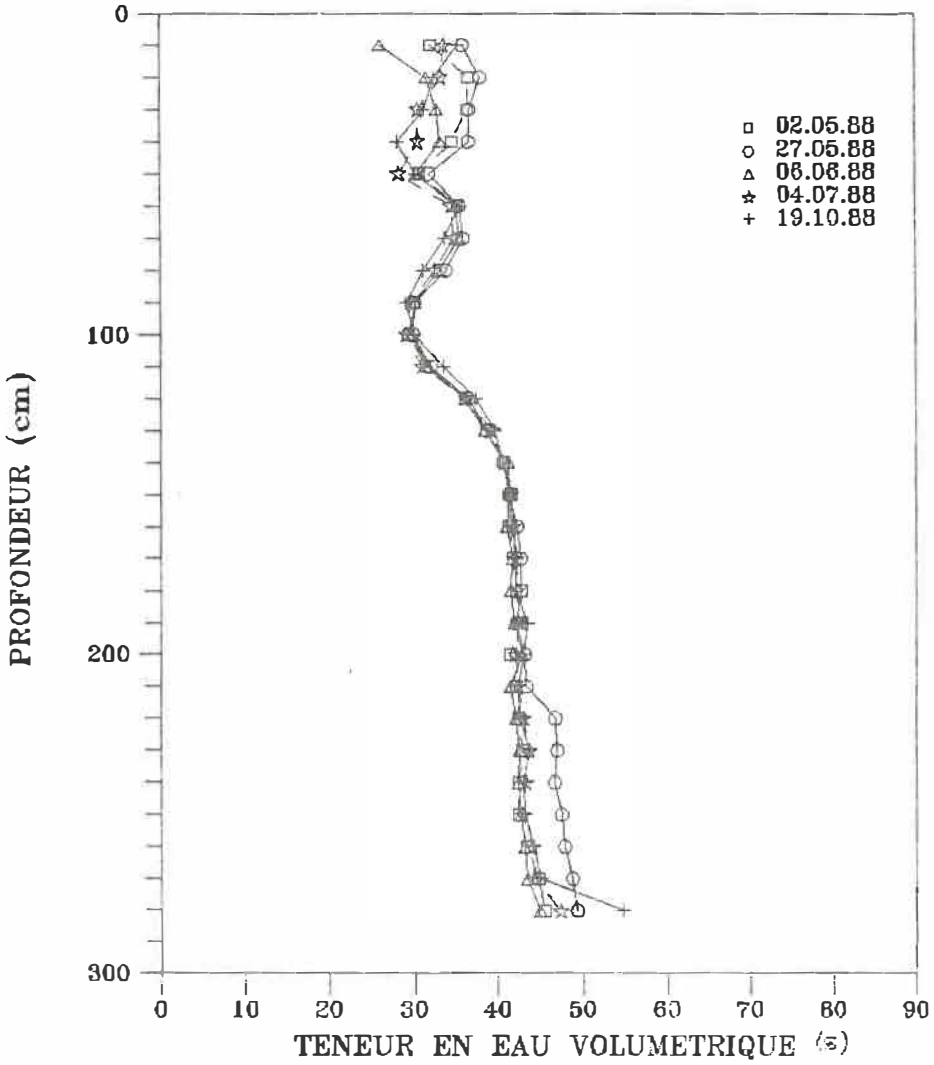


Figure 4.11
Développement saisonnier du profil de de la teneur en eau du sol pour l'année 1988 (Hotel de ville, tube d'accés no.1)

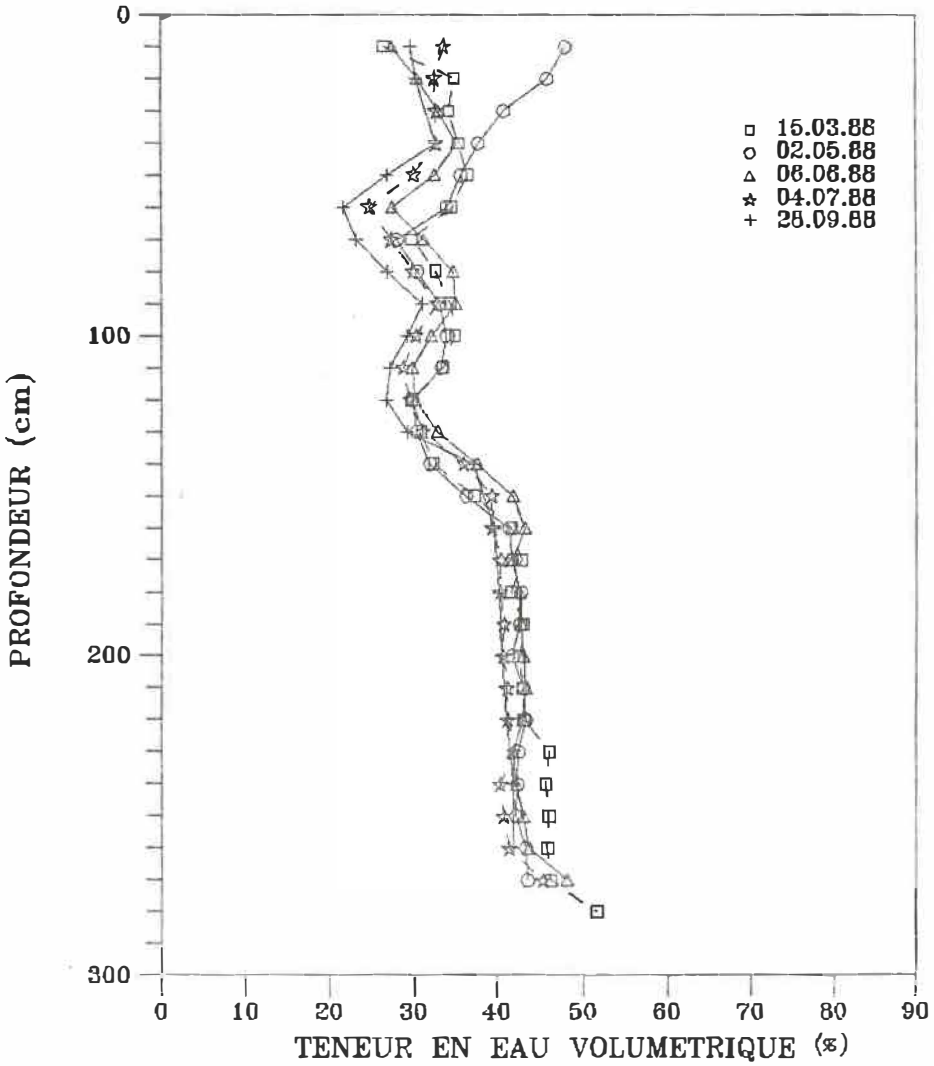


Figure 4.12
Développement saisonnier du profil de de la teneur en eau du sol pour l'année 1988 (Hotel de ville, tube d'accés no.2)

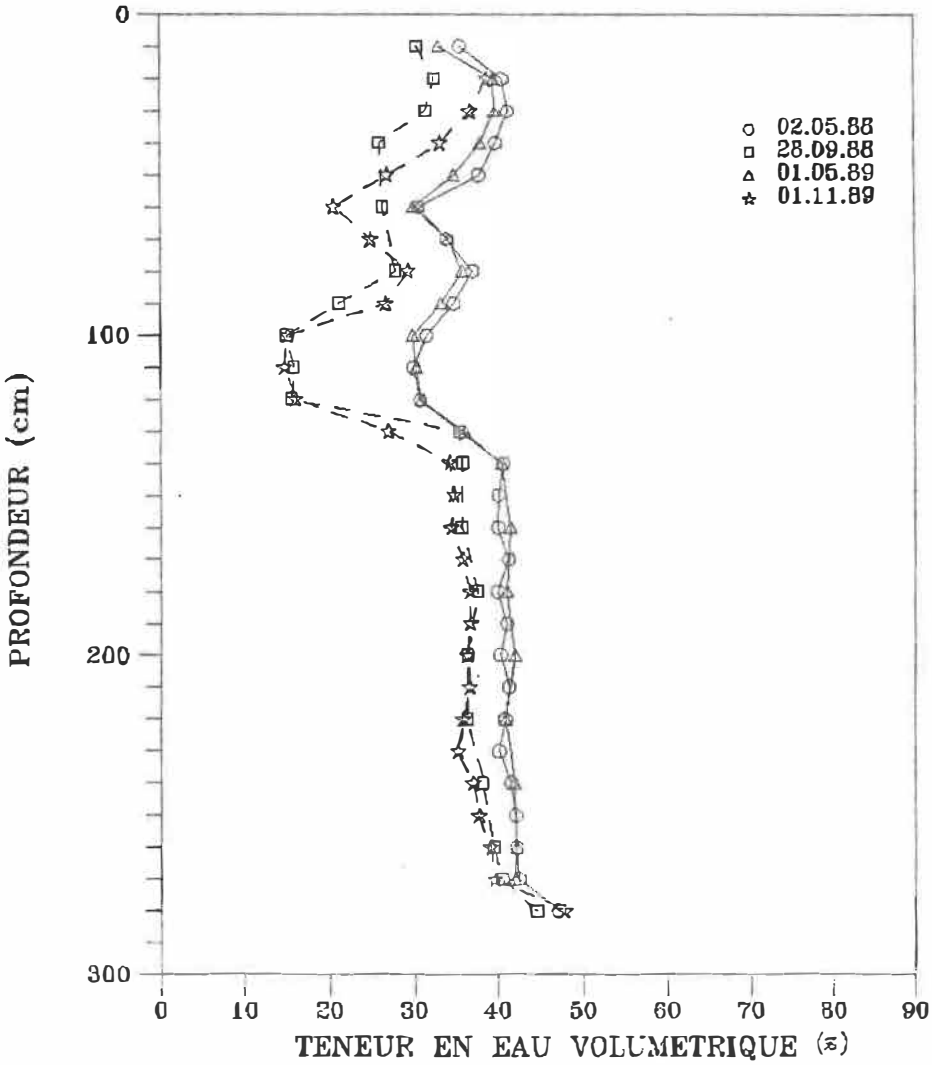


Figure 4.13
Variation de la teneur en eau du sol du 02.05.88 au 01.11.89 pour le tube d'accés no.6 (Hotel de ville)

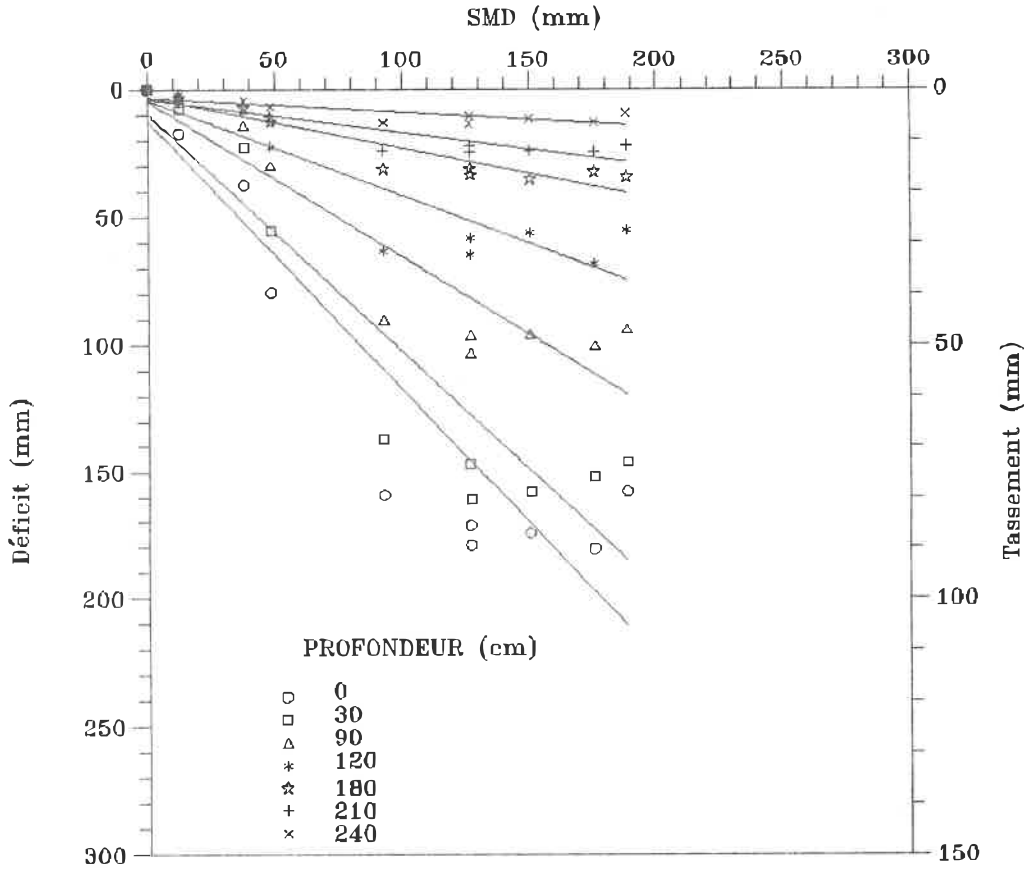


Figure 4.14
Relation entre l'épuisement de l'humidité du sol estimé par la formule de Thornthwaite, le déficit d'eau et le tassement a 0.4h de la ligne d'érables

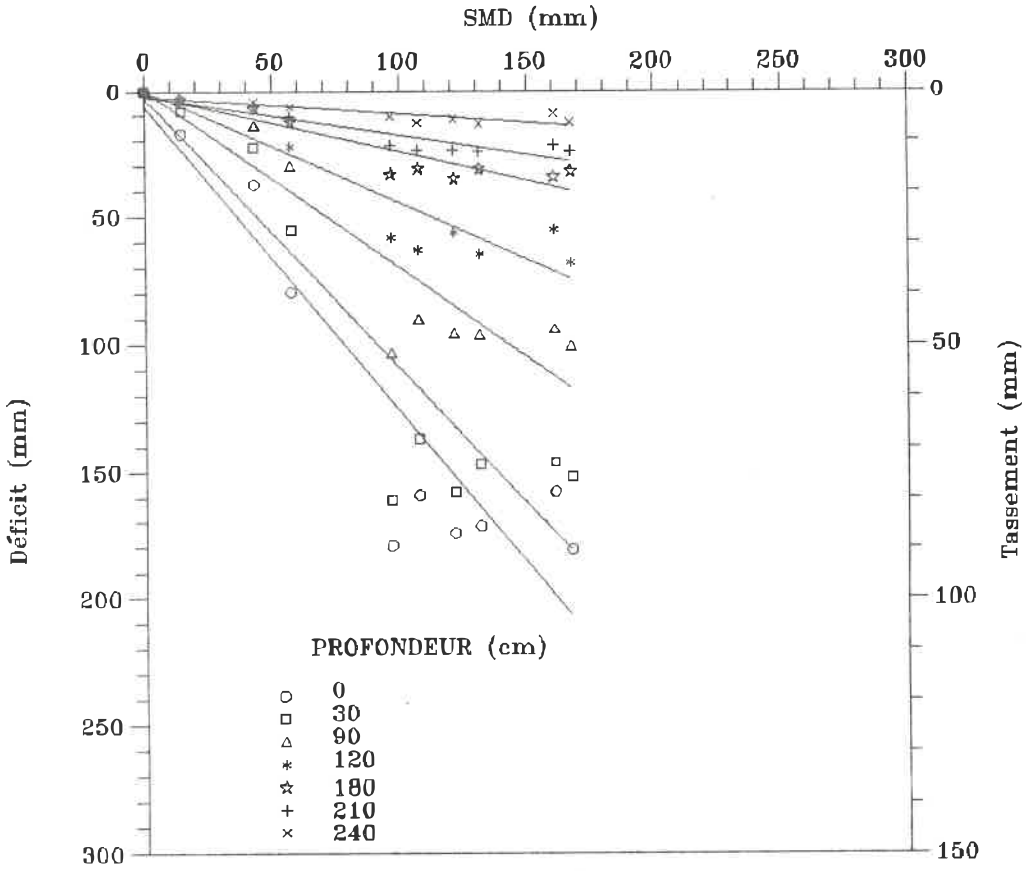


Figure 4.15
Relation entre l'épuisement de l'humidité du sol estime par la formule de Turc, le déficit d'eau et le tassement a 0.4h de la lignes d'érables

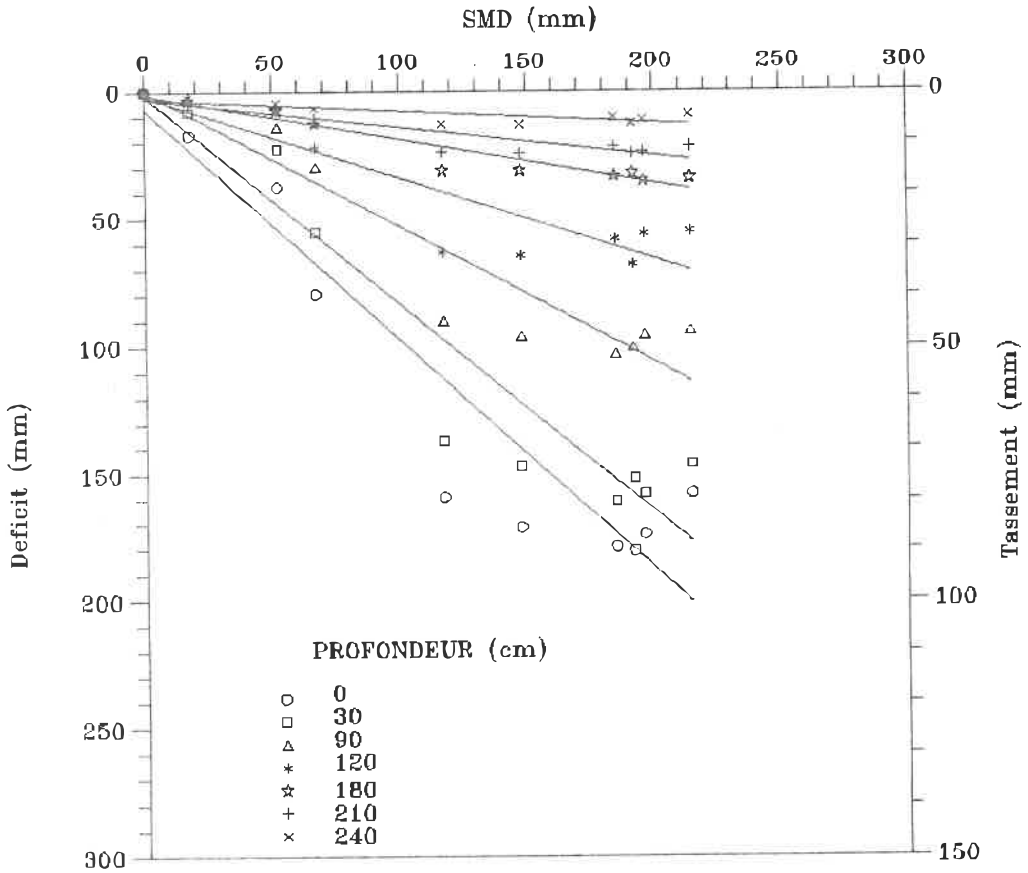


Figure 4.16
Relation entre l'epuisement de l'humidite du sol estime par la formule de Blaney & Criddle, le deficit d'eau et le tassement a 0.4h de la ligne d'erables

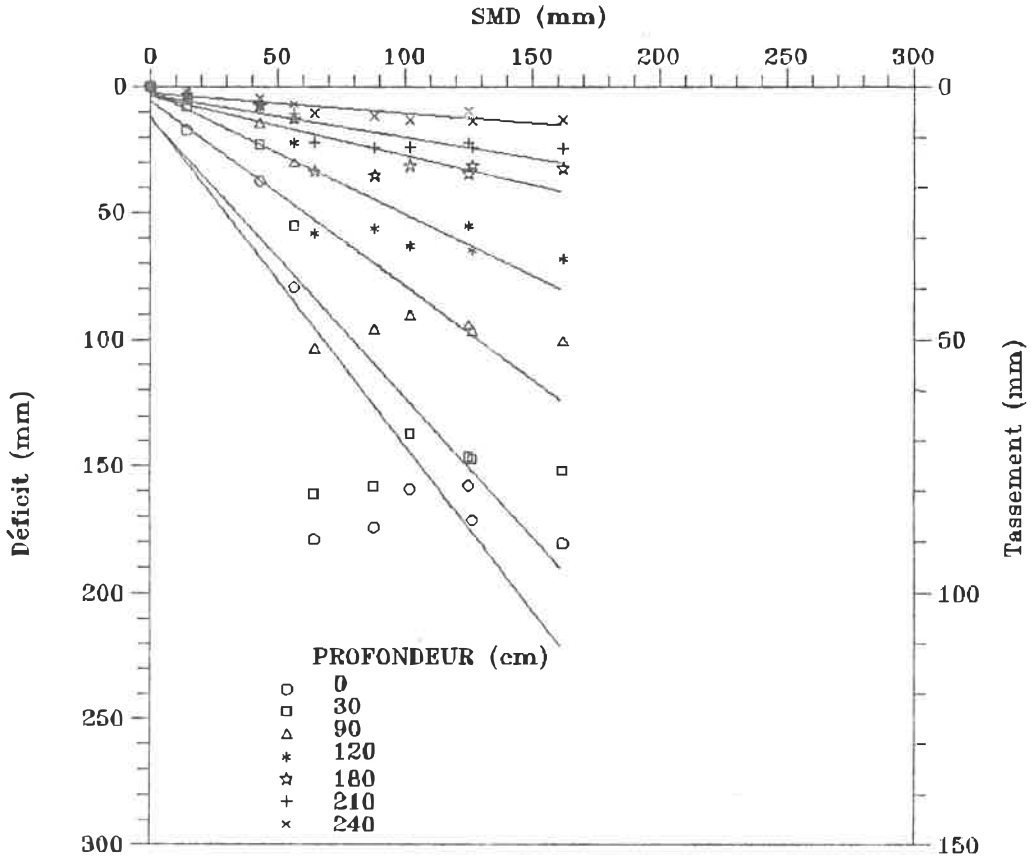


Figure 4.17
Relation entre l'épuisement de l'humidité de sol estimé par la formule de Penman, le déficit d'eau et le tassement a 0.4h de la ligne d'érables

relie l'épuisement de l'humidité du sol au tassement. On remarque aussi que l'amplitude du mouvement dépend de la profondeur et des conditions climatiques; c'est à dire que la relation reliant l'épuisement de l'humidité du sol au tassement est une droite dont la pente diminue avec l'augmentation de la profondeur (voir fig. 4.18). Ceci est vrai puisque plus on s'éloigne de la surface du sol et plus l'effet du besoin de l'atmosphère sur la couche du sol décroît. Ces diagrammes peuvent être utilisés dans la conception des fondations reposant sur l'argile de la mer Champlain afin de tenir compte de l'effet d'une rangée d'érables à une distance de 0.4h de la fondation. On remarque aussi que les pentes des droites reliant le déficit réel ou le tassement à l'épuisement de l'humidité du sol pour une profondeur donnée dépendent de la méthode utilisée, par exemple ces pentes sont de 1.07 pour la méthode Thornthwaite, 0.92 pour celle de Blaney et Criddle (avec K= 0.7) et de 1.33 pour celles de Turc et Penman. Puisque le tassement réel est équivalent à la moitié de celui calculé à partir des profils de teneur en eau volumétriques, si par exemple l'épuisement de l'humidité du sol calculée par n'importe quelle méthodes est de 100 mm, cela peut causer un tassement de surface de 54 mm si le SMD est estimé par la méthode de Thornthwaite, 46 mm par la méthode de Blaney et Criddle et respectivement 133 mm de tassement de surface

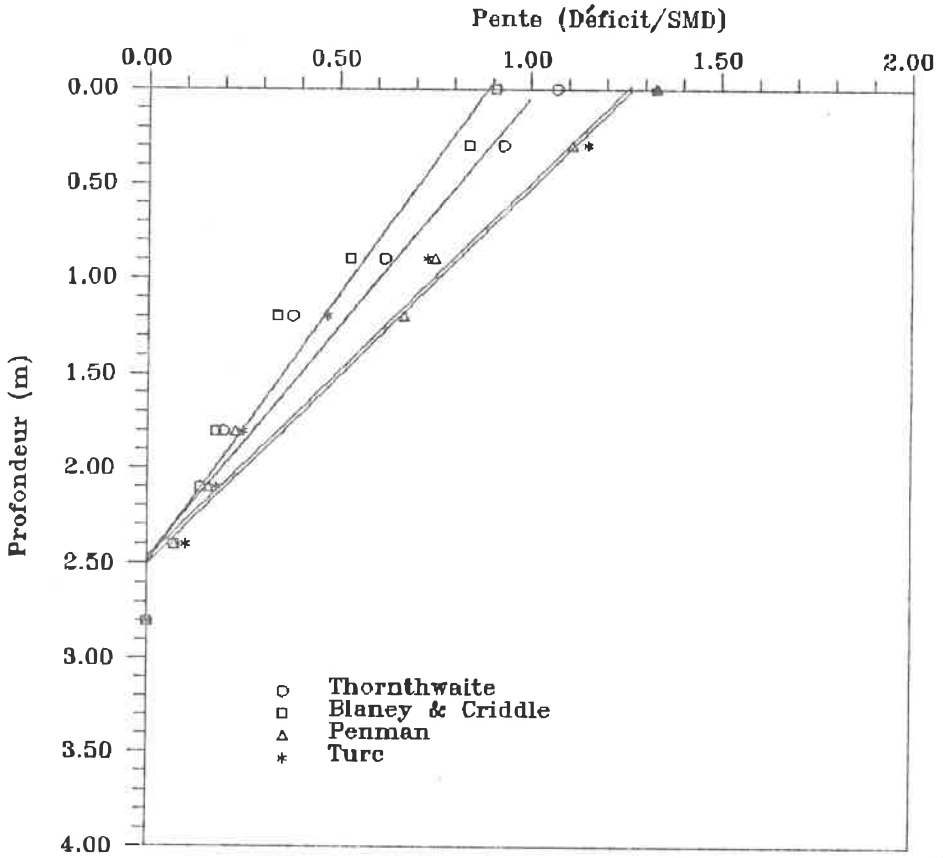


Figure 4.18
Pente de la courbe du déficit vs SMD calculée par différentes méthodes en fonction de la profondeur

si le SMD est estimé par la méthode de Turc et Penman. Afin de faciliter le calcul du tassement du sol à 0.4h de la ligne de l'érable pour n'importe quelle profondeur et le SMD, des expressions 4.1 à 4.3 ont été déduites à partir des figures 4.14 à 4.18.

$$S_{tr} = D_f/2 \quad \text{(mm)} \qquad (4.1)$$

S_{tr} : le tassement réel à une profondeur Z (m) à 0.4h d'une rangée d'érables.

D_f : Déficit (mm)

$$D_f = SMD * P_f \qquad (4.2)$$

SMD: Epuisement de l'humidité du sol (mm d'eau)

P_f : Pente de la courbe déficit vs SMD

$$P_f = -P_m * Z + B_m \qquad (4.3)$$

P_m et B_m : Paramétres de la pente (P) dépendant de la méthode utilisée dans l'evaluation de SMD, ont pour valeur respectivement 0.41 et 1.02 pour la méthode de Thornthwaite, 0.5 et 1.25 pour celle de Penman et Turc, et 0.36 et 0.9 pour celle de Blaney et Criddle.

4.2.2 Epiphanie (site no.2)

Des désordres structuraux ont commencé à survenir en août 1987 et plus précisemment au coin S-E. Le 18 avril 1988 le propriétaire de la maison a décidé de couper les deux rangées d'érables du côté ouest ainsi que les deux

saules situés à l'arrière de la maison (voir fig. 3.16). D'après les relevés de nivellement prises sur le mur de fondation (voir fig. 3.20), le tassement différentiel maximum de 4 cm a entraîné une distorsion maximale de 1/160 sur le côté ouest qui est supérieure à 1/180 admissible pour ce type de construction.

Les profils de la teneur en eau volumétrique mesurés à la sonde à neutrons ainsi que les teneurs en eau massiques mesurées au laboratoire nous indiquent que le sol à l'endroit du tube d'accès #1 et près des deux rangées d'arbres du côté ouest est plus sec (W=34 %) que celui situé du côté nord à l'endroit du tube #3, en arrière de la maison (W=55%). A cause de cet assèchement l'argile près de la zone endommagée possède des caractéristiques mécaniques très bonnes. En effet les essais au cône suédois ont montré une résistance non drainée variant de 97 à 250 kPa impliquant une capacité portante minimale de 165 kPa (voir fig. 3.17). De plus la teneur en eau W de 34%, mesurée à 1.2m de profondeur dans la tranchée #1, est très proche de la limite de plasticité qui de l'ordre de 30%. Sous la semelle de la fondation, la teneur en eau W prélevée de la tranchée #2 (coin S-O) est de 50% et est plus faible de 5% que celle se trouvant à l'arrière de la maison.

La comparaison des profils des teneurs en eau dans les quatre tubes d'accès, mesurées à différentes périodes de l'année (fig. 4.19 à 4.27) donne les renseignements suivants:

- Le 01/12/87: la profondeur de la couche active, asséchée, est supérieure à 3m. En effet, les profils de la teneur en eau ne se rejoignent pas à cette profondeur. Les tubes #1 et #2 donnent la même teneur en eau jusqu'à une profondeur de 2.20m au delà de laquelle les deux profils divergent. Le phénomène d'asséchement de l'argile par les racines des arbres existe aussi dans le tube #4 qui montre une variation moyenne de 6% en volume d'eau, sur toute la profondeur mesurée, par rapport au tube #3.

- Le 16/03/88: les lectures dans les tubes #2 et #4 n'ont pratiquement pas changé. Cependant la teneur en eau dans le tube #1 a augmenté de 4% en moyenne pour rejoindre celle du tube #2. Cette augmentation peut être expliquée par une élévation de la nappe phréatique.

- Le 31/03/88: une légère augmentation de la teneur en eau volumétrique est notée dans le tube #4 jusqu'à l'élévation 97.5m. Dans les tubes #1 et #2 la teneur en eau a augmenté en bas de l'élévation 98m pour rejoindre celle du tube #4. Une légère augmentation de la teneur en eau en

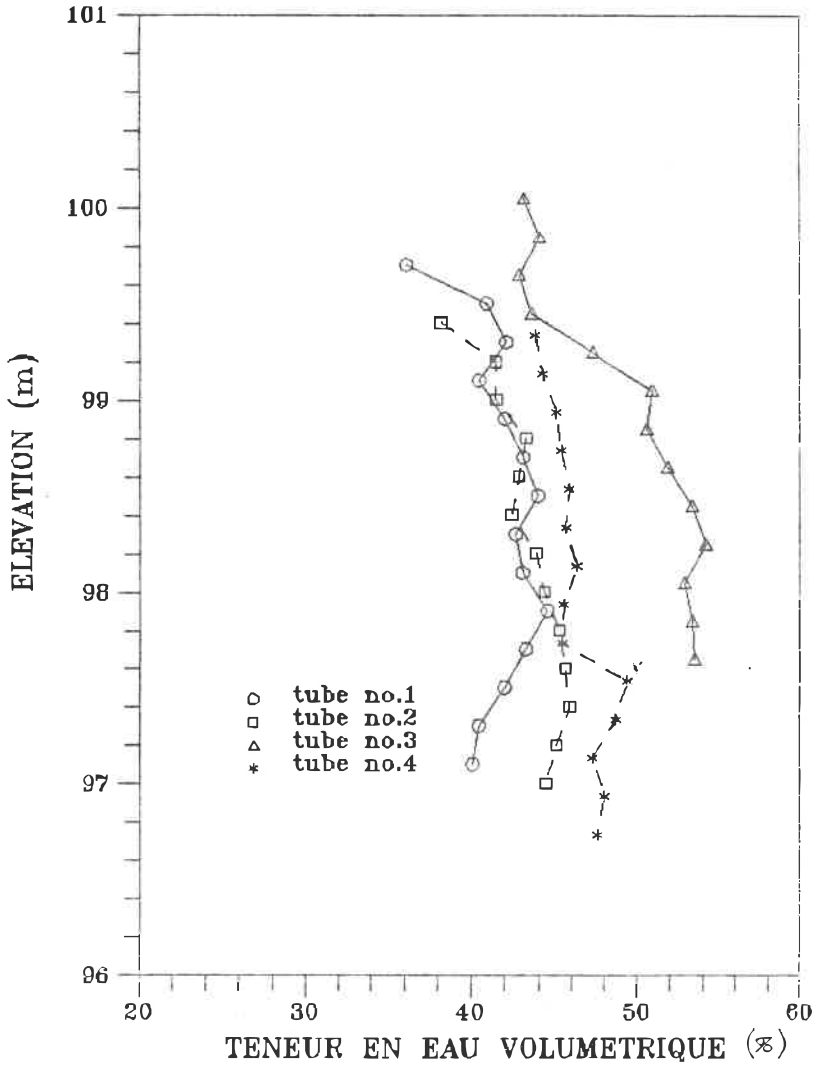


Figure 4.19
Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tube d'accés mesurés le 01-12-87 a l'Epiphanie (site no. 2)

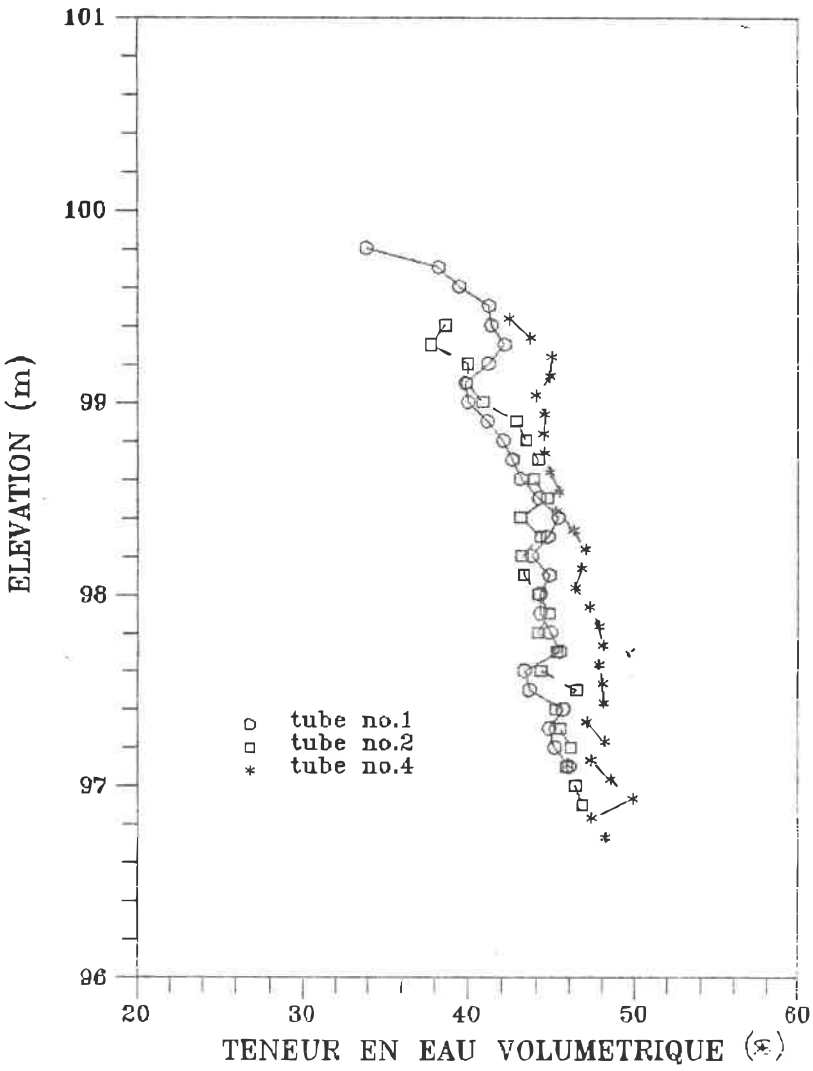


Figure 4.20
Comparaison des profils de teneur en eau dans différents tube d'accés mesurés le 16-03-88 a l'Epiphanie (site no. 2)

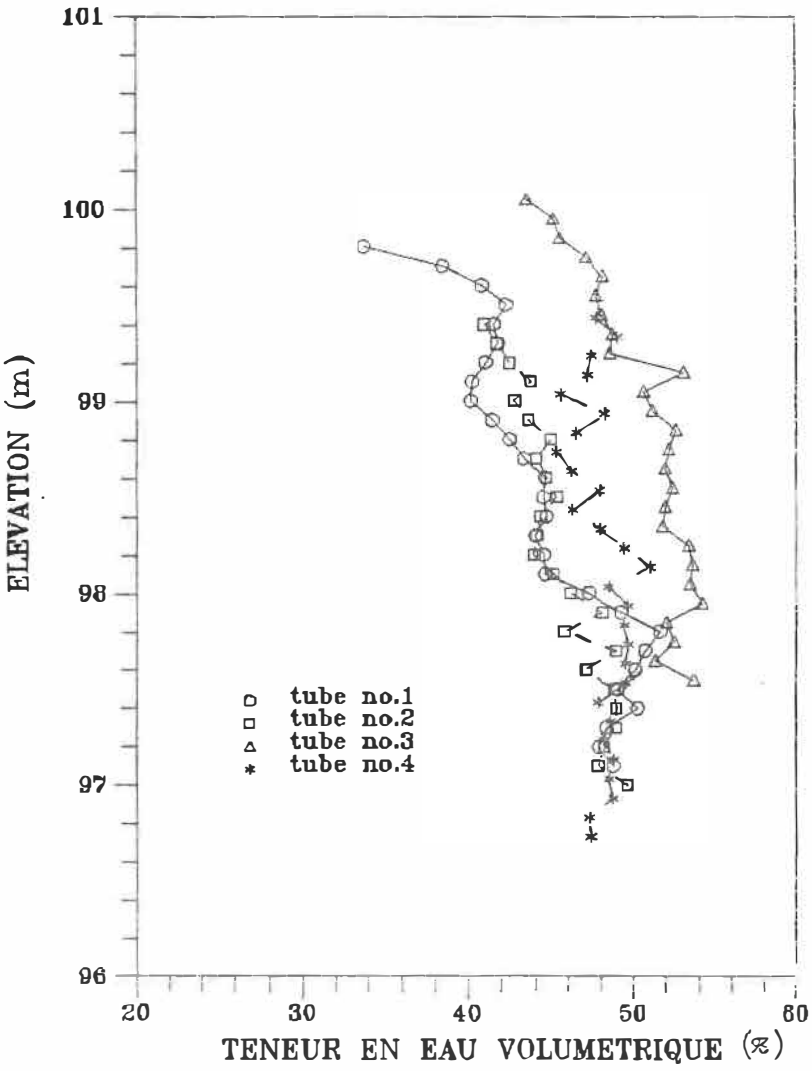


Figure 4.21
Comparaison des profils de teneurs en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 31-03-88 a l'Epiphanie (site no. 2)

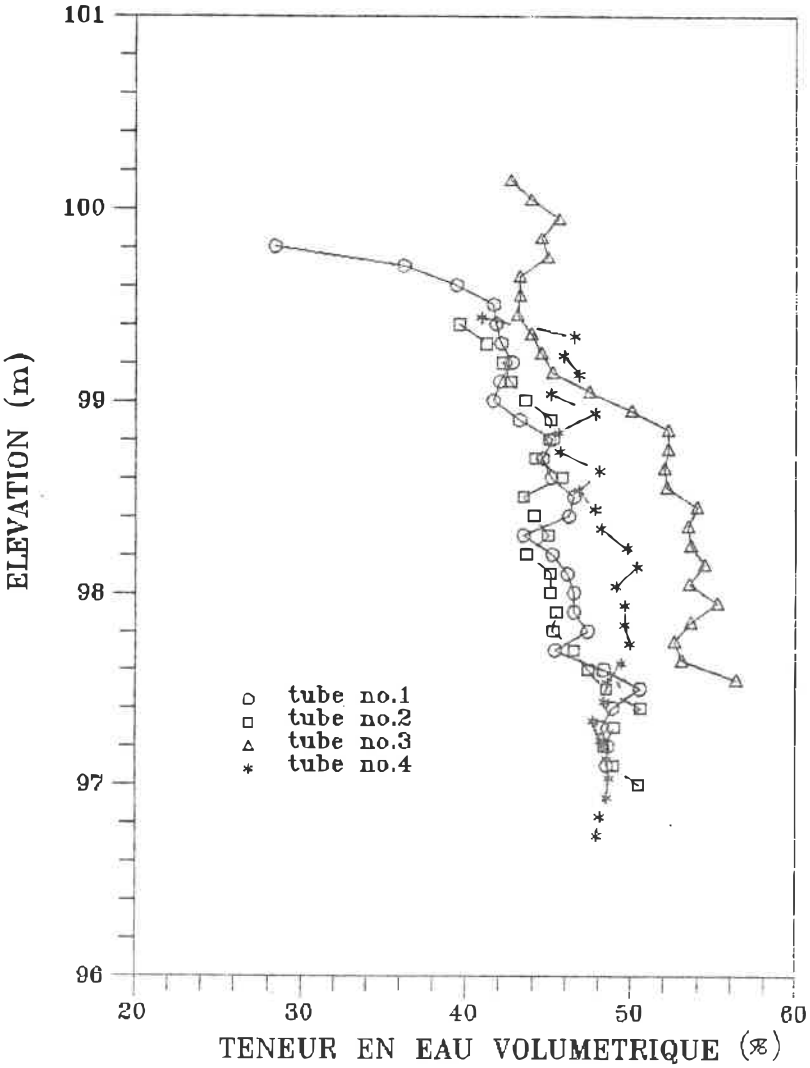


Figure 4.22
Comparaison des profils de teneurs en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 03-05-88 a l'Epiphanie (site no. 2)

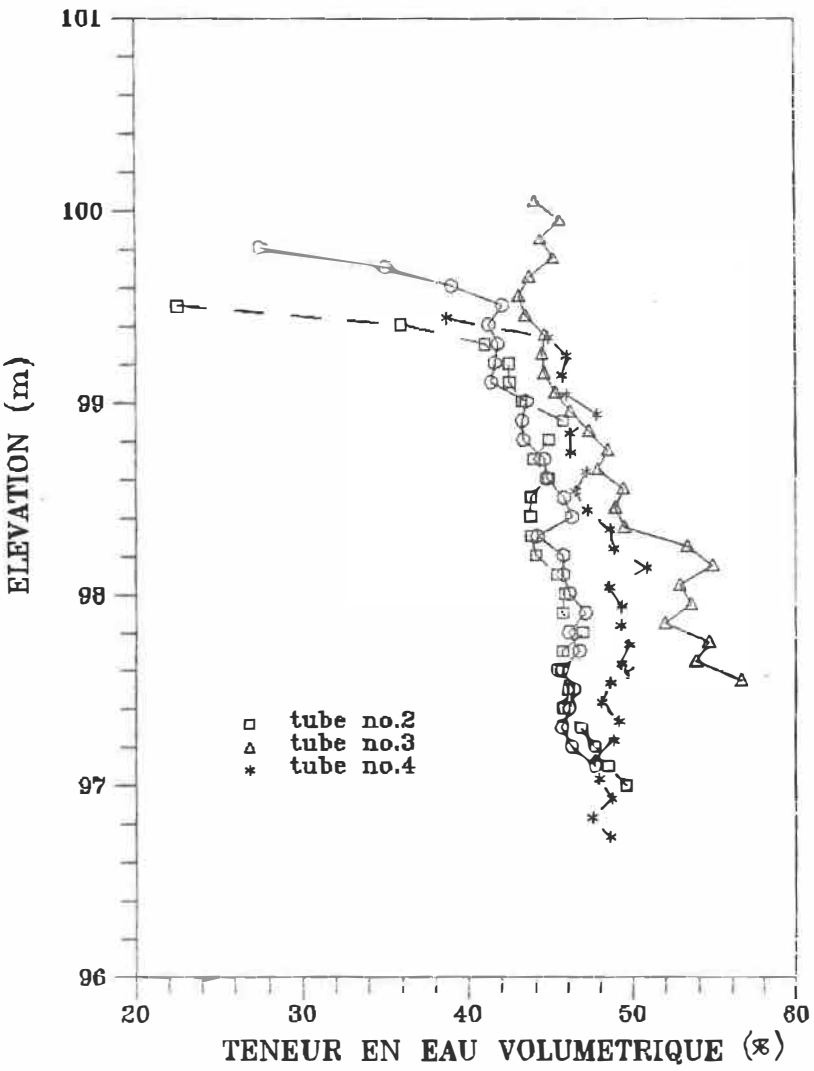


Figure 4.23
Comparaison des profils de teneurs en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 10-05-88 a l'Epiphanie (site no. 2)

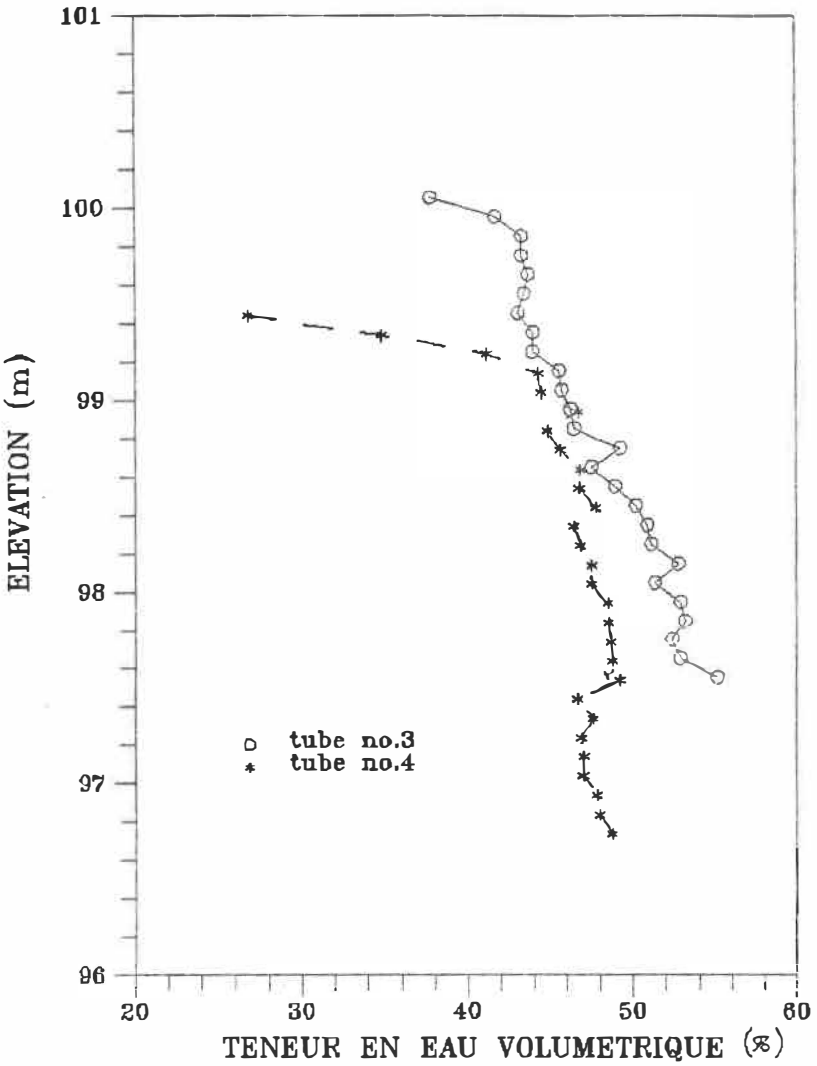


Figure 4.24
Comparaison des profils de teneurs en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 06-06-88 a l'Epiphanie (site no. 2)

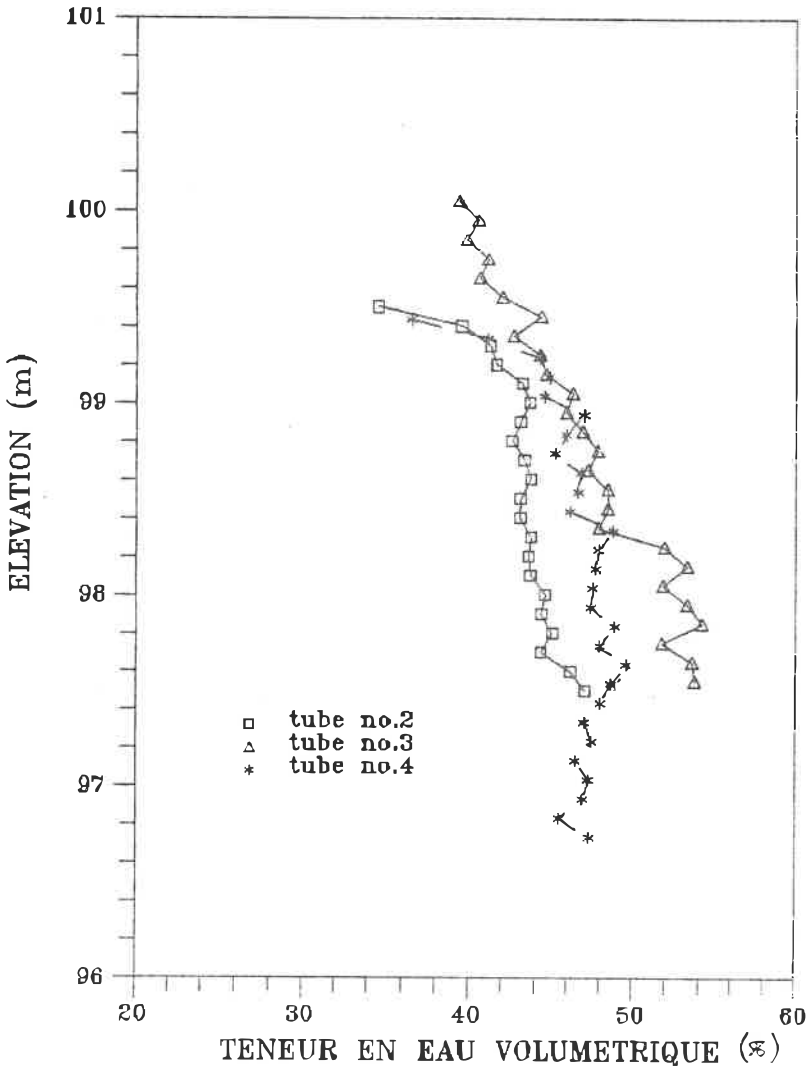


Figure 4.25
Comparaison des profils de teneurs en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 05-07-88 a l'Epiphanie (site no. 2)

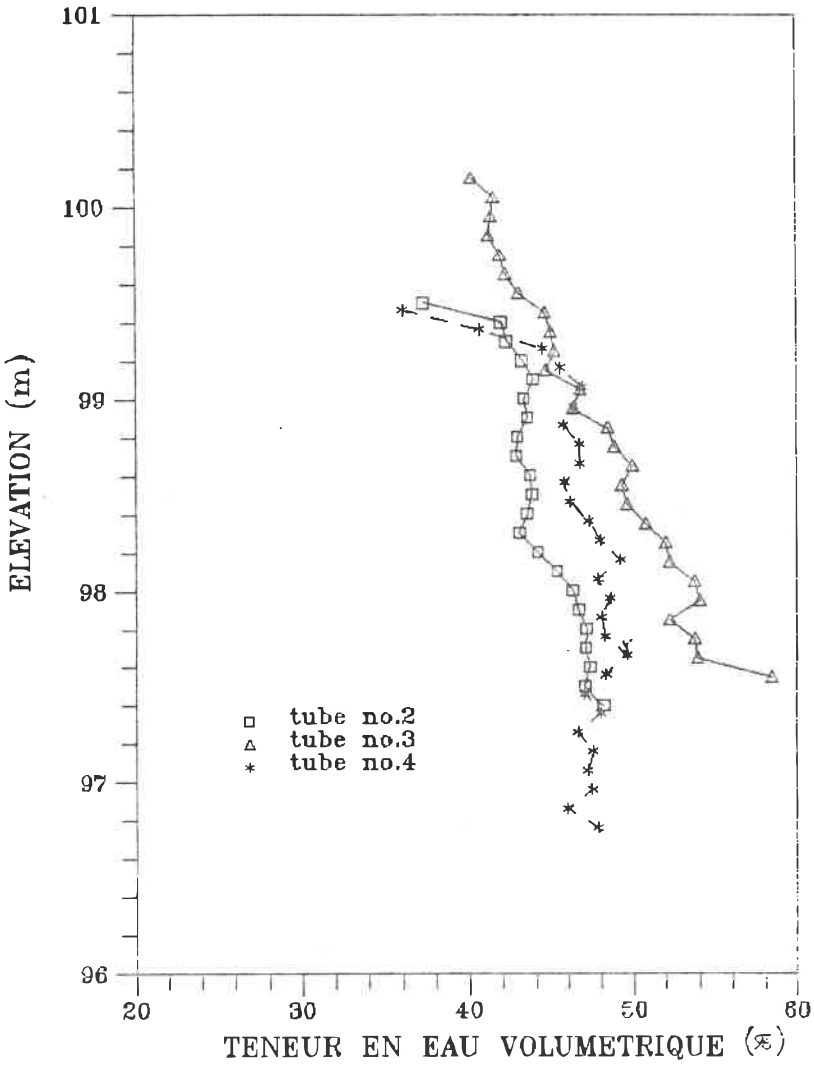


Figure 4.26
Comparaison des profils de teneurs en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 26-07-88 a l'Epiphanie (site no. 2)

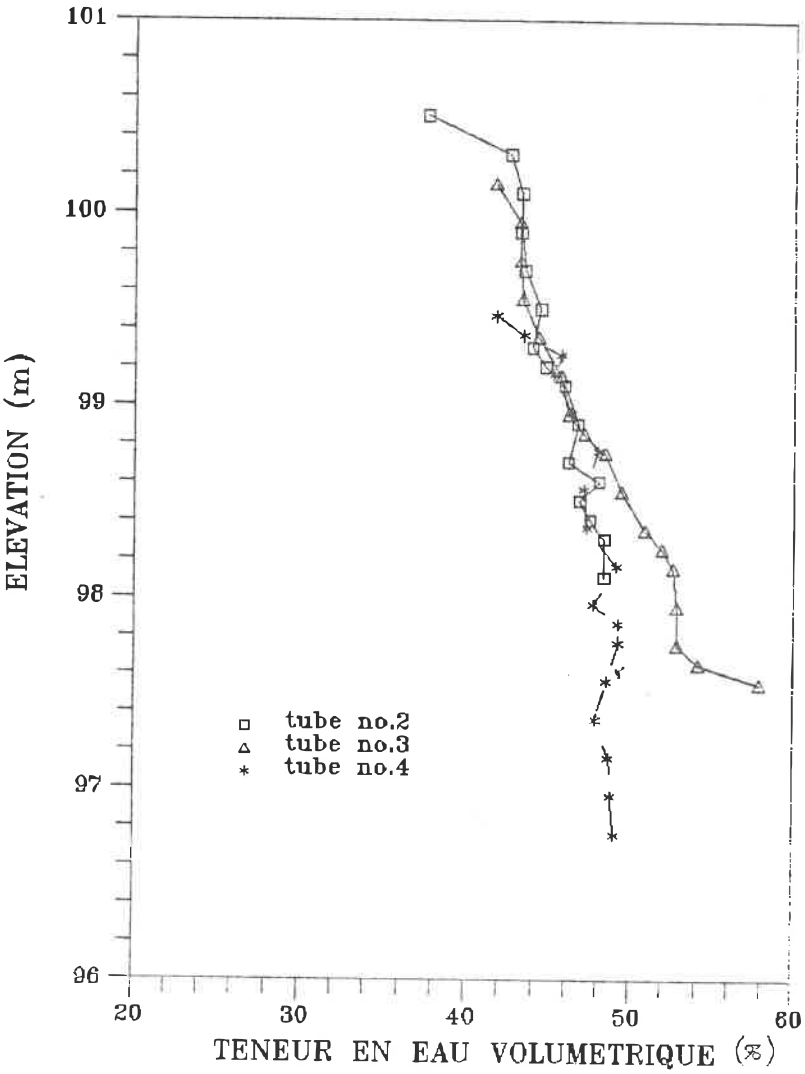


Figure 4.27
Comparaison des profils de teneurs en eau dans différents tubes d'accès mesurés le 01-09-88 a l'Epiphanie (site no. 2)

surface est notée dans le tube #3 et est due probablement aux précipitations.

- Le 03/05/88: le propiétaire a coupé les arbres le 18/04/88. Le seul changement qu'on avait dans ces lectures par rapport à ceux de la date précédente est que la teneur en eau dans le tube #3 a baissé de 4% en moyenne entre les élévations 99m et 100m, ceci étant dû probablement à un drainage de l'eau libre dans le remblai.

- Le 10/05/88: la baisse de 4% de la teneur en eau dans le tube #3 continue jusqu'à l'élévation 98.2m.

- Le 06/06/88: les tubes #1 et #2 ont été endommagés. Les tubes #3 et #4 ont conservé les mêmes teneurs en eau que la date précédente.

- Le 05/07/88: l'asséchement des premiers 20cm du sol est notée dans les tubes #2, #3 et #4. Le tube #1 a été remplacé par un tube ouvert en PVC pour mesurer la profondeur de la nappe.

- Le 26/07/88: presque aucun changement.

- Le 01/09/88: un asséchement de 2 à 6% a été noté le

long du tube #2. Cependant les tubes #3 et #4 ont conservé le même profil que celui de 26/07/88.

N.B: La teneur en eau du sol n'a pas augmenté après la coupe des arbres.

Sur les figures 4.28 et 4.29, on indique l'evolution dans le temps des profils de teneur en eau du sol pour les tubes #3 et #4. Pour le tube #3 les deux profils se referment à une profondeur de 2.10m et la variation moyenne est de 4% impliquant un affaissement de la surface du sol de 4.7cm. Pour le tube #4, la plus grande variation de la teneur en eau est mesurée dans les premiers 50cm du sol, impliquant un tassement de surface d'environ 2cm à partir de 50cm de profondeur, les profils les plus secs et les plus humide sont presque confondus.

4.4 Parc Maisonneuve (site no.3)

Dans le but de mettre en évidence l'effet des arbres et l'ampleur de déssèchement qu'ils peuvent causer aux sols argileux, les résultats de variation de la teneur en eau seront présentés sous deux formes:

- Variation saisonnière des profils de la teneur en eau volumétrique pour chaque type d'arbre étudié et à différen-

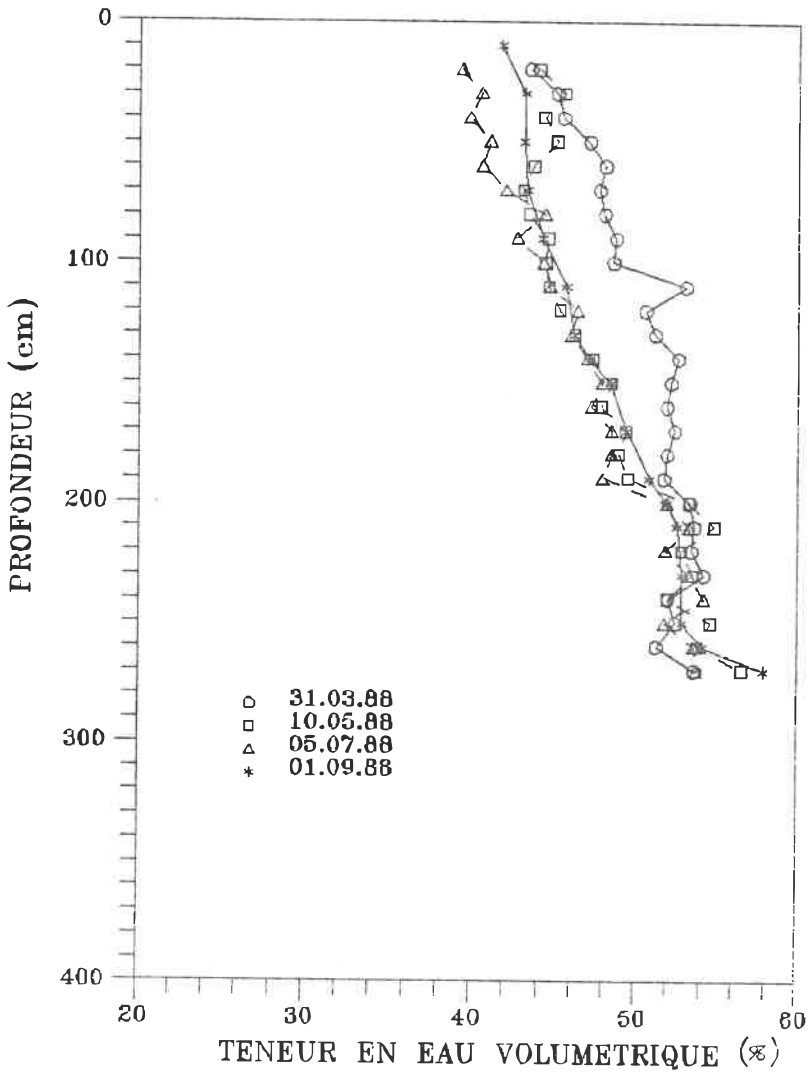


Figure 4.28
Variation saisonnière du profil de la teneur en eau volumétrique dans le tube d'accès no.3

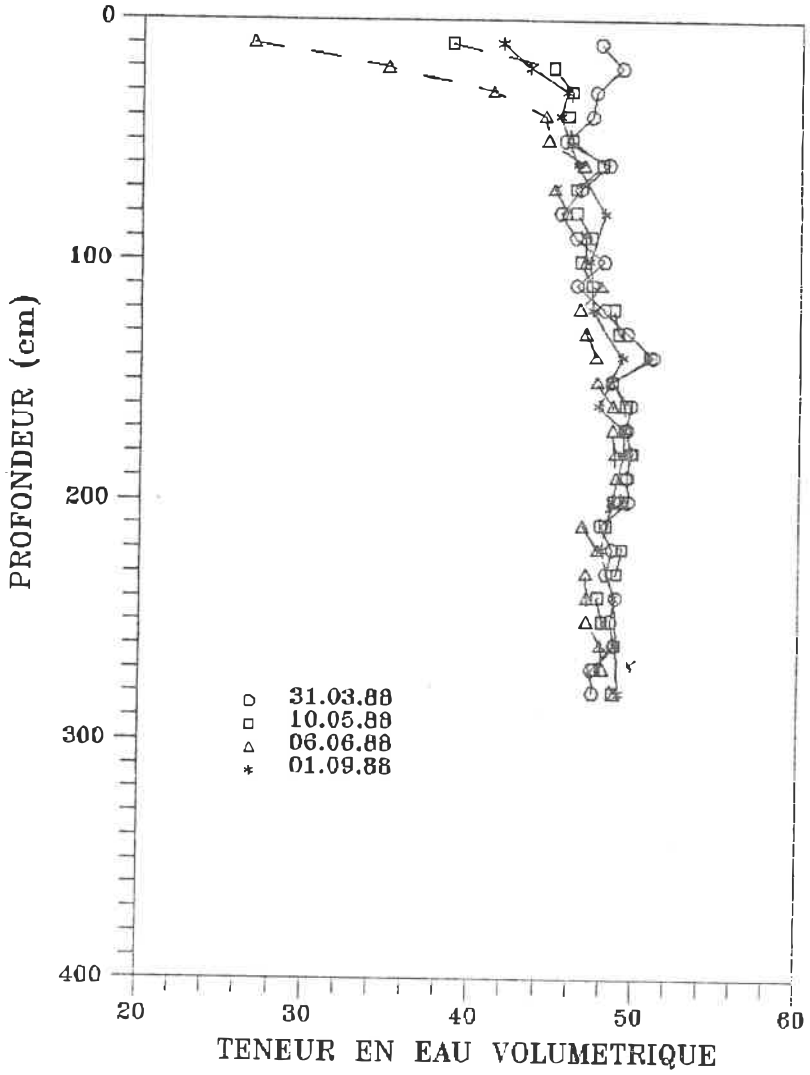


Figure 4.29
Variation saisonnière du profil de la teneur en eau volumétrique dans le tube d'accès no.4

tes distances de ce dernier.

- courbes d'égales valeurs de déficit (calculées comme étant la différence entre les profils de la teneur en eau les plus secs et les plus humides) pour l'année 1989 en fonction des espèces d'arbres étudiés (orme, peuplier à feuilles daltoniennes, ligne de peupliers de Lombardie et érable). Les déficits d'eau ont été calculés en multipliant la variation de l'humidité du sol mesurée par l'épaisseur de la couche appropriée, dans notre cas l'épaisseur de cette couche est de 10 cm. Ainsi 4.5% de réduction de la teneur en eau volumétrique donne 4.5 mm de déficit d'eau. Ces déficits d'eau sont additionnés cumulativement à partir de la base de la zone de dessication pour le déficit d'eau à chaque profondeur. Tous les graphiques de déficit d'eau ont comme ordonnée la profondeur (en cm) et comme abcsisse la distance entre l'axe de l'arbre et les tubes d'accès (en m).

4.4.1 Variation saisonnière des profils de la teneur en eau

On a constaté lors des mesures de la teneur en eau du sol que cette dernière augmente dramatiquement à partir d'une certaine profondeur (voir fig. 4.30). Ceci s'explique par le fait que le diamètre des trous de forage est supérieur à celui des tubes d'accès installés. Par

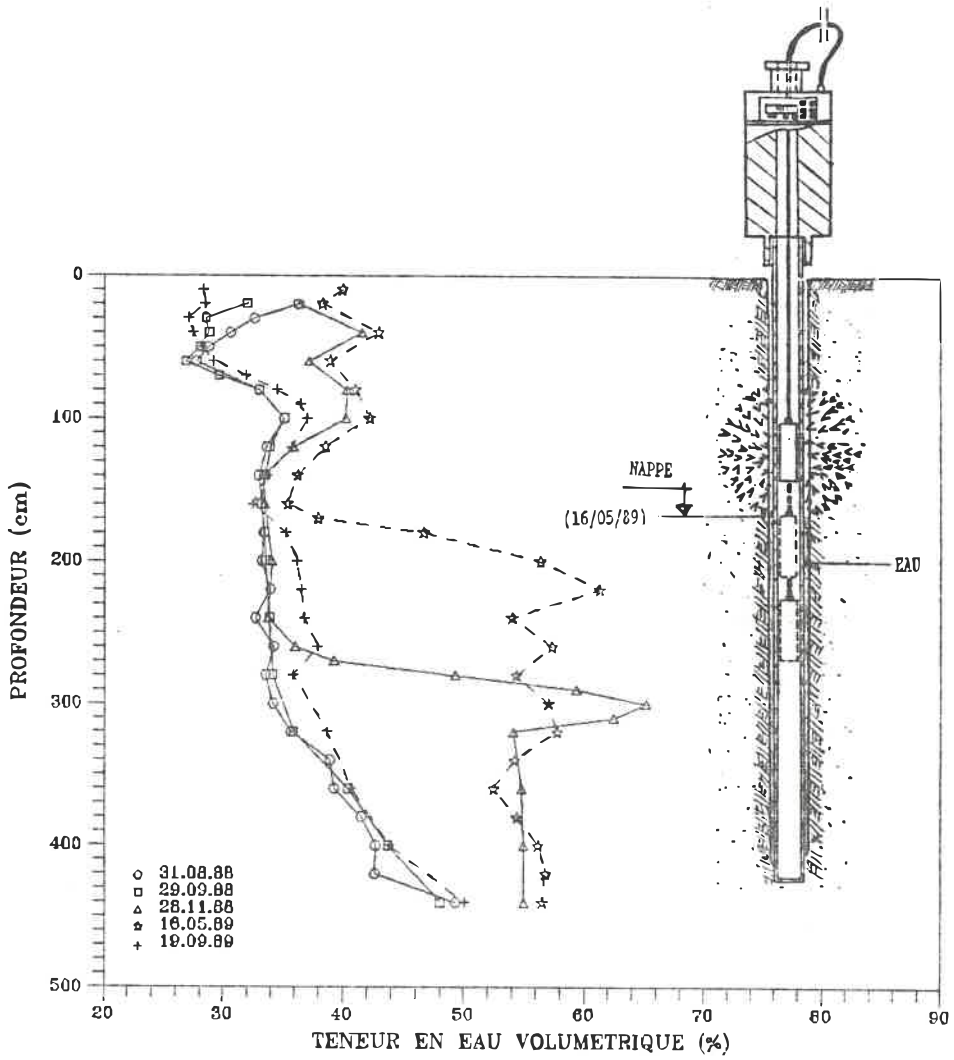


Figure 4.30
Effet de l'espace annulaire entre le tube d'accès et la surface intérieure du forage sur la teneur en eau mesurée in-situ (site no. 3, erable)

conséquent, lorsque la nappe monte, cet espace entre le tube et la surface interne du forage sera rempli d'eau. Lors de mesure de la teneur en eau du sol in-situ à l'aide de l'appareil à neutrons, les neutrons rapides émis par la sonde seront ralentis par les atomes d'hydrogène de l'eau intestitielle et ceux de l'eau se trouvant entre le tube et la surface interne du trou de forage d'où l'appareil compte en plus de la teneur en eau du sol, la quantité d'eau dans cet espace annulaire donnant ainsi une mesure plus élevée qui devra être corrigée. La figure 4.30 illustre ce phénomène et explique comment les profils de la teneur en eau ont été corrigées.

- Orme

L'orme a été coupé le 26 aout 1988, et par conséquent presque toutes les mesures de la teneur en eau du sol n'ont pas été affectées par la transpiration de l'orme sauf celle du 07/07/88. La figure 4.31 met en évidence l'effet du jeu entre le tube et la surface intérieure du forage qui se remplit d'eau lorsque la nappe monte. En regardant la figure 4.31, on peut dire que le 31/08/88 la nappe était à 2.7m de profondeur puisque au-delà de cette profondeur la teneur en eau du sol passe de 36% à 68% sur une couche de 30cm.

Les résultats présentés sur les figures 4.31 à 4.33

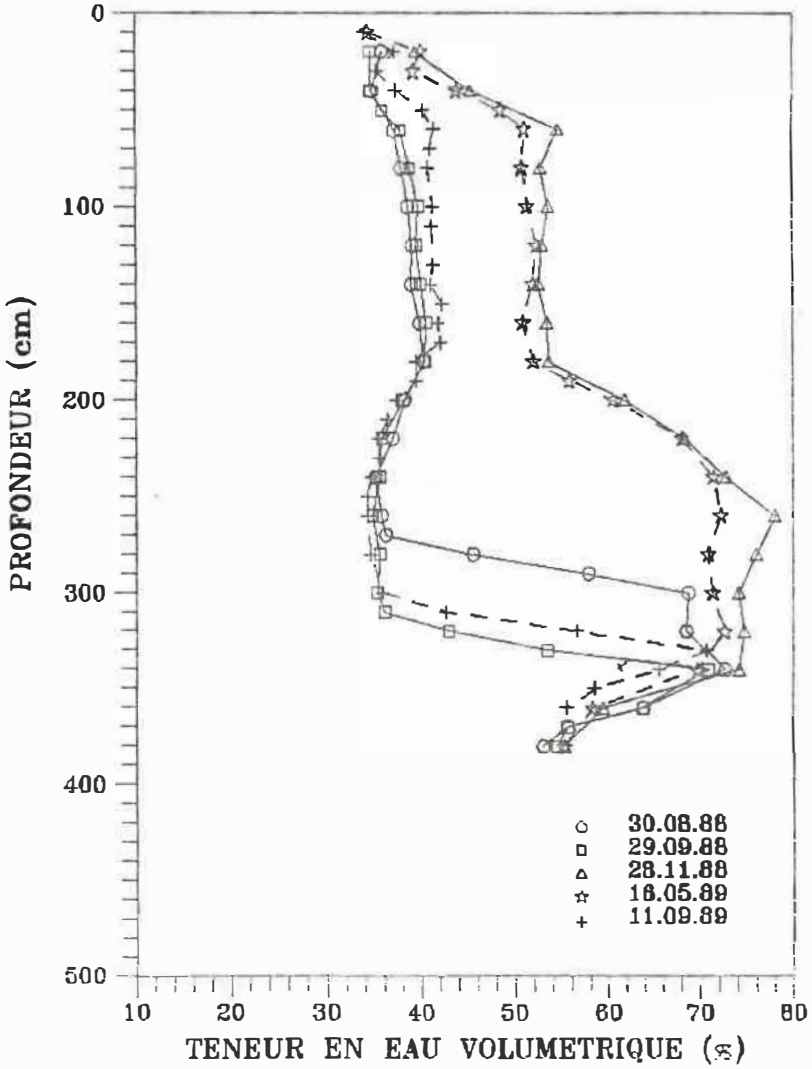


Figure 4.31
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 30-08-88 au 11-09-89 a 0.36h de l'orme (site no. 3)

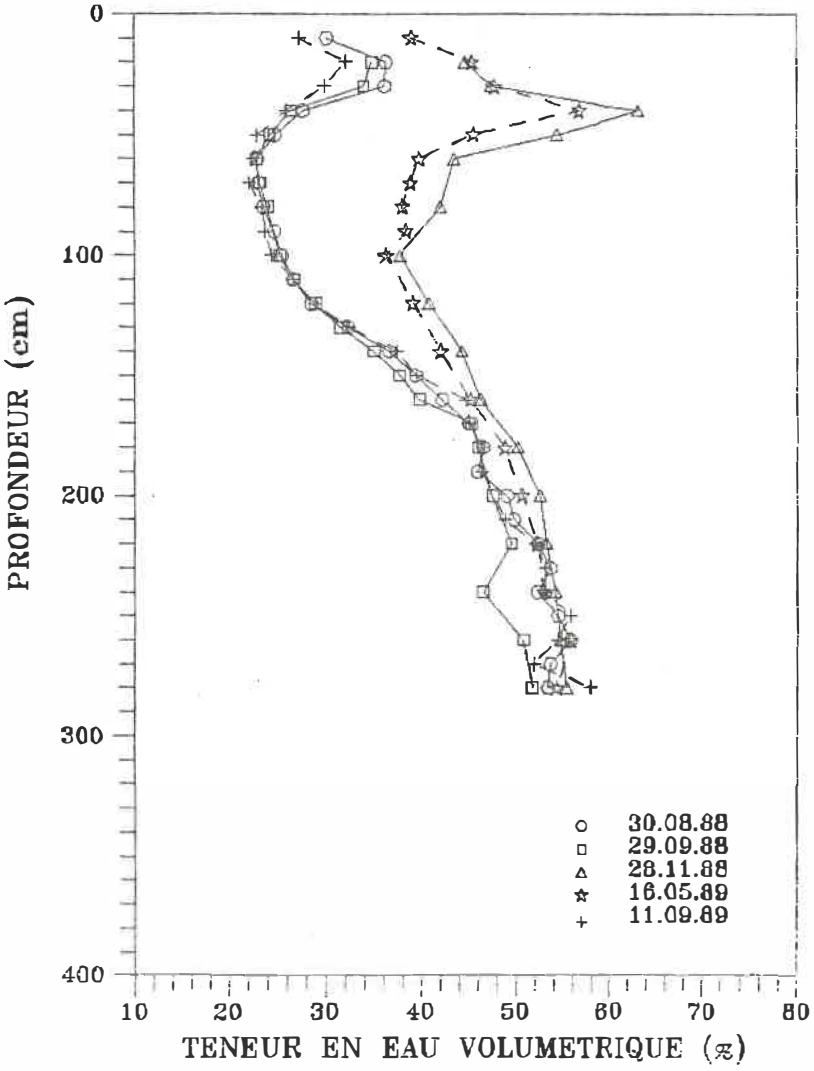


Figure 4.32
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 30-08-88 au 11-09-89 a 1.48h de l'orme (site no. 3)

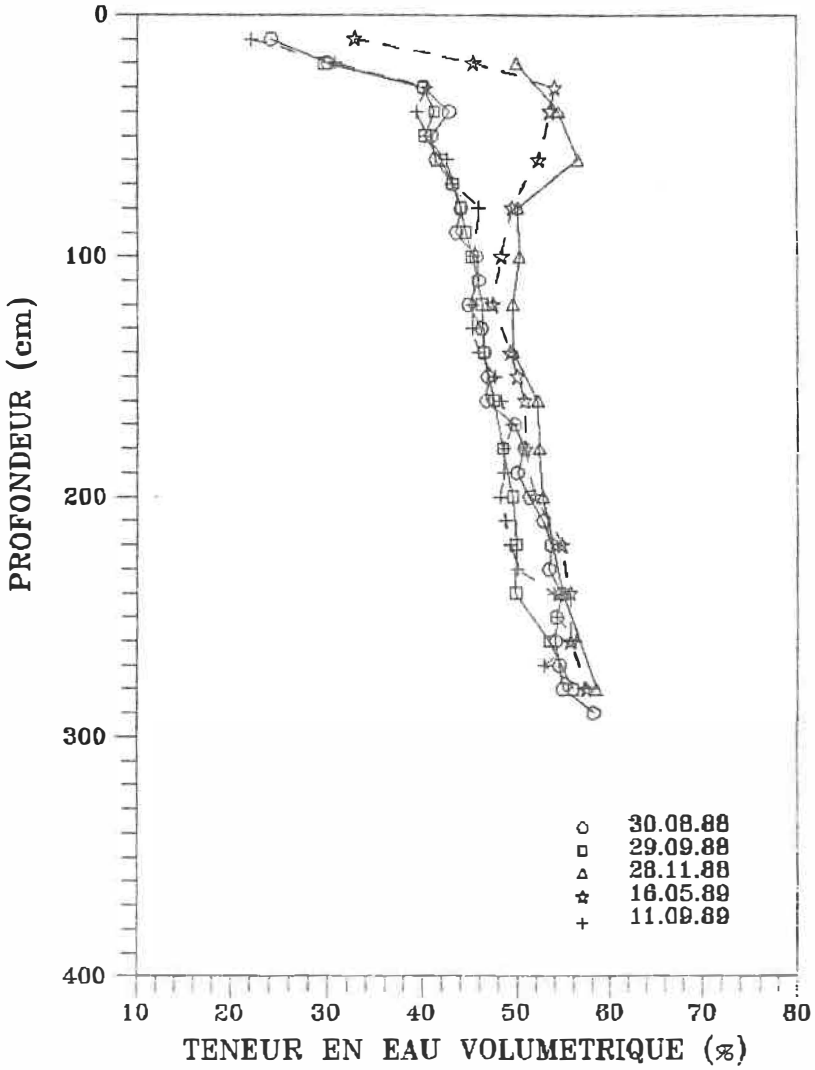


Figure 4.33
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 30-08-88 au 11-09-89 a 1.96h de l'orme (site no. 3)

montrent qu'il ya un cycle d'assèchement et de réhumidification qui se produit chaque année. Les profils de la teneur en eau du sol mesurés au debut de l'automne 88 qui représentent l'état sec du sol pour cette même année, atteignent leurs maximums au debut de printemps 89 et représentent aussi l'état le plus humide du sol. Le même cycle recommence au debut de l'automne 89.

- Rangée de peupliers

Les figures 4.34 à 4.40 illustrent la variation de la teneur en eau du sol du 31/08/88 au 19/09/89 à différentes distances de la rangée d'arbres (0.09h, 0.18h, 0.46h, 0.92h, 1.38h et 1.84h), ou h est la hauteur moyenne des arbres; celles nous renseignent aussi sur l'évolution de la profondeur d'assèchement du sol en fonction de la distance par rapport à la rangée d'arbres. La profondeur d'assèchement est de 2m à 0.09h de la ligne de peupliers avec une réduction moyenne de la teneur en eau de 7.5% (voir fig. 4.34). A 0.18h de la rangée, la profondeur asséchée en 1989 est de 1.5m avec une variation de la teneur en eau de 10% (voir fig.4.33). Plus loin, à une distance presque égale à la hauteur moyenne de la rangée d'arbres (0.92h), on a enrégistré une réduction de 6% de teneur en eau entre le 16/05/89 et 19/09/89, et ce sur une profondeur de 1.2m (voir fig.4.38). Pour des distances

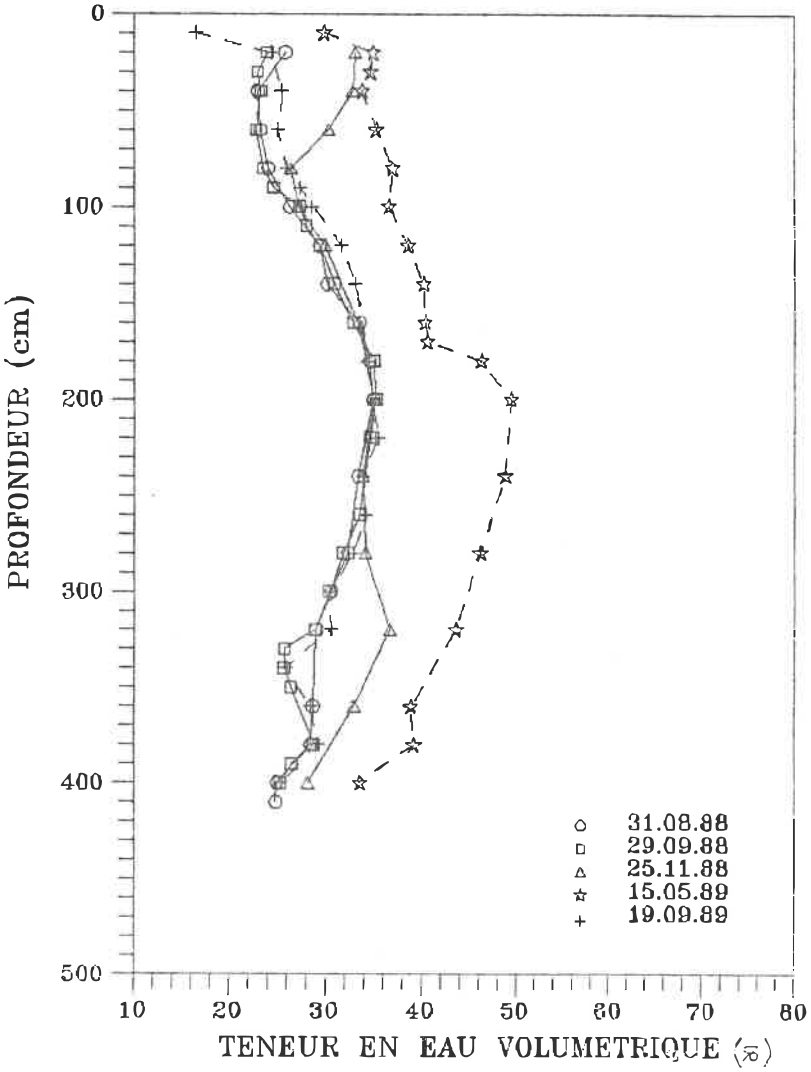


Figure 4.34
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 0.09h de la ligne de peupliers (site no. 3)

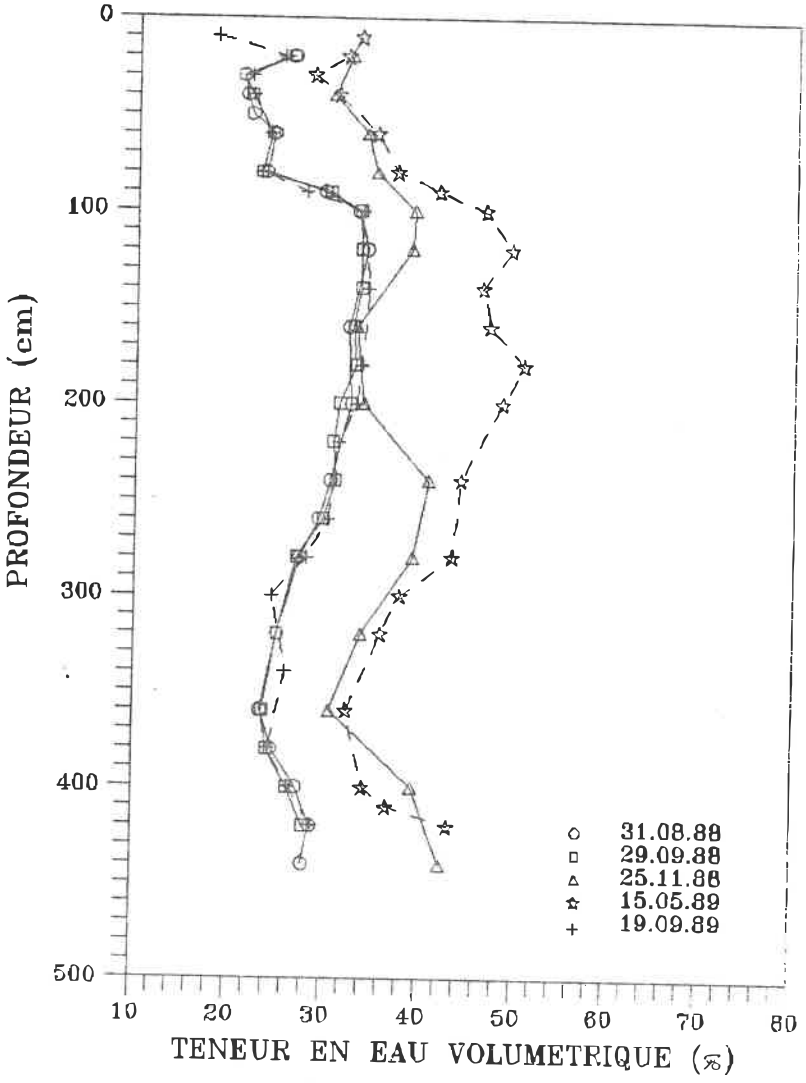


Figure 4.35
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 0.16h de la ligne de peupliers (site no. 3)

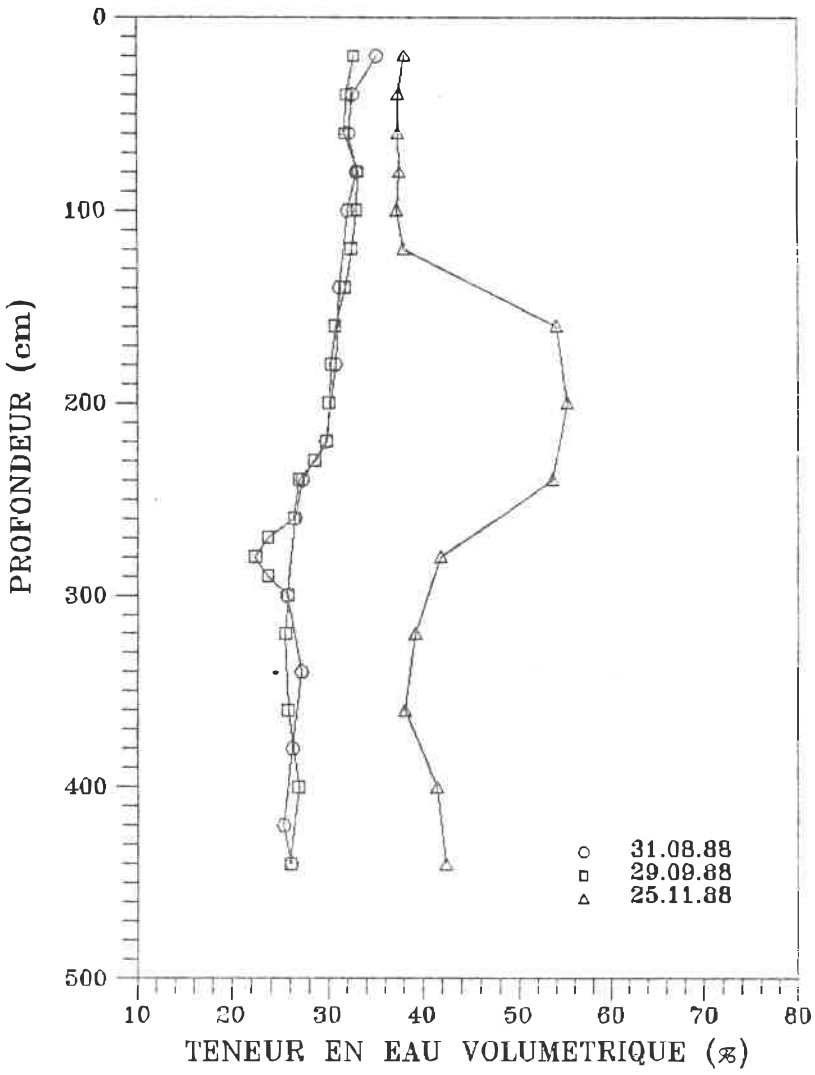


Figure 4.36.
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 25-11-88 a 0.28h de la ligne de peupliers (site no. 3)

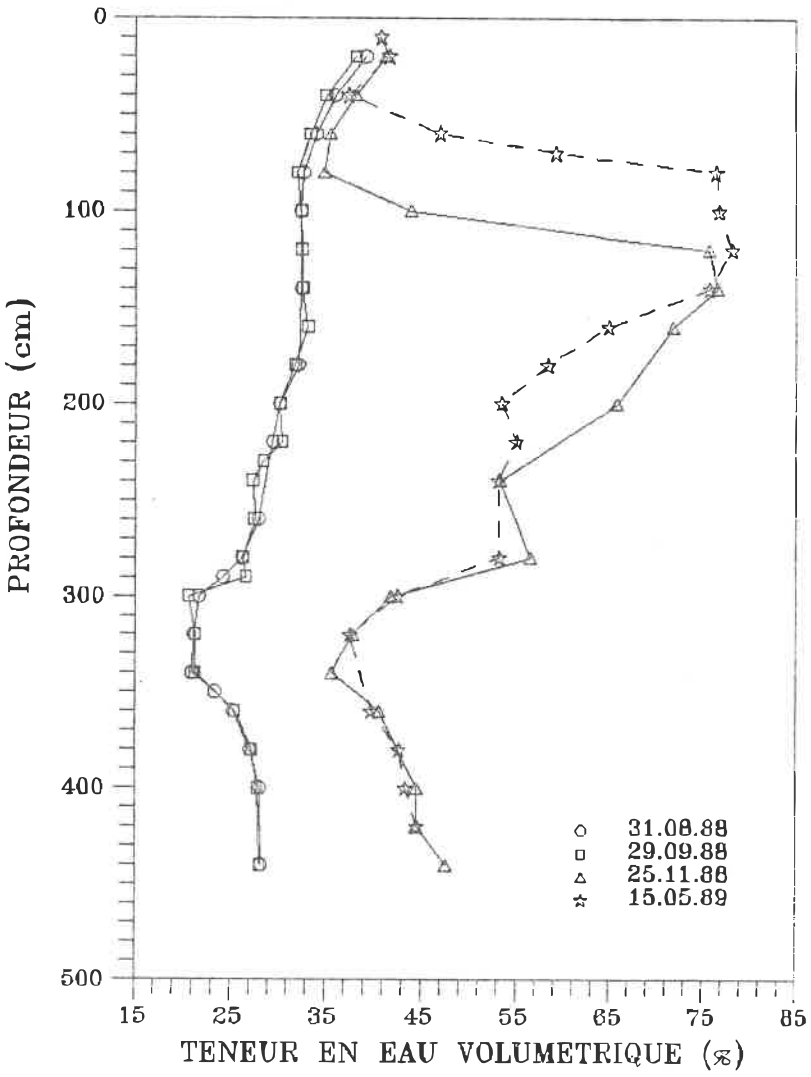


Figure 4.37
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 15-05-89 a 0.46h de la ligne de peupliers (site no. 3)

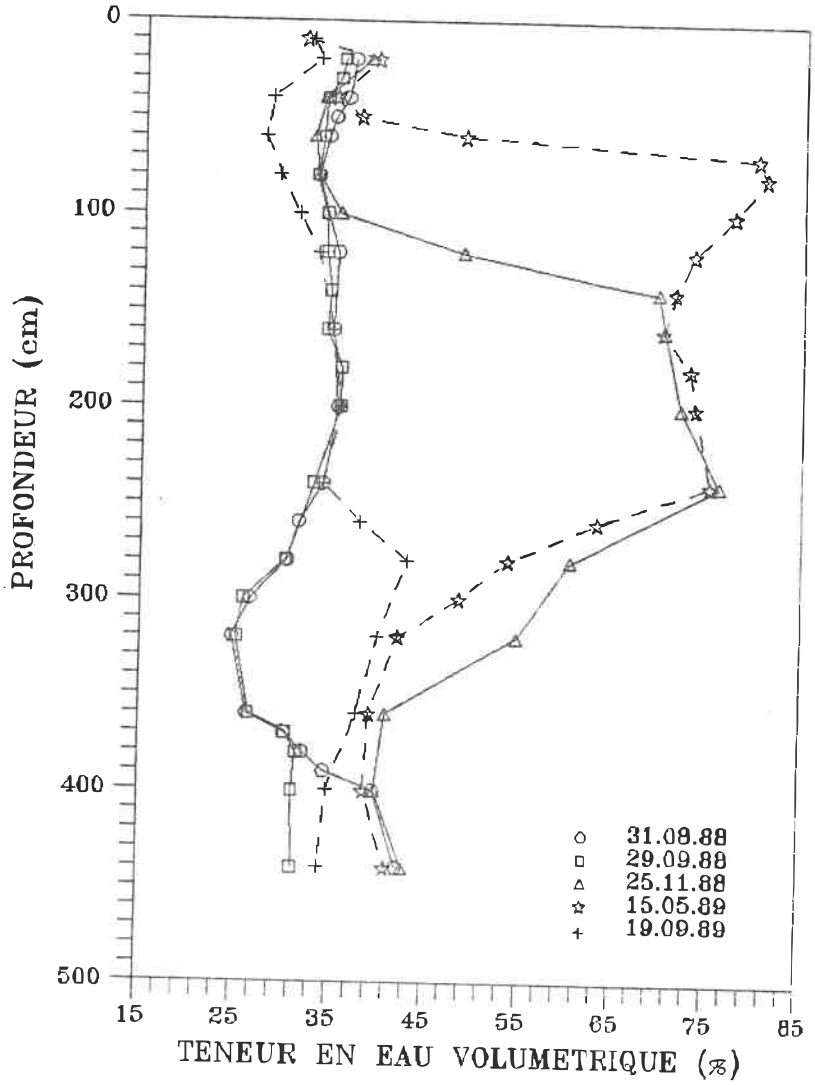


Figure 4.38
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 0.92h de la ligne de peupliers (site no. 3)

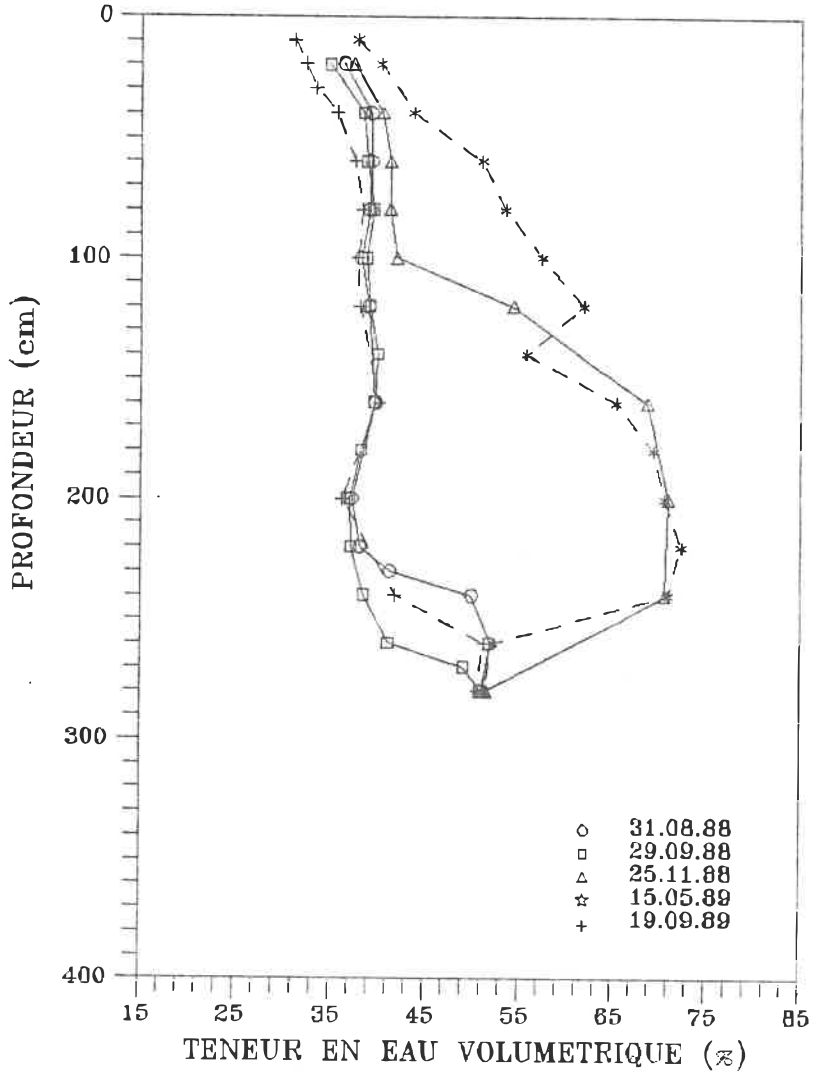


Figure 4.39
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 1.38h de la ligne de peupliers (site no. 3)

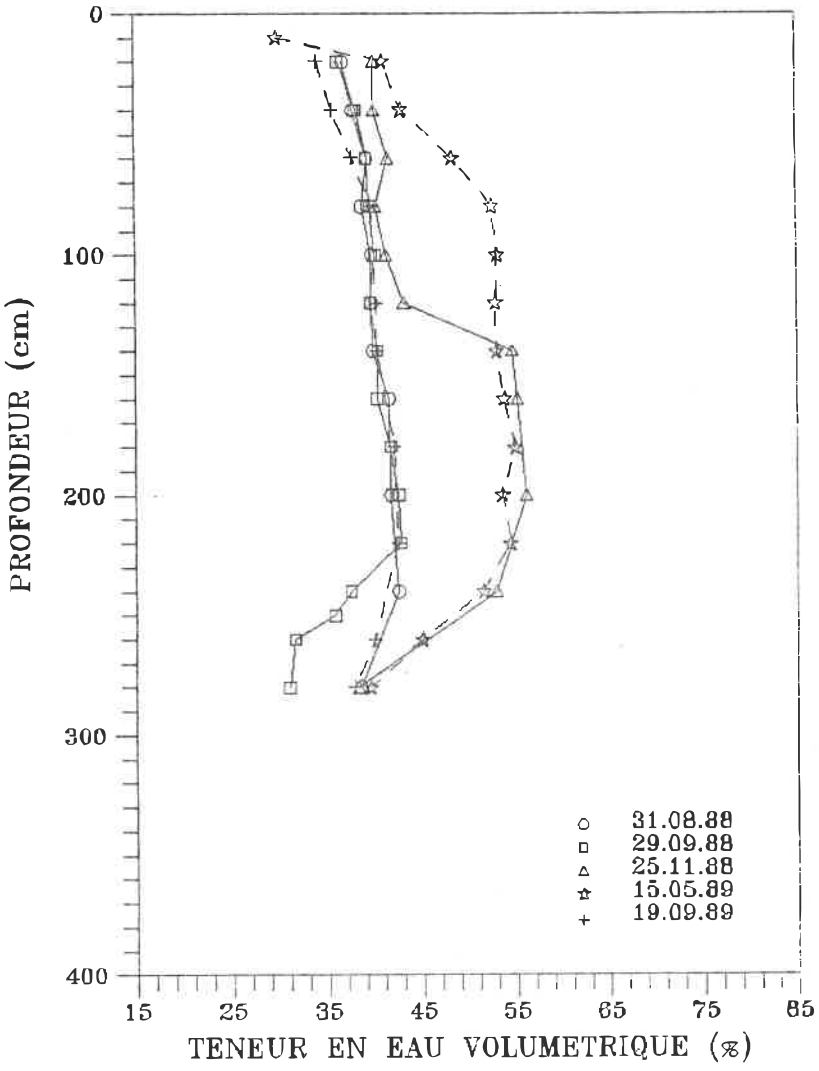


Figure 4.40
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 1.84h de la ligne de peupliers (site no. 3)

supérieures à 0.92h, le sol n'est pas affecté par les racines de la rangée de peupliers et la profondeur déssechée n'a pas dépassé 1m (voir fig. 4.40).

Les mesures de la teneur en eau prises le 29/09/88 mettent en évidence l'existence d'un déficit semi-permanent, c'est-à-dire que les profils de teneur en eau du sol montrent un sol plus sec au fur et à mesure qu'on se raproche de la rangée de peupliers (voir fig. 4.41). Ces déficits d'eau semi-permanents peuvent être la cause du problème de soulèvement des fondations à la suite de la coupe d'arbres; c'est-à-dire qu'après l'abattage d'arbres, le sol commence à se rehydrater et un gonflement peut se produire à long terme.

- Erable

Les graphiques de variations du profil de la teneur en eau du sol dans le temps et à différentes distances de l'érable (voir fig. 4.42 à 4.48), montrent qu'à une distance de 0.1 fois la hauteur d'arbre (0.1h), l'activité des racines de l'érable atteint une profondeur de 3.2m (voir fig 4.42). La profondeur d'activité des racines diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'érable et atteint 2m à 0.2h, 1.3m à 0.32h et 0.68h, et devient inférieure à 1m à des distances supérieurs à 1.09h (voir figs. 4.42 à 4.48).

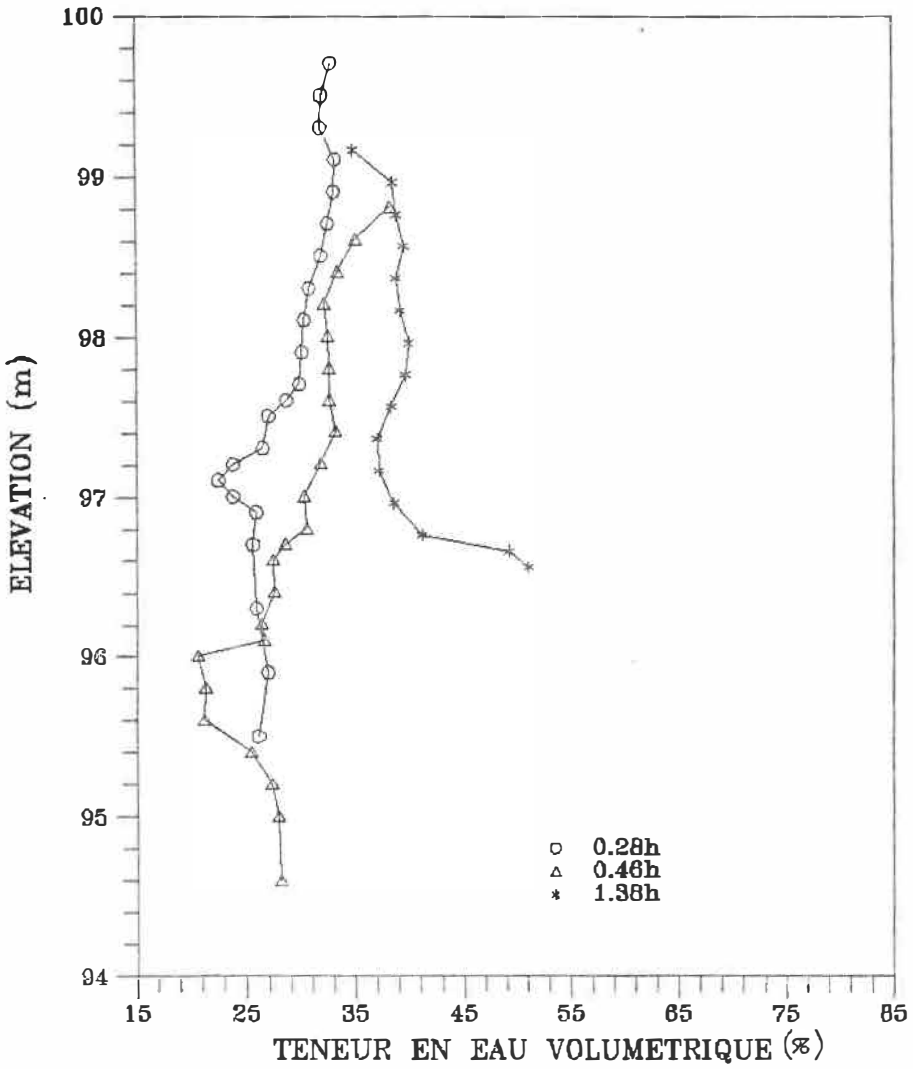


Figure 4.41
Profils de la teneur en eau du sol a 0.28h 0.46h et 1.38h de la ligne de peupliers mesures le 29-09-88 (site no. 3)

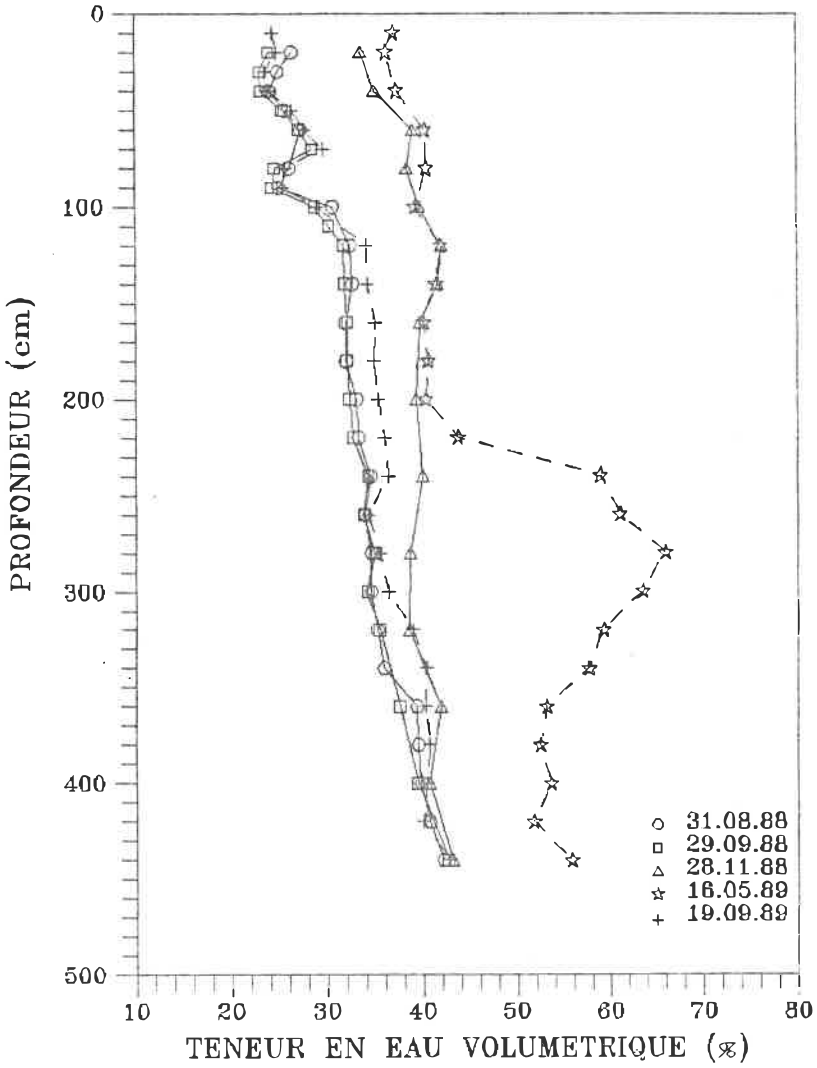


Figure 4.42
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 0.10h de l'erable (site no. 3)

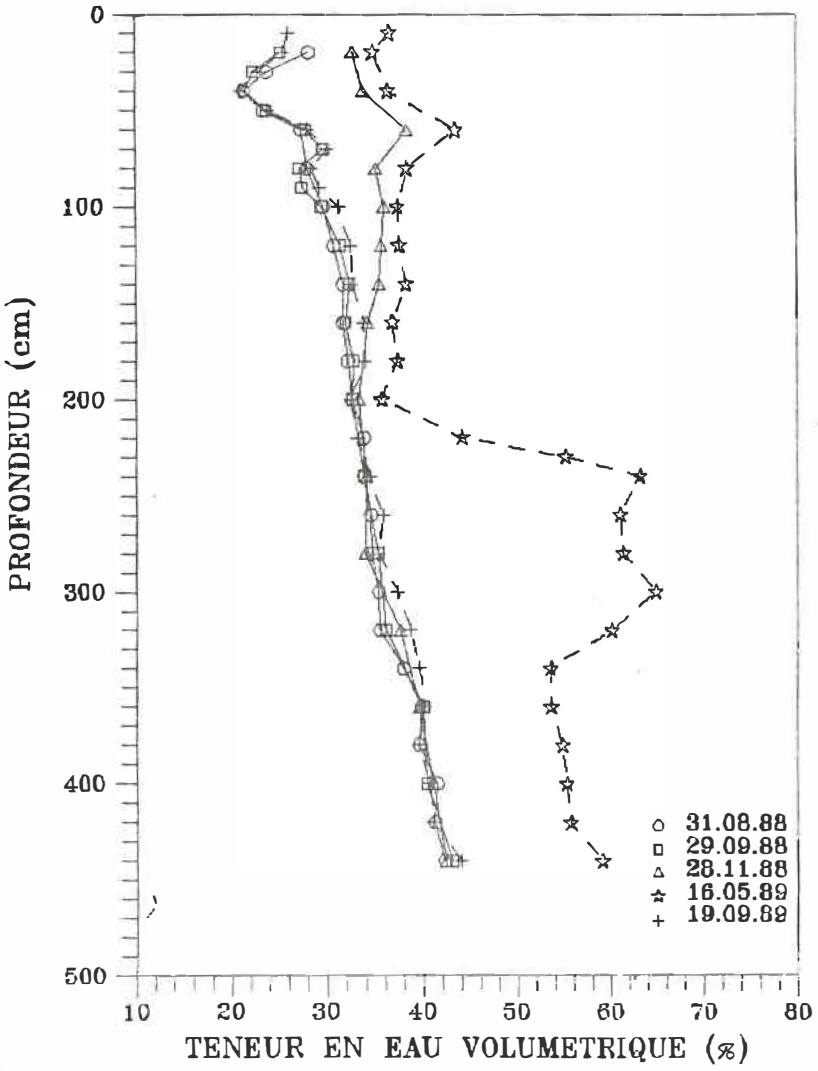


Figure 4.43
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 0.20h de l'erable (site no. 3)

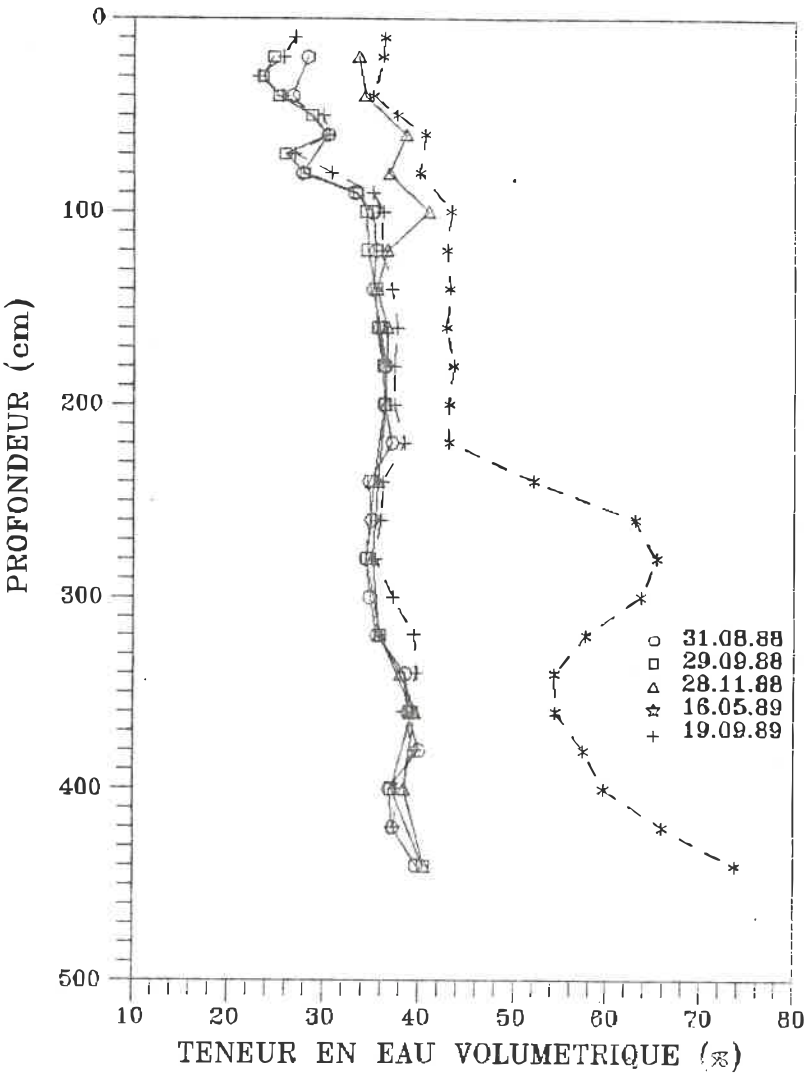


Figure 4.44
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 0.32h de l'erable (site no. 3)

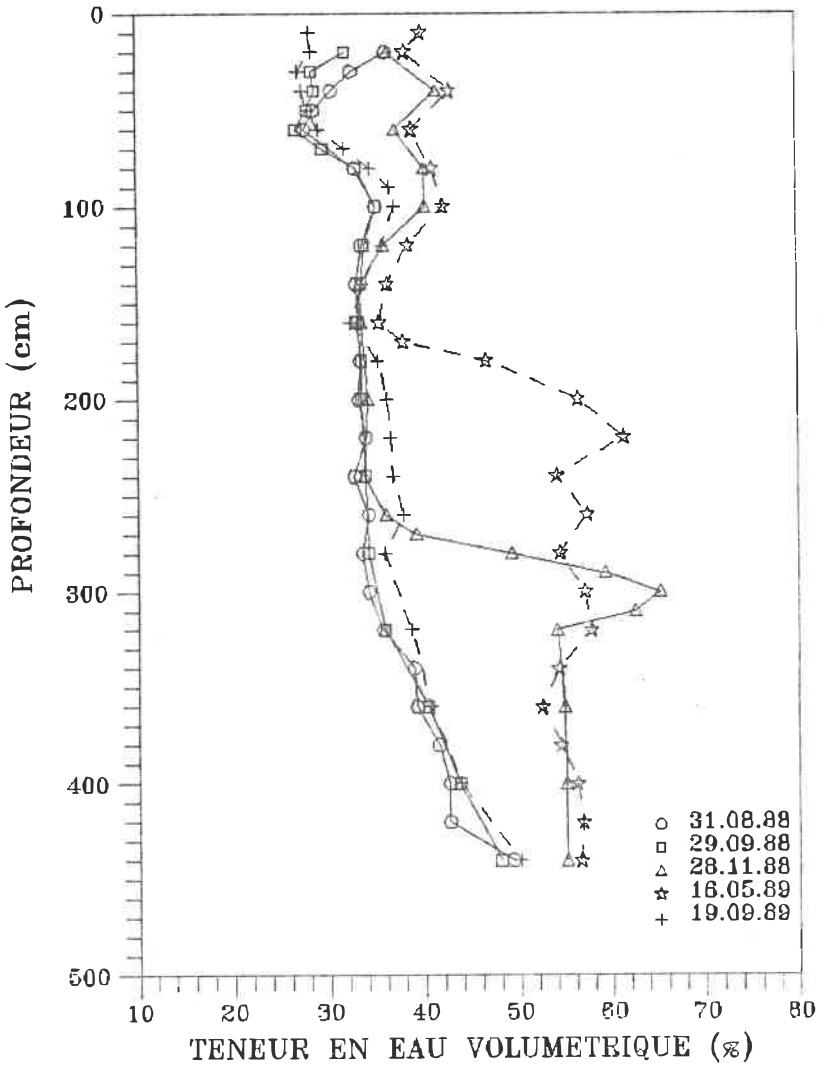


Figure 4.45
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 0.68h de l'erable (site no. 3)

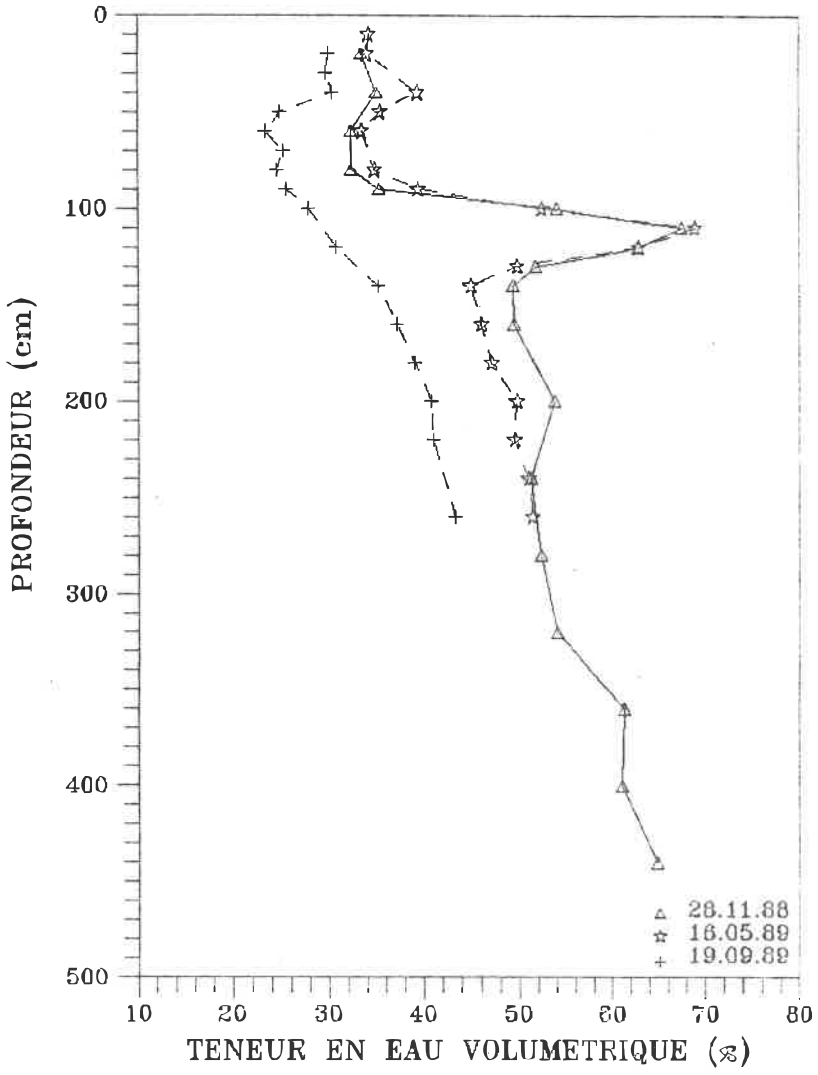


Figure 4.46
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 28-11-88 au 19-09-89 a 1.09h de l'erable (site no. 3)

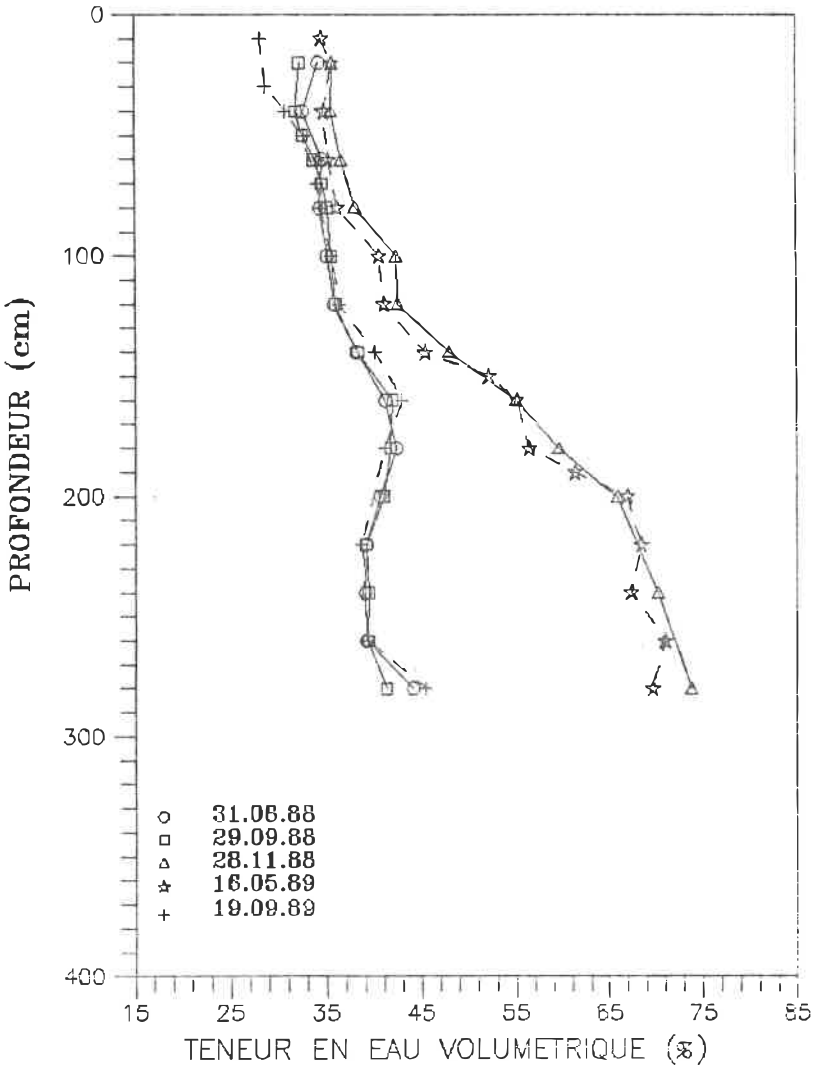


Figure 4.47
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 1.63h de l'erable (site no. 3)

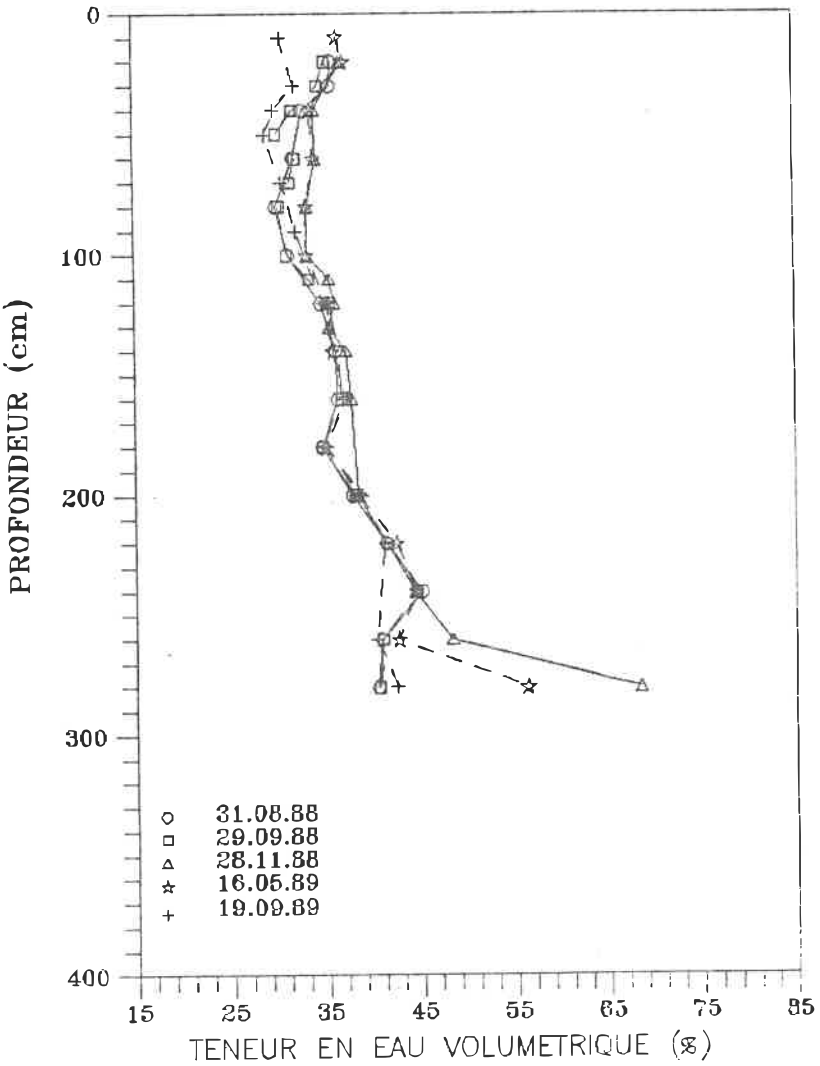


Figure 4.48
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 2.16h de l'erable (site no. 3)

Peuplier à feuilles daltoniennes

Durant la période du 31/08/88 au 19/09/89, la profondeur de la nappe était à une profondeur variant entre 10 cm et 1.5m. Par conséquent, la majorité des mesures de teneur en eau ont été affectées par l'existence de l'espace annulaire entre les tubes d'accès et la surface intérieure du forage (voir figs. 4.49 à 4.55).

4.4.2 Courbes d'égal déficit

La figure 4.56 (ligne de peupliers) montre que son effet s'étend sur une profondeur de 180 cm, jusqu'à une distance de 0.50h. Le déficit maximum atteint est de 150 mm près de la rangée de peupliers. La profondeur affectée par la présence d'arbres est 1.5m pour les distances variant entre 0.5h et 1.0h avec un déficit à la surface de 50 mm.

Par contre la figure 4.57 (érable) illustre que son effet est plus profond que celui causé par la ligne de peupliers; ceci est probablement dû à la taille exceptionnelle de l'érable (ayant un diamètre du tronc de 1.5m et une hauteur de 20m) en comparaison avec les peupliers qui ont un diamètre moyen de 30cm et une hauteur moyenne de 18.5m. A

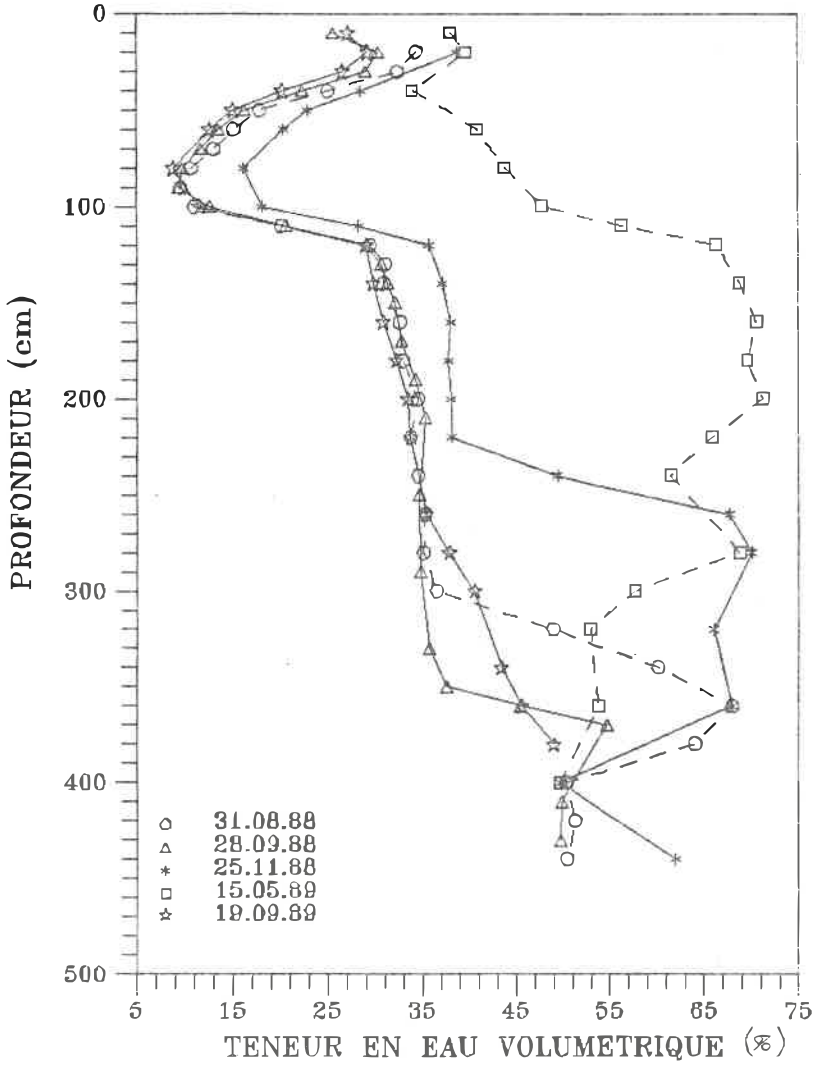


Figure 4.49
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-88 a 0.11h du peuplier (site no. 3)

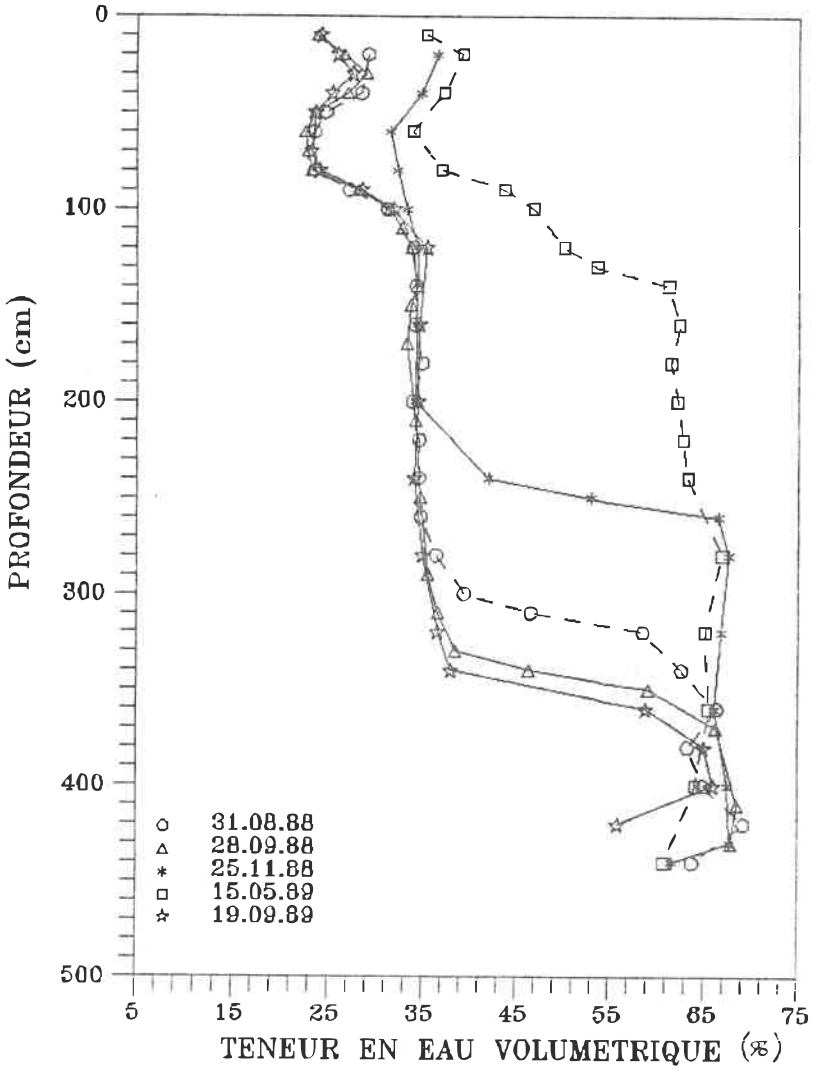


Figure 4.50
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-88 a 0.25h du peuplier (site no. 3)

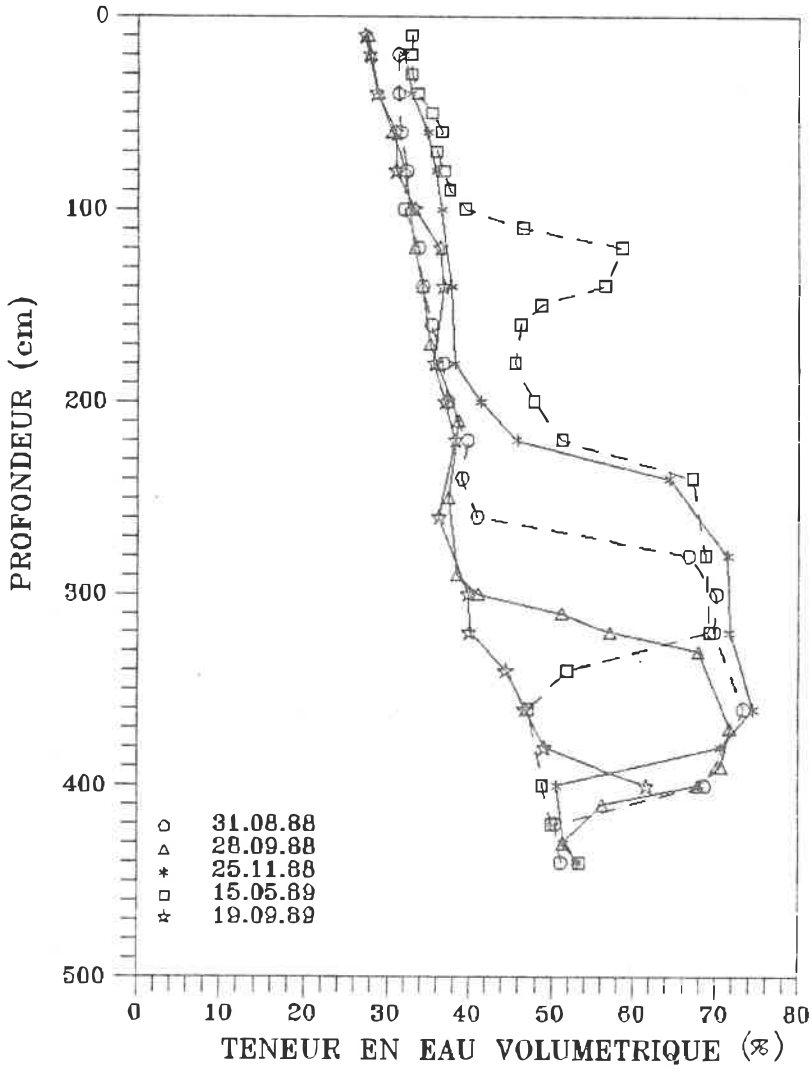


Figure 4.51
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-88 a 0.39h du peuplier (site no. 3)

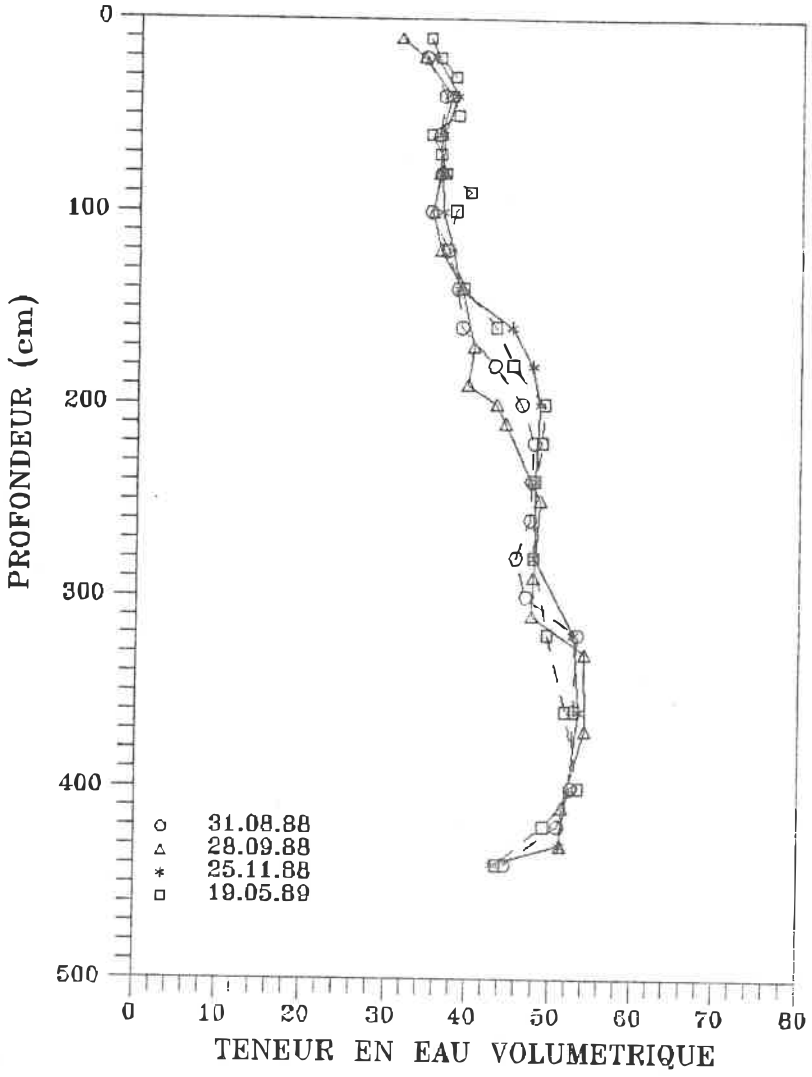


Figure 4.52
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 0.66h du peuplier (site no. 3)

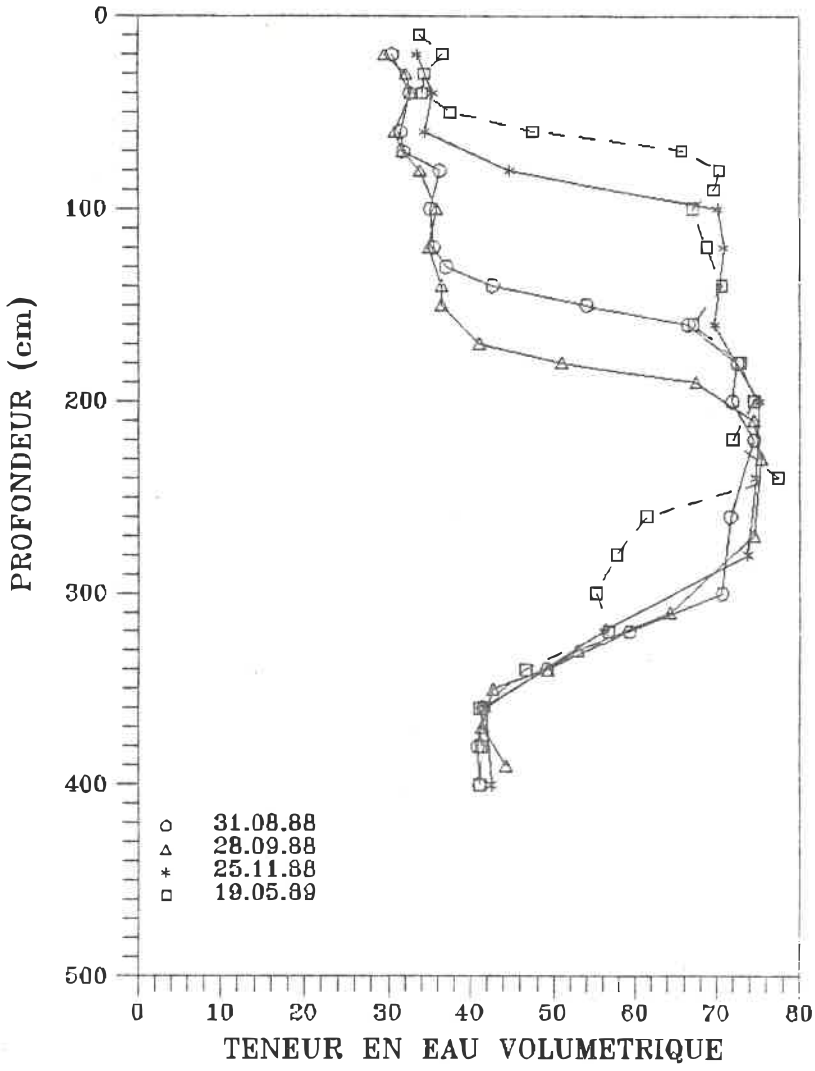


Figure 4.53
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 1.56h du peuplier (site no. 3)

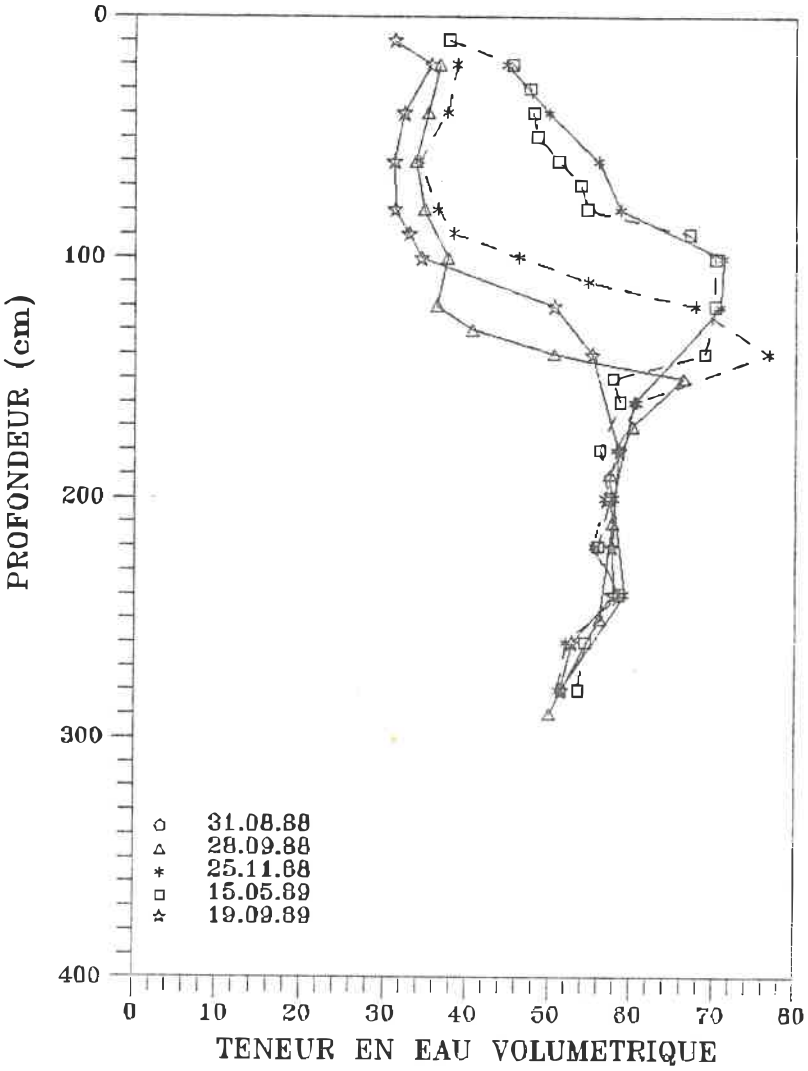


Figure 4.54
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 2.0h du peuplier (site no. 3)

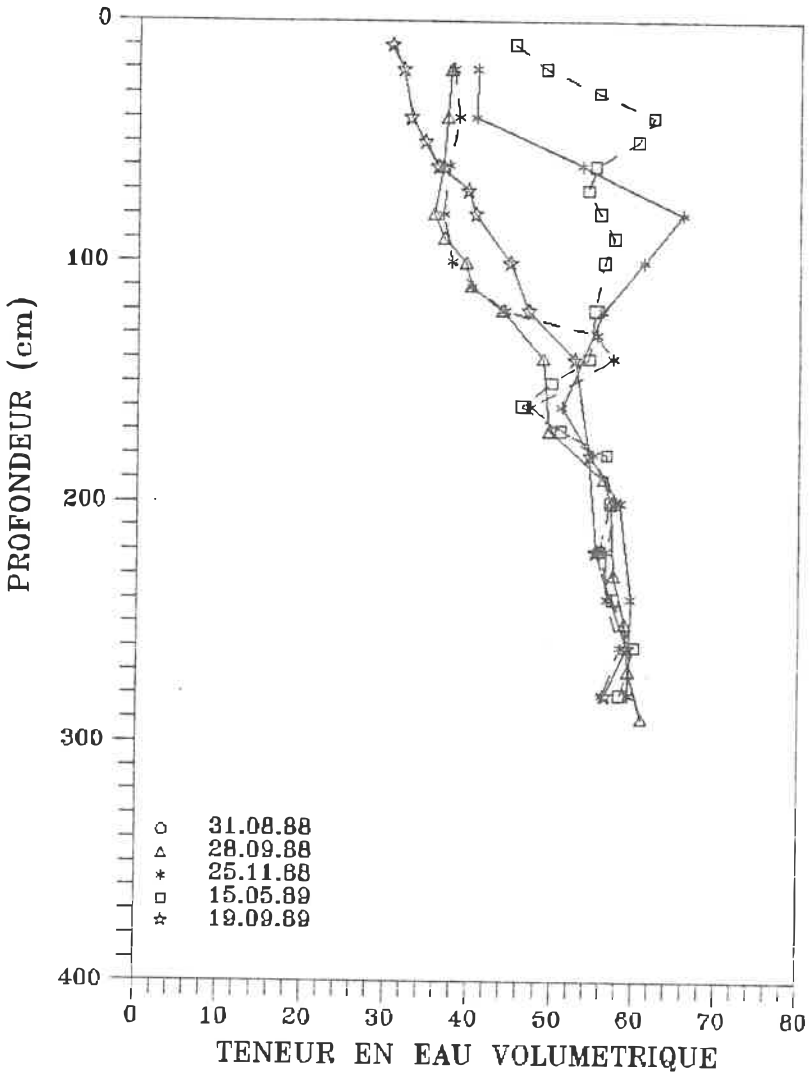


Figure 4.55
Variation du profil de la teneur en eau du sol du 31-08-88 au 19-09-89 a 2.67h du peuplier (site no. 3)

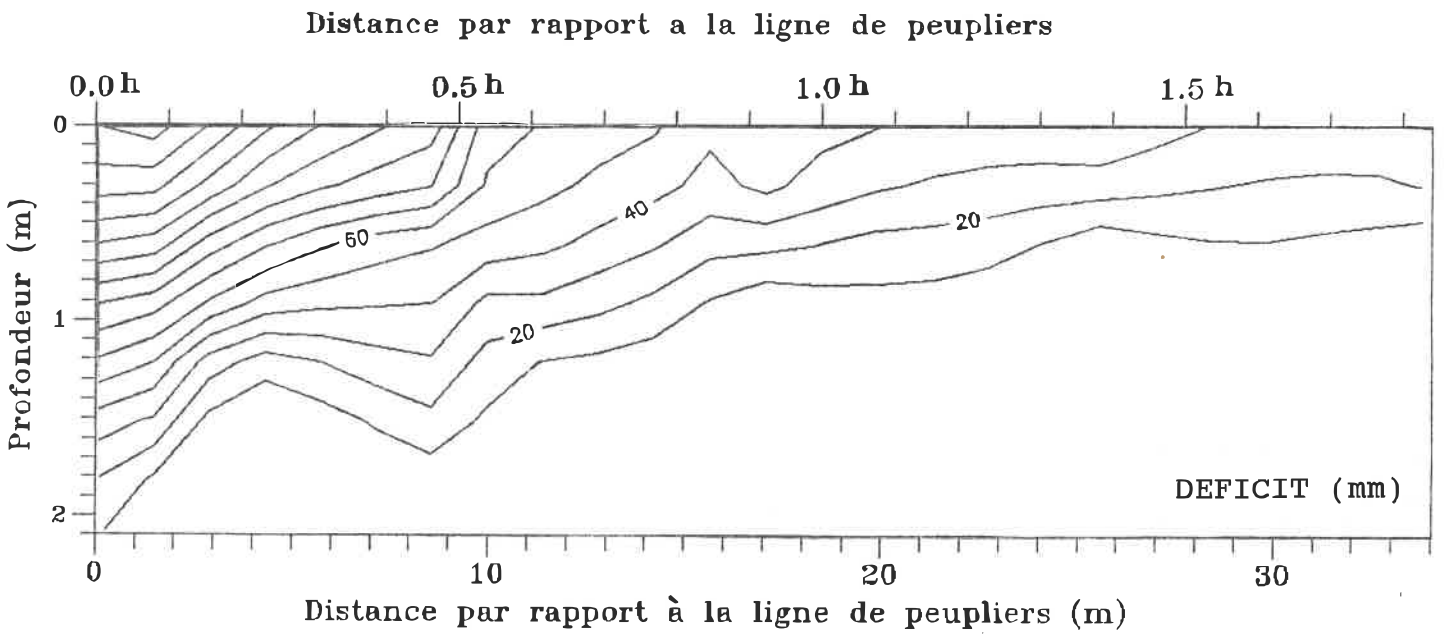


Figure 4.56
Déficit de l'humidité du sol (ligne de peupliers)

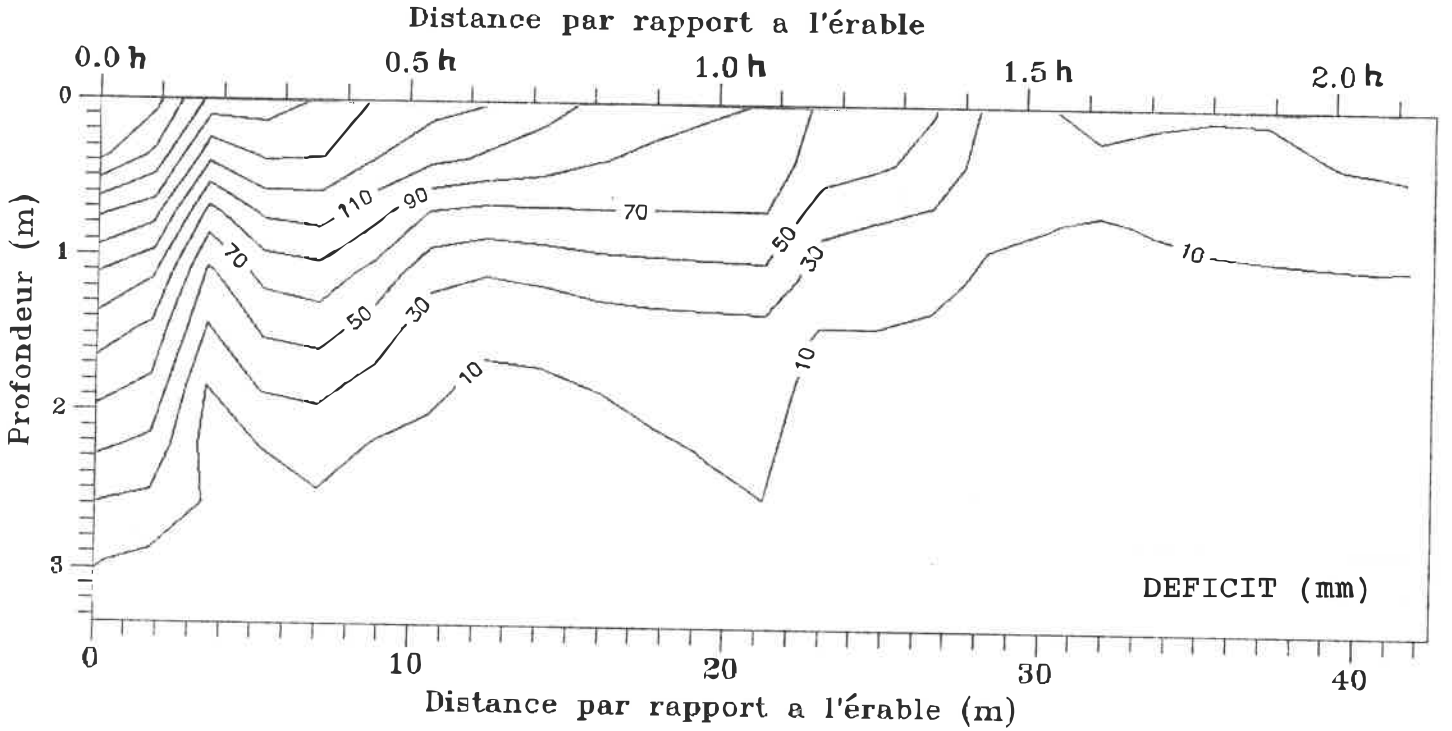


Figure 4.57
Déficit de l'humidité du sol (érable)

proximité de l'érable le déficit a atteint 240 mm avec une profondeur d'assèchement de 3.2m. Jusqu'à une distance égale à la hauteur de l'érable, la profondeur déssechée est en moyenne de 2m et le déficit est de 90 mm. Pour des distances supérieures à 1.0h, la profondeur asséchée tombe à 1m.

La figure 4.58 illustre les courbes d'égal déficit pour le peuplier (30m de hauteur et 87cm de diamètre). On constate que le déficit est localisé sur la distance de 0.5h par rapport au peuplier et sur une profondeur de 2.8 m. Le déficit maximum atteint est de 180 mm à proximité du peuplier. A des distances supérieures à 0.5h, la profondeur asséchée est en moyenne de 1.7m avec un déficit à la surface de 60 mm.

4.4.3 Variation saisonnière de la profondeur de la nappe

Comme on l'avait mentionné au cours de notre analyse, la nappe varie en fonction des saisons. La figure 4.59 illustre la variation saisonnière de la profondeur de la nappe à 1.0h de l'orme, 1.56h du peuplier et 0.92h de la ligne de peupliers. On constate en général qu'au debut du printemps, la profondeur de la nappe est à la surface du sol (ou près), puis celle-ci descend graduellement et atteint son niveau minimum au début de l'automne.

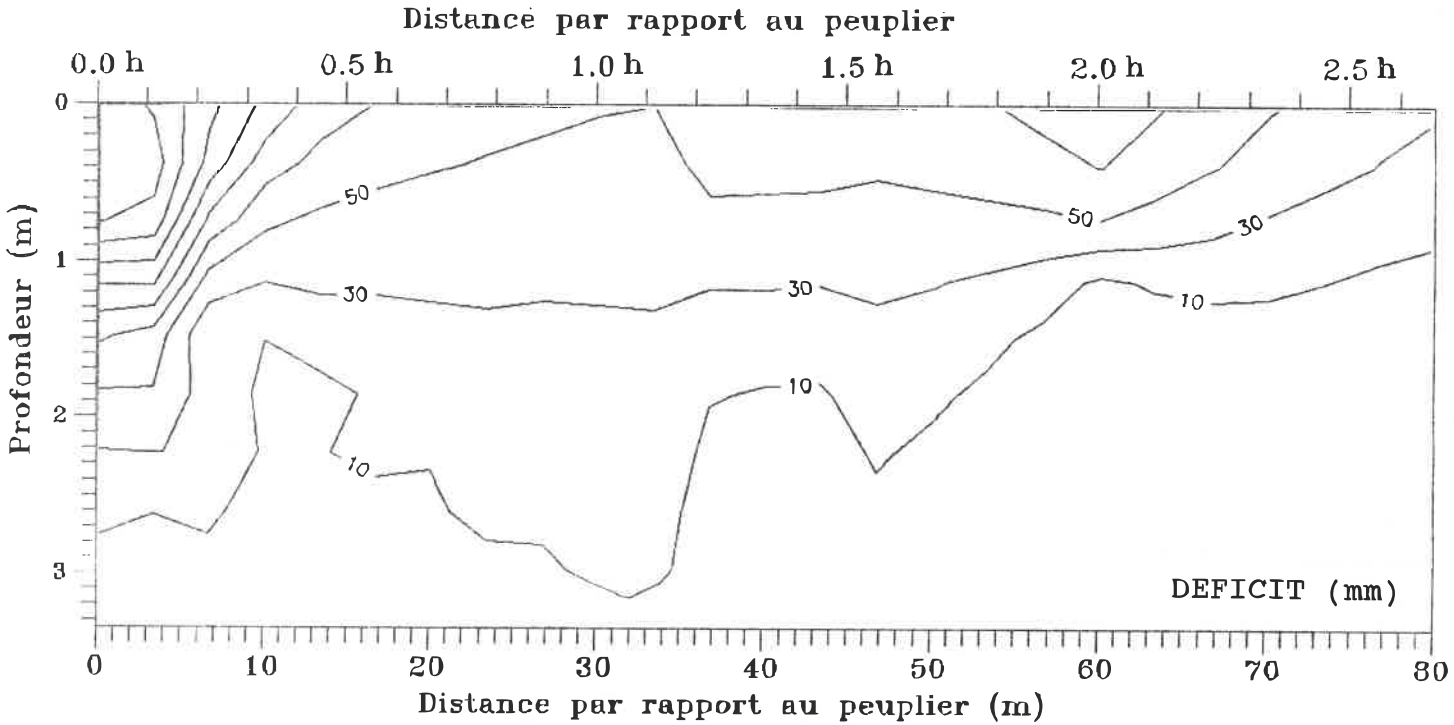


Figure 4.58
Déficit de l'humidité du sol (peuplier)

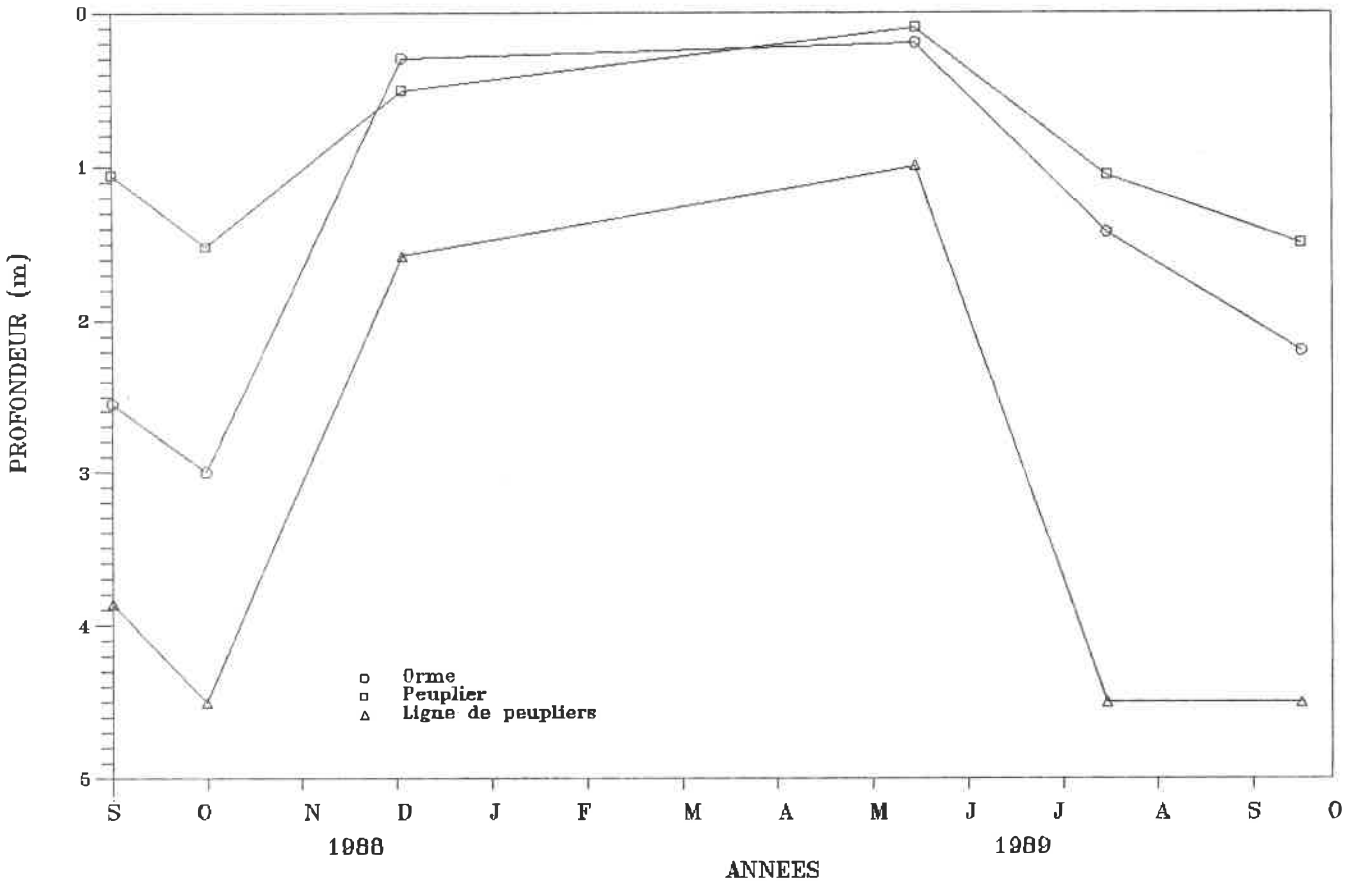


Figure 4.59
Variation saisonnière de la profondeur de la nappe du 30/08/88 au 19/09/89 (site no.3)

CHAPITRE 5

CONCLUSION

La reconnaissance des risques de problèmes de gonflement ou de retrait est trés importante dans les premières phases de planification et le choix de type de fondations. Comme on l'a mentionné au debut du chapitre 2, le diagramme représenté dans la figure 2.1 est important dans la classification du type de sol au point de vue degré probable de mouvement.

Les résultats de l'épuisement de l'humidité du sol (1930-88) montrent que la région de Montréal a été l'objet de plusieurs saisons de sècheresse durant lesquelles des problèmes de fondations sont survenus. Parmi les années les plus sèches 1944, 1948, 1955, 1960 et 1983, l'épuisement de l'humidité du sol a dépassé le seuil de 180 mm (la valeur au-delà de laquelle, un affaissement peut survenir au dessous du niveau des fondations peu profondes). L'estimation du SMD de l'année en cours sur une base journalière où hebdomadaire peut être trés utile afin de prédire si l'été est relativement sec ou humide et prendre des mesures correctives en fonctions de la situation.

L'assèchement de l'argile de la mer Champlain rompt la structure floculée, forçant les particules à se réarranger plus ou moins parallèlement, causant ainsi un affaissement au sol. Afin de minimiser l'effet du mouvement des sols causé par le dessèchement, les espaces verts et les arbres qui se trouvent à proximité des maisons doivent être arrosés fréquemment durant les mois d'été.

En pratique, il existe deux solutions au problème d'affaissement ou de gonflement des sols:

1- Estimer le potentiel de gonflement ou de retrait puis essayer de l'éviter en projetant les fondations au dessous de la zone de dessication existante ou probable, en d'autres mots au dessous de la zone d'activité des racines,

2- Accepter la plantation des arbres à proximité des maisons à condition de tenir compte de leurs effets lors de la conception de la structure et de la fondation.

Les corrélations entre le déficit d'eau, le tassement et le SMD à 0.4h de la ligne de l'érables illustrent que l'amplitude du mouvement est proportionnel au SMD et inversement proportionnelle à la profondeur; c'est-à-dire que plus on s'eloigne de la surface du sol, plus l'effet du besoin de l'atmosphère sur la couche du sol décroît.

Les résultats des lignes d'égal déficit montrent qu'à proximité de l'arbre, la profondeur dessèchée peut dépasser 3.2m (cas de l'érable) avec un déficit de 240 mm. L'effet de l'activité des racines d'un arbre peut aller jusqu'à une distance égale à sa hauteur; par exemple à cette distance de l'érable, la profondeur dessèchée est de 2.3m, donc importante.

En ce qui concerne les recherches futures, il sera intéressant de placer des tassomètres à différentes distances des arbres et prendre des mesures hebdomadaires ou tous 15 jours de teneur en eau in-situ et de tassement, surtout en été. Ceci est dans le but d'obtenir des données en nombre suffisant pour établir des normes concernant la proximité des arbres.

BIBLIOGRAPHIE

Baracos, A.and Bozozuk, M.(1957). Seasonal movements in some Canadian clays. Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg., London, vol. 1,pp. 264-268.

Biddle, B.G. (1979). Tree root damage to buildings: An arboriculturist's experience. Arboric. Journ., Vol. 3 (no. 6), pp. 397-472.

Biddle, P.G.(1983). Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils. Geotechnique 33, No.2, pp. 107-126.

Blaney, H.F. and Criddle, W.D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U.S. Dept. Agric. SCS. 96 p.

Bozozuk, M. and Burn, K.N. (1960). Vertical ground movements near elm trees, Geotechnique, Vol. 10 (no. 1), pp. 19-32.

Brochet, P. et Gerbier, N. (1975). L'évapotranspiration. Monographie No. 65, Direction de la Météorologie Nationale, Paris, 98pp.

British Standards Institution (1980). Code of practice for trees in relation to constructions. BS5837. London: British Standard Institution.

Burn, K.N. (1973) House settlements and stees. Proc. Nat. Conf. urban engeneering terrain problems, Ottawa, tech. Mem. No. 103, pp. 41-53.

Burn, K.N. and Penner, E., (1975). Fast-growing trees can cause damage. Buil. Res. Note No. 100, N. R. C.

Canadian Geotechnical Society. Canadian Foundation Engineering Manual, (1985). p. 221.

Criddle, W.D. (1948). Methods of computing consumptive use of water. Journal of Irrigation and Drainage Division, P.A.S.C.E., Vol. 84, p. 1507-1 to 1507-27.

Cutler, D.F. and Richardson, I.B.K. (1981). Tree roots and buildings, Construction Press.

De Boodt, M., and P. Demeester. (1968). A comparative study on the accuracy of the radio-active method for soil moiture determination using thermal and epithermal neutrons. Trans. Intern. Congr. Soil Sci. 9th Congr. Adelaide, Vol. 3, p. 555-564.

Driscoll, R.(1983). The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. Geotechnique, vol.33, No. 2, pp. 93-105.

Ferland, M. (1969). Evapotranspiration potentielle au Québec. Naturaliste Canadien, Vol. 96, pp. 601-619.

Fishesser, B. (1981). Connaître les arbres en 10 leçons, Hachette, Paris, 304 pp.

Halverson, H.G. and Heisler, G.M. (1981). Soil Temperatures under urbain trees and asphalt. United States Department of Agriculture, Forest Service, Reseach paper NE-481.

Hamilton, J.J. (1963). Volume changes in undisturbed clay profiles in Western Canada. Canadian Geotechnical Journal, Vol.1, No. 1.

Hamilton, J.J. (1977). Fondations dans les sols sujets à des gonflements ou à des retraits. Digest de la Construction au Canada, CBD, pp. 184F-184F4.

Hammer, M.J., and Thompson, O.B. (1966). Foundation clay shrinkage caused by large trees. Journ. Soil. Mech., Fondations Div., Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs., Vol. 92, pp. 11-17.

Helliwell, D.R. (1986). The extent of tree roots. Arboricultural Journal, Vol. 10, pp. 341-347.

Holmes, J. W. (1966). Influence of bulk density of soil on the neutron moiture calibration. Soil Sci., Vol. 102, pp. 355-360.

Institut du développement forestier (1980). Les terrains boisés: leur mise en valeur, 2ième édition, Paris, 254pp.

Kaufman, C.M. (1968). Growth of hairy roots, Height and diameter of planted Slash pine. For Sci, Vol. 14, pp. 265-274.

Kramer, P.J. and Kozlowski, T.T. (1975). Physiology of woody plants. Mc Graw-Hill, NY, pp. 41-57 & pp. 97-112.

Lafleur, J.; Silvestri, V; R, Asselin, and Soulié, S. (1988). Behaviour of test excavation in soft Champlain sea clay. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 4, pp. 705-725.

Legget, R.F. et Crawford, C.B., (1967). Arbres et immeubles. Digeste de la construction, NRC Ottawa Sep. No. 62, pp. 1-4.

Mortier, P., De Boodt. (1956). Determination of soil moisture by neutron scattering. Netherlands J. Agric. Sci., Vol.4, 111-113.

National House-Building Council (1969). Root damage par trees-sitting dwellings and specail precautions. Practice Note 3.

Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proc. Roy. Soc. London (A), Vol. 193, p. 120-145.

Perpich, W.M.,lucas, G., and Baker, C.N. 1965. Dessication of soil by trees related to fondation settlement. Canadian geotechnical journal, vol. 2, pp. 13-39.

Renemieras, G. (1976). L'hydrologie de l'ingénieur, Ed. Enroylls, Paris.

Reynolds, E. R. C. (1979). Tree roots and built developments--a review. Report to the Department of Environment. Contract F3/2/148.

Ruark, G.A. Mader, D.L. and Tattar. T.A. (1982). The influence of soil compaction and aeration on the root growth and vigour of trees. A literature review. Part I, Abroricultural Journal, Vol. 6, pp. 251-265.

Seguin, F. (1959). Le monde des plantes. Montréal, 185 pp.

Silvestri, V.; Soulié, M.; Lafleur, J.; Sarkis, G; and Bekkouche, N. (1990). Foundation problems in Champlain clays during droughts: I. Rainfall deficits in Montreal (1930-88) (accepted for publication). Canadian Geotechnical Journal.

Silvestri, V.; Sarkis, G; Bekkouche, N. and Soulié, M. (1990). Laboratory and field calibration of neutron depth moisture gauge for use in high water content soils (paper submitted). American Society for Testing and Materials. Geotechnical Testing Journal.

Silvestri, V.; Soulié, M.; Lafleur, J.; Sarkis, G; and Bekkouche, N. (1990). Foundation Problems in Champlain clays during droughts: II. Case histories (paper in preparation) . Canadian Geotechnical Journal.

Silvestri, V.; Soulié, M.; Lafleur, J.; Sarkis, G; and Bekkouche, N. (1990). Foundation problems in Chaimplain clays during droughts: III. Water content variation around trees (paper in preparation). Canadian Geotechnical journal.

Silvestri, V.; Sirois, M.; and Cincou, A. (1990). Water content-suction relationships in intact clays of Eastern Canada (accepted for publication). Proc. 1990 CSCE Annual Conference, Hamilton, Ont., May 16th-18th 1990.

Thornthwaite, C.W. (1948). Approach Toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review, Vol.38, pp. 55-94.

Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Ann. Agron., Vol. 12, p. 13-49.

Ward, W.H. (1947). The effects of fast growing trees and shrubs on shallow foundations. J. Inst. Landsc. Archit., Vol. 11, pp. 7-16.

Ward, W.H. (1953). Soil movement and weather. Proc.3rd Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg., Zurich, Vol. 4, p. 477-482.

Warkentin, B.P. and Bozozuk, M. (1961). Shrinking and swelling properties of two Canadian clays. Proc. 5th Intern. Conf. Soil. Mech. Found. Eng., Paris, Vol. 3A, pp. 851-855.

Whithers, B. and Vipond, S. (1980). Irrigation design and practice, 2nd Ed., Cornell University Press. Ithaca, 306 pp.

Whitlow, T.H. and Bassuk, N.D. (1987). Trees in difficult sites. Journal of arboriculture, Vol. 13 (no.1), pp. 10-17.

Williams, A.A.B. (1958). Discussion of prediction of heave from double oedometer test by Jennings, J.E.B. and Knight, K. translations, South African Institution of Civil Engineers, Vol. 8 (no. 8).

Williams, A.A.B. & Donaldson, g.W. (1980). Building on expansive soils in south africa: 1973-1980. proc.4th. Conf. expansive Soils, Denver 2, pp. 834-844. New York: American Society of Civil Engineers.

Wyles, R., 1983. The legal aspects of the influence of vegetation on the swelling and shriking of clays. Geotechnique, Vol. 33, No. 2, pp. 89-91

ANNEXE 1

ARBRES ET CES RACINES

A.1.1 Les arbres

A.1.1.1 Généralités

Les arbres qui poussent en milieu urbain exercent un rôle important et sont très appréciés par les citoyens. Cependant, certains espèces d'arbres dont la demande en eau est élevée (peupliers, ormes, saules, érables, etc...) peuvent causer dans le cas des sols argileux, une grande diminution de volume d'eau, ce qui induit des dommages aux constructions urbaines.

A.1.1.2 Les groupes d'arbres

Pour comprendre le phénomène de tassement des sols dû au dessèchement de l'argile causé par les racines d'arbres, il est indispensable de posséder quelques renseignements de base sur les arbres et leur structure.

Les arbres sont des végétaux ligneux, caractérisés par leur axe principal ou tronc, sur lequel prennent naissance des branches secondaires se ramifiant diversement, dont

l'ensemble constitue la charpente qui représente une silhouette caractéristique du type d'arbre: pyramidale, arrondie, pleureuse, etc.. (Fishesser, 1981).

Les arbres répondant à cette définition et à cette description sommaire peuvent être divisés en trois groupes importants:

a) Les conifères, ou "résineux", en raison de la présence d'une résine dans leurs différents organes, groupant une majorité de genres dont le fruit est un cône (pin, sapin ...) et dont les feuilles sont, le plus généralement en forme d'écailles ou d'aiguilles.

b) Les feuillus englobant les arbres qui ne renferment pas de résine, avec des fruits divers et des feuilles dont le limbe est plus largement développé (chêne, tilleul, etc.);

c) Les palmiers possédant un tronc dénommé stipe, composé d'un bois fibreux particulier. Ces arbres poussent surtout sous les Tropiques, en Asie et en Amérique Centrale; leur importance est donc très réduite pour le Canada.

Plusieurs chercheurs ont affirmé que dans la plupart

des cas étudiés ce sont les feuillus qui causent les dommages importants aux bâtiments.

A.1.1.3 Besoins en eau des arbres

Les besoins en eau varient beaucoup d'une espèce à l'autre. Ils sont souvent considérables: ainsi, un hectare de hêtres consomme quelque 3000 à 5000 m3 d'eau par an. Le hêtre est pourtant une des essences parmi les plus économes en eau; le tremble et le bouleau utilisent trois fois plus d'eau que le hêtre pour produire un kilo de matière sèche. Au cours de sa période végétative annuelle, un chêne rouge vaporise 290 fois son poids en eau, un érable 450 fois et un peuplier absorbe environ 800 l d'eau par jour en été et un bouleau 200 l. En règle générale, les feuillus transpirent beaucoup plus que les résineux.

L'eau du sol ne pouvant suffire, les pluies et une certaine humidité atmosphérique sont indispensables. Il faut au moins 500 mm de précipitations par an pour que puisse croître une forêt. Seulement un quart de ces précipitations sera utilisé par les racines, le reste sera perdu par évaporation, ruissellement ou infiltration. De plus, ces pluies doivent être judicieusement réparties tout au long de l'année et être plus abondantes en période de végétation

(Institut de Développement Forestier, 1980).

Un déséquilibre entre l'alimentation en eau d'un arbre et son évapo-transpiration due, par exemple, à une sécheresse prolongée dans un site à sol trop sec ou trop superficiel va obliger l'arbre à développer ses racines à la recherche de l'eau.

Les peupliers de culture et le noyer noir ont un grand besoin d'humidité dans le sol mais cela ne signifie pas pour autant qu'ils supportent les sols trop humides. D'autres espèces, au contraire, telles que le pin sylvestre, résistent bien au sol sec mais il ne faut pas s'y tromper: si certaines espèces sont en apparence bien adaptées à une relative sécheresse du sol, c'est le plus souvent parce qu'elle sont capables grâce à un enracinement puissant d'aller puiser l'eau très en profondeur. L'humidité de l'air est nécessaire à des essences comme l'épicéa de Sitka qui supporte très mal la sécheresse sous toutes ses formes (Institut de Dévoloppement Forestier, 1980).

Les besoins en eau des arbres diffèrent selon les auteurs. Une comparaison de la demande en eau, par ordre décroissant selon Ward (1947), Hammer and Thompson (1966) et Biddle (1979) est donnée ci-après:

Ward (1947) (Grande Bretagne)	Hammer et Thompson (1966) (Etats-Unis)	Biddle (1979) (Grande Bretagne)
Peuplier	Orme chinois	Peuplier
Aune	Orme d'Amérique	Peuplier de Lambardie
Tremble	Peuplier	Cupressus Macrocarpa
Saule	Saule	Alisier
Orme	Chêne	Aubépine
Faux Platane	Erable	Chêne
Bouleau	Frêne	Orme
Frêne	Faux Platane	Frêne
Hêtre	Erable de norvège	Tilleul
Chêne	Aubépine	Platane
Mélèze		Faux Platane
Epinette		Bouleau
Sapin		Hêtre
Pin		Murier

A.1.1.4 Arbres en milieu urbain

Les villes ont un cycle hydrologique différent de celui des sites naturels. Les précipitations tombent sur des surfaces généralement pavées d'où une domination du ruissellement sur l'infiltration, ce ruissellement est canalisé loin des sites par des gouttières et des égouts. L'eau souterraine est interceptée par des drains. Ceci a pour effet de réduire considérablement la quantité d'eau emmagasinée dans le sol. Cette eau ne peut pas se déplacer rapidement pour répondre au besoin de végétation à cause de la réduction de la perméabilité du sol dûe à la compaction. De plus, le volume du sol disponible à l'arbre est restreint à cause des construction souterraines (Whitlow et

Basuk, 1987).

D'autre part les villes se caractérisent par un micro climat plus chaud que celui des campagnes. Les radiations captées par les arbres sont amplifiées à cause de la réflexion des rayons solaires par les bâtiments et les chaussées. Tous ces facteurs augmentent la température des feuilles et, par suite, la transpiration. La faible valeur de l'humidité absolue de l'air et les courants d'air créés par l'urbanisation augmentent considérablement la demande en eau des arbres. Ainsi, dans les milieux urbains, il est raisonnable de supposer que la disponibilité de l'eau est réduite et la demande est amplifiée, ce qui conduit à un déficit d'eau extrêmement important.

Les arbres en milieu urbain demandent une plus grande quantité d'eau que ceux des forêts. La température dans les villes et la chaleur dégagée provoque une évapotranspiration plus élevée que celle des autres régions (Halverson et Heisler, 1981).

A.1.2 Les racines

Environ dix pourcent de la totalité du bois d'un arbre se trouve sous la surface du sol, sous forme de racines qui s'étendent à des distances tout-à-fait surprenantes. La

longueur totale de toutes les racines d'un grand chêne, par exemple, est de plusieurs centaines de kilomètres. Les racines ont pour fonction non seulement d'assurer l'ancrage de l'arbre dans le sol, mais aussi ce qui est important, de lui fournir les minéraux et l'eau nécessaires à son bien-être. Si les sources normales d'eau voisines de l'arbre se tarissent, le système radiculaire va fournir un remarquable effort d'extension pour en découvrir d'autres. A titre d'exemple extrême, il existe un rapport selon lequel, lors de l'excavation du canal de Suez, on a trouvé les racines d'un tamaris à 30 mètres sous la surface du sol. Dans les études les plus récentes, on cite des nombreux cas d'arbres communs à feuillage caduc, dont on a suivi les racines sur des distances horizontales de plus de 30 mètres à partir des arbres auquels elle appartenaient (Legget et Crawford, 1967).

L'importance des racines échappe généralement à l'observation en raison de leur développement souterrain. Les racines ancrent l'arbre au sol qu'elles explorent de façon opportuniste à la recherche d'eau et de sels minéraux qu'elles absorbent et stockent en partie.

Le système radiculaire de chaque arbre est caractéristique, mais il est fortement influencé par l'environnement et la nature du sol. Il couvre généralement une surface

bien supérieure à la projection du houppier au sol tel que montré à la Figure A.1. Les racines occupent en général dans le sol un volume supérieur à celui du houppier dans l'air.

Le système radiculaire évolue avec l'âge. La première racine issue de la graine est une racine pivotante qui s'enfonce à la verticale; c'est un organe destiné à puiser d'urgence les éléments nécessaires au développement de la jeune pousse. Puis le système radiculaire se diversifie à l'extrême et ce pivot cède la place à des racines secondaires qui se développent en tous sens.

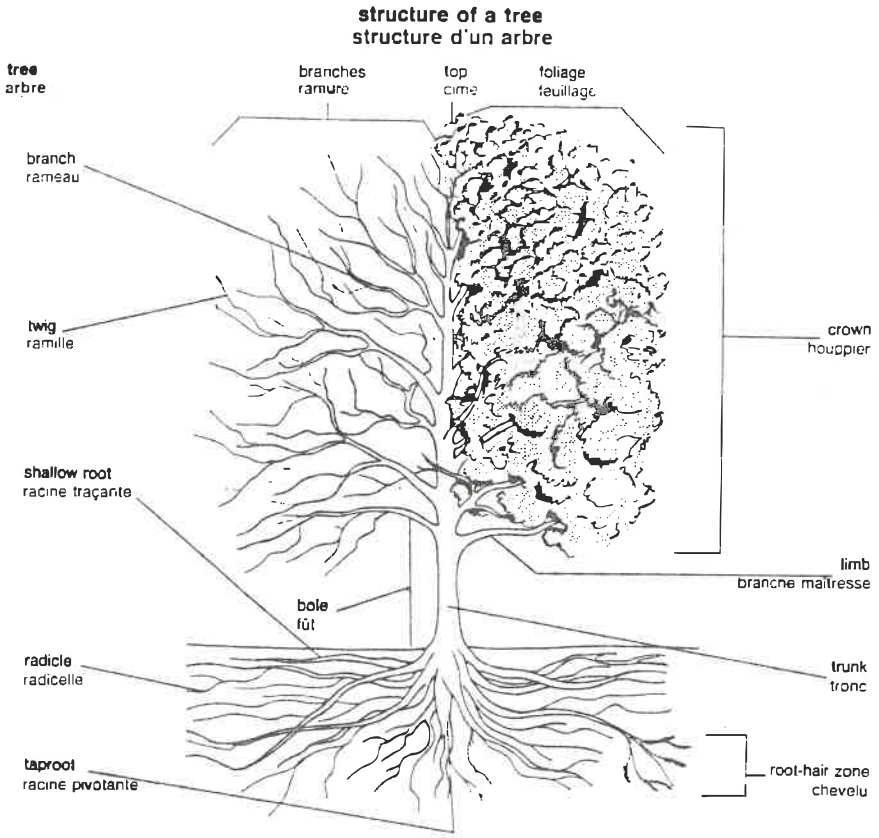


Figure A.1
Vue d'un arbre avec son système radiculaire
(D'aprés Dictionnaire visuel, 1987)

A.1.2.1 Les trois grands types de systèmes radiculaires

Certains arbres développent une racine verticale, un pivot, qui pénètre en profondeur et donne naissance à de très nombreuses racines latérales, ou bien ils émettent des racines profondes et peu ramifiées: ce sont des essences à racines pivotantes, comme le pin, le chêne et le noyer.

Chez d'autres essences, tels le hêtre, l'orme, le sapin, et tilleuls, une série de racines de même importance s'échappent en oblique dès la base du tronc, rayonnent en tous sens et portent de petites radicelles latérales.

Chez un troisième groupe, les racines s'étalent horizontalement, dès la base du tronc, dans les couches supérieures du sol; ce sont des espèces à racines superficielles ou traçantes telles que le bouleau, le sapin de Noël (Epicéa) et les saules (voir fig. A.2).

Si les deux premiers systèmes d'enracinement ancrent solidement les arbres qui les développent, il n'en est pas de même du troisième type; les arbres qui en sont pourvus sont mal ancrés au sol et une tempête risque de les déraciner.

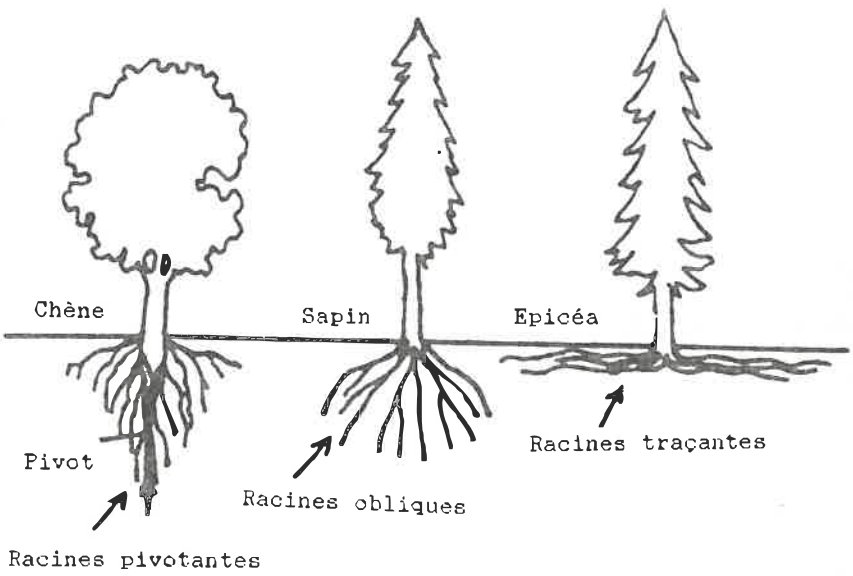


Figure A.2
Les trois grands types d'enracinements courants
(Fishesser, 1981)

Certains auteurs considèrent que le concept qui décrit le système radiculaire d'un arbre comme une masse végétale occupant un volume équivalent à celui du houppier est erroné. De plus, ils mentionnent qu'il n'existe pas d'arbres à enracinement superficiel ou d'arbres à enracinement profond. La croissance radiculaire est "opportuniste", en ce sens que les racines se développent là où les conditions essentielles à leur survie (eau, air) le permettent.

La partie la plus active du système radiculaire d'un arbre est constituée par les extrémités des radicelles, appelées coiffes, qui se glissent et se faufilent dans le sol. Dans la partie sub-terminale de la radicelle, des cellules à prolifération rapide forment la zone dite de croissance. Le reste de la radicelle est recouvert de fragiles filaments et des poils absorbants, qui filtrent les matières nutritives nécessaires à l'arbre. Ces poils sont éphémères: au fur et à mesure que les radicelles de l'arbre s'enfoncent dans le sol, ils disparaissent et sont remplacés par d'autres. Leur durée de vie est de quelques semaines.

A.1.2.2 Croissance et développement des racines

La capacité des plantes de retirer de l'eau du sol à travers le processus d'évapotranspiration dépend de la profondeur et de la distribution du système radiculaire. Comme la profondeur totale d'extraction de l'eau est approximativement égale à la profondeur de pénétration des racines, il est indispensable d'étudier en détail le développement et la profondeur de ces dernières.

Il n'existe pas une relation générale entre la profondeur d'enracinement et la hauteur de l'arbre. Le climat, l'espèce d'arbre et le type de sol sont parmi les facteurs les plus importants affectant le développement des racines. Sous certaines conditions, nappe profonde par exemple, les racines de certains espèces peuvent pénétrer profondément dans le sol à la recherche d'eau.

Selon Kramer et Kozlowski (1975) les racines d'arbres fruitiers poussant dans un sable se sont étendues sur une distance égale à 3 fois la projection horizontale du houppier; 2 fois dans le cas d'un silt et une demi fois dans une argile.

La croissance et l'activité des racines sont presque

continues; elles ne s'arrêtent vraiment qu'en période de gel et reprennent activement dès que la température du sol est d'environ 5°C. Chaque racine s'allonge dans la zone située juste derrière sa pointe. Celle-ci est revêtue d'une coiffe qui produit sans cesse de nouvelles cellules qui se détachent à mesure de l'avance de la pointe en lui servant de lubrifiant. Une racine de peuplier peut ainsi s'allonger, en bonnes conditions, à raison de 1 cm par jour et celle d'un hêtre de 5 mm.

Alors que certains arbres comme les bouleaux ont un enracinement intensif qui ne colonise qu'un faible volume du sol, des espèces exigeantes ont besoin d'avoir à leur disposition d'énormes volumes de sol. Parmi elles, le frêne, arbre particulièrement gourmand, dont l'enracinement occupe fréquemment dans le sol un espace plus grand que celui qu'occupe son houppier dans l'air.

Les racines peuvent se régénérer rapidement en développant de nouvelles radicelles. Quand moins de 2 mm des bouts de racine d'un bouleau blanc sont coupés, une régénération complète se produit dans les trois jours suivants à condition que l'humidité du sol soit favorable à la croissance.

Plusieurs chercheurs ont mentionné que l'initiation de la croissance des racines est reliée au début du bourgeonnement. Cependant, Kramer et Kozlowski (1975) indiquent que la croissance des racines dépend essentiellement de la température et non du bourgeonnement.

L'étendue du branchement et du rebranchement des racines mortes et vivantes est remarquable. En effet, il a été calculé qu'un chêne rouge mature possède un minimum de 500 millions de bouts de racine vivants. Ils ont reporté aussi qu'un jeune pommier produit approximativement 40,000 racines avec une longueur totale de 230 m dans une seule période de croissance, distribuées en 7 ordres de branchement (Kramer et Kozlowski, 1975).

Les racines peuvent, pendant la croissance, contourner les obstacles. En effet, les longues racines latérales d'un érable rouge s'étendent horizontalement jusqu'à 25 m de la base du tronc. Déviées par un obstacle, les racines le contournent et reprennent leur direction initiale.

Le développement latéral des racines dépend de l'espèce et de la grandeur de l'arbre. Quelques espèces, comme l'érable à sucre, ont une forme régulière du houppier et du système des racines dont la majorité se trouve sous le houppier. D'autres espèces comme le bouleau jaune, ont une

forme irrégulière du houppier et du système radiculaire. La plupart des auteurs sont mis d'accord que la plus grande quantité des racines se trouve sous le houppier. D'autres chercheurs estiment que le rayon de l'étendue des racines est de 25 à 30 fois le diamètre de l'arbre mesuré à 30 cm au dessus de la couronne.

Les racines continuent à croître jusqu'à l'âge de maturité. Ce dernier varie avec l'espèce de l'arbre. Pour le pin et l'épinette, l'expansion maximale des racines est atteinte à l'âge de 65 ans (Kaufman, 1968). Tandis qu'elles cessent de croître lorsque l'arbre a dépassé l'âge de maturité.

Les racines qui se développent dans un sol à grains fins sont courtes et plus ramifiées. Dans un sol à faible fertilité, léger et bien aéré, les racines tendent à être plus longues, fines et droites. Les espèces d'arbres qui normalement possèdent un système des racines profond ont tendance à diminuer leur développement latéral à cause de la compétition avec les racines des arbres voisins.

Les racines d'un pin croissent plus lentement que celles d'un feuillus même lorsque les racines de ce dernier sont en compétition avec d'autres. Les feuillus possèdent

un taux de photosynthèse plus grand d'où un enracinement plus profond.

Culter et Richardson (1981) ont fait des études statistiques sur les dommages causés par les arbres dans les milieux urbains du Sud-Est Angleterre où le sol est argileux. Nous avons résumé les résultats importants de cette étude au tableau (A.1), en mentionnant pour chaque espèce d'arbre, la distance maximale causant un dommage, la hauteur maximale de l'arbre atteinte dans une région urbaine à sol argileux et le type d'enracinement. Cette étude montre que les espèces les plus dangereuses pour les fondations sont les saules, les peupliers, les chênes, les ormes, les marronniers d'Inde, les frênes, les tilleuls et les érables.

Une étude du système radiculaire de neuf espèces d'arbres à feuilles caduques a été complétée en 1956 à l'Université Harward par Stout (1968). Un total de 25 arbres ont été étudiés en exposant par lavage (washing process) leur système radiculaire. Les espèces en question sont le chêne, le pin, le chêne blanc, le chêne rouge, l'érable à sucre, l'érable rouge, le frêne d'Amérique, le noyer d'Amérique, le bouleau noir et le hêtre.

Tableau A.1 Etude statistique de degré de dommages causé par différentes espèces d'arbres.

Essence d'arbre	Distance maximale causant un dommage (m)	Hauteur maximale (m) dans une région à sol argileux	Enracinement dans les sols argileux
Feuillus			
Pommier	10	10	Superficiel, localement profond
Poirier	10	12	"
Frêne	21	23	profond
Hêtre	15	20	superficiel
Bouleau	10	14	"
Cerisier	11	12	Superficiel à moyennement profond
Prunier	11	8	"
Orme	25	25	profond
Aubépine	11.5	10	Moyennement profond
Marronnier Inde	23	25	Superficiel à moyennement profond
Tilleul	20	24	Moyennement profond
Chêne	30	23	profond
Platane	15	30	Moyennement profond
Peuplier	30	28	profond
Sorbier	11	12	Superficiel, localement profond
Erable, Faux platane	20	24	profond
Saule	40	25	Moyennement profond
Aune	4	20	"
Sureau	8	7	"
Ficus	5	6	"
Noisetier	3	10	"
Févier	15	16	"
Magnolia	5	7	"
Pagode	3	16	"
Arbre du ciel	3	22	"
Noyer	8	15	"
			"
Conifères			"
Cupressus, Cyprès	20	25	Moyennement profond et dense
Sapin	2	20	profond
Pin	8	29	Superficiel à profond

Des trois espèces de chêne observées, le chêne blanc avait le système radiculaire le plus profond et le chêne rouge le moins profond. Entre l'érable à sucre et l'érable rouge, le premier possédait le système le plus profond.

Cependant, les forestiers identifient l'érable rouge comme ayant une amplitude écologique assez large. En effet, l'étude a montré que la profondeur des racines à la souche (base du tronc) varie de 30 cm à 120 cm, une grande variation qui n'était pas observée pour les autres espèces de chêne et d'érables.

ANNEXE 2

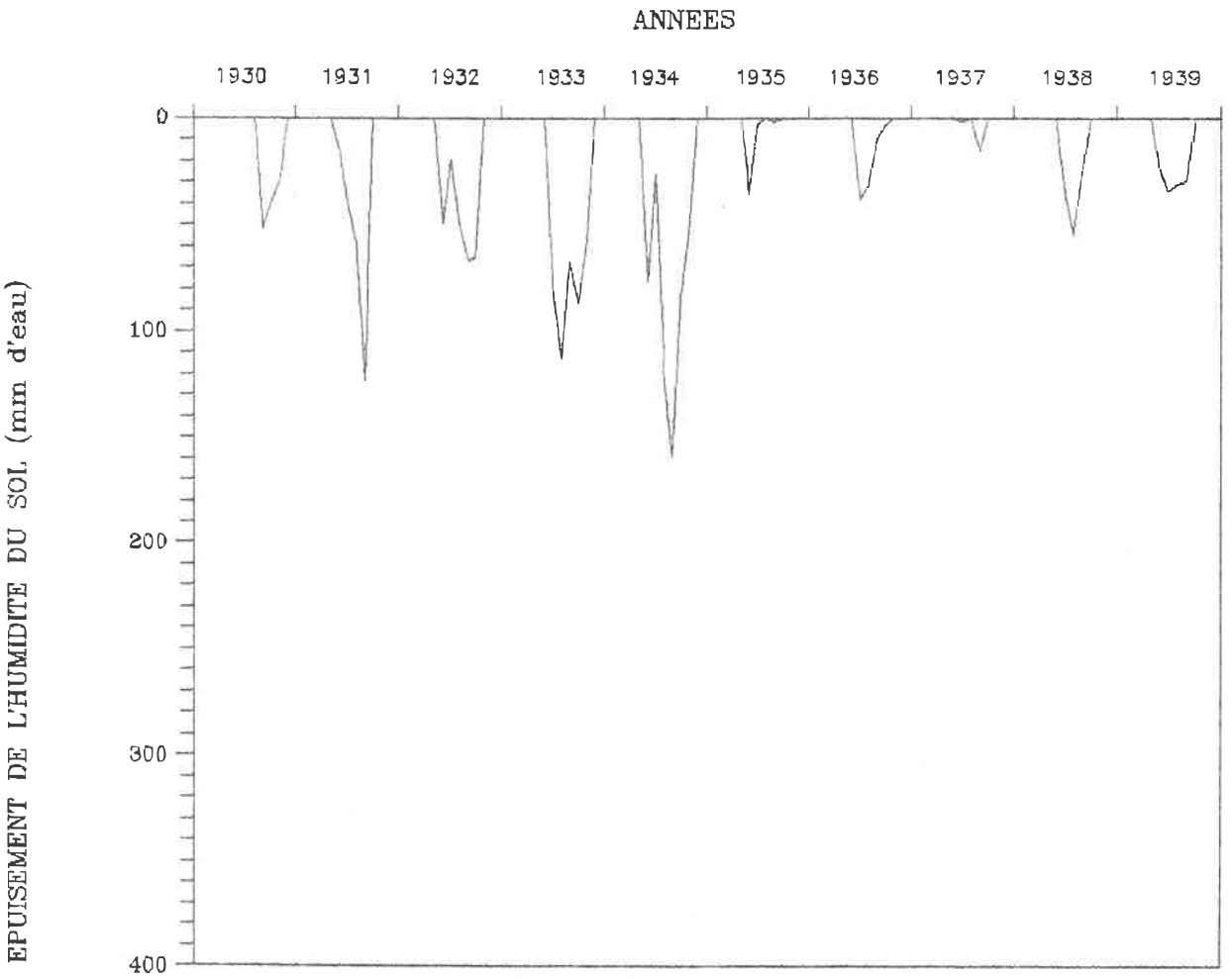


Figure A.1-1
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1930-1939
(l'ETP a été estimée par la formule de Penman)

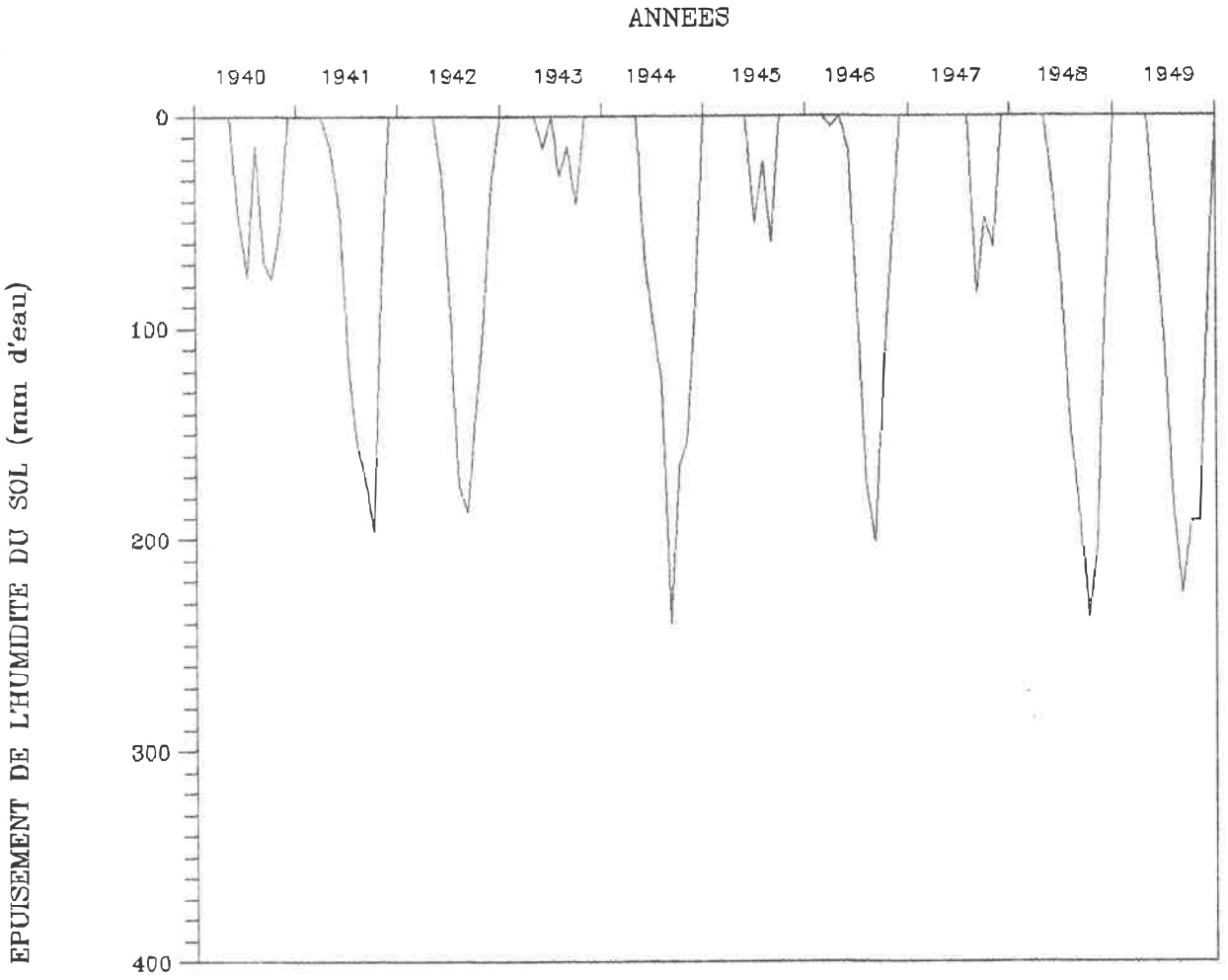


Figure A.1-2
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1940-1949
(l'ETP a été estimée par la formule de Penman)

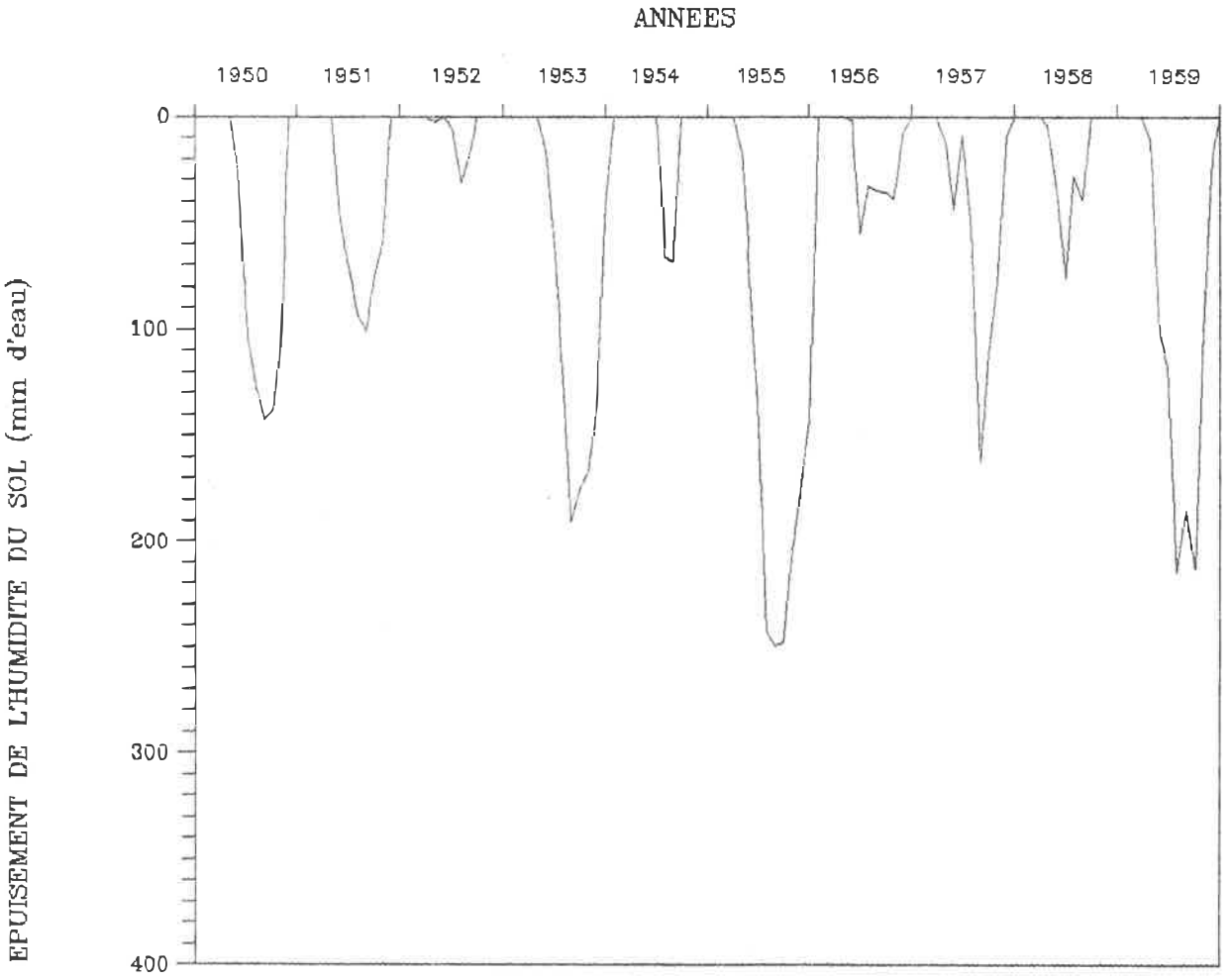


Figure A.1-3
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1950-1959
(l'ETP a été estimée par la formule de Penman)

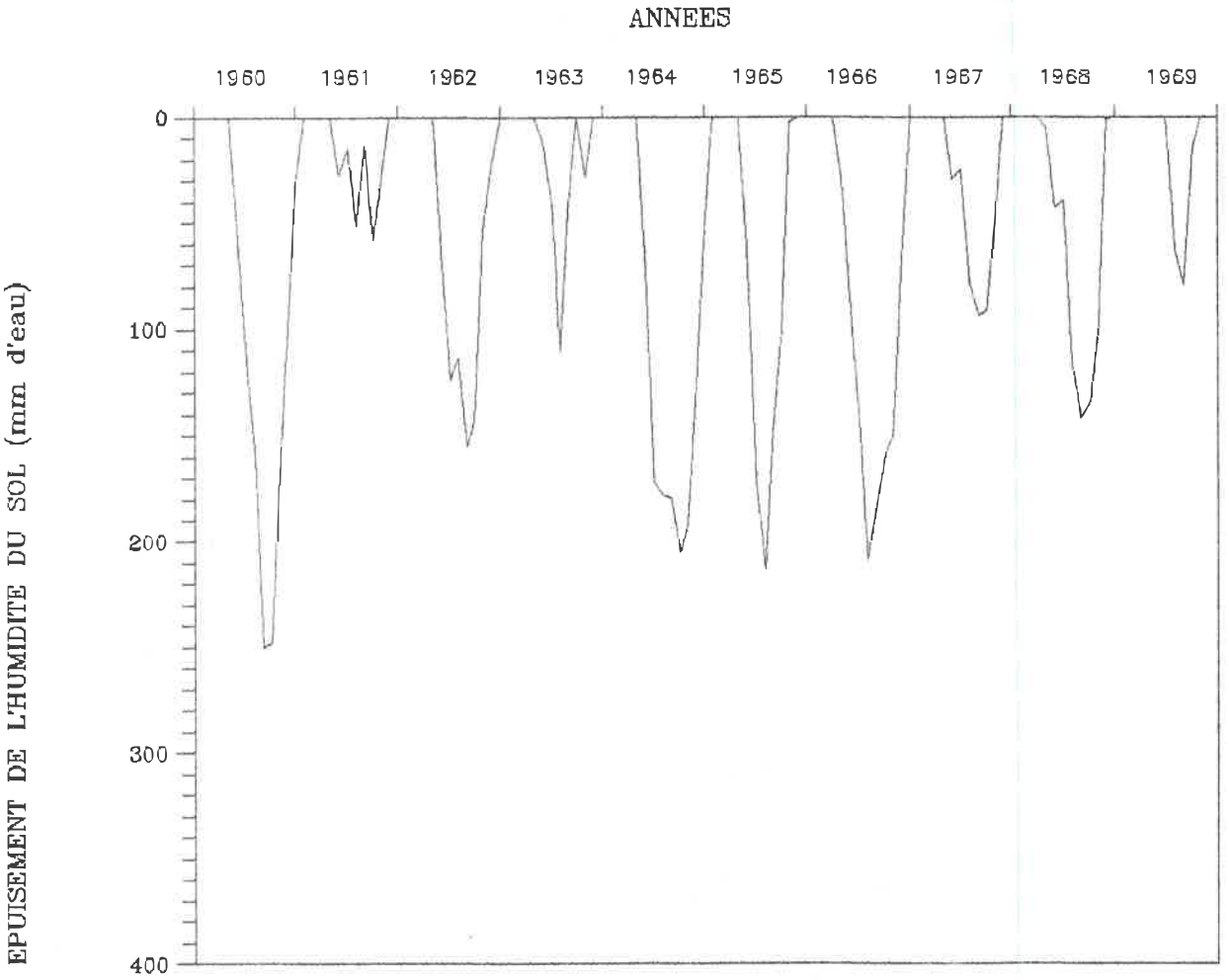


Figure A.1-4
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1960-1969
(l'ETP a été estimée par la formule de Penman)

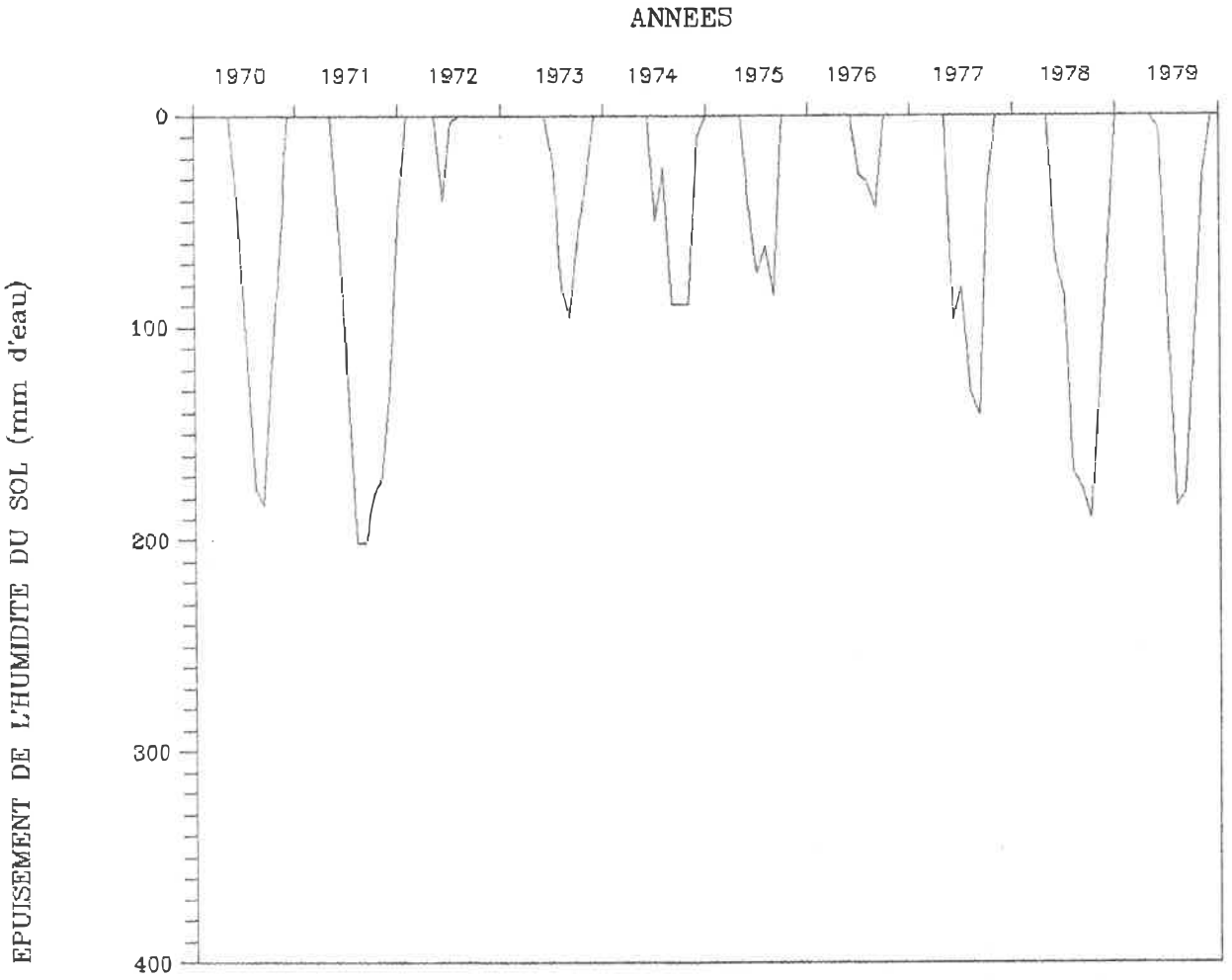


Figure A.1–5
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1970–1979
(l'ETP a été estimée par la formule de Penman)

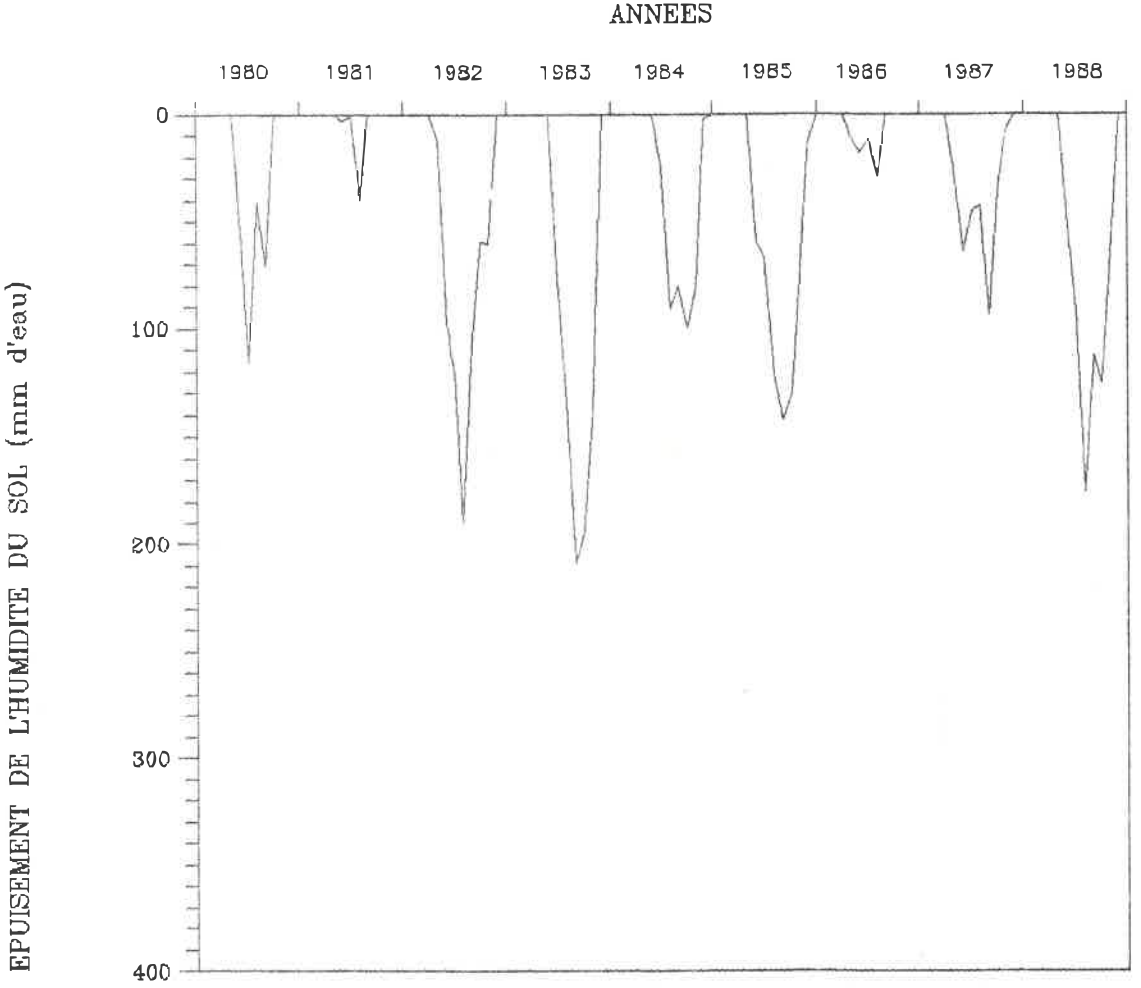


Figure A.1-6
Conditions de l'humidité du sol calculées a partir des données climatologiques 1980-1988
(l'ETP a été estimée par la formule de Penman)

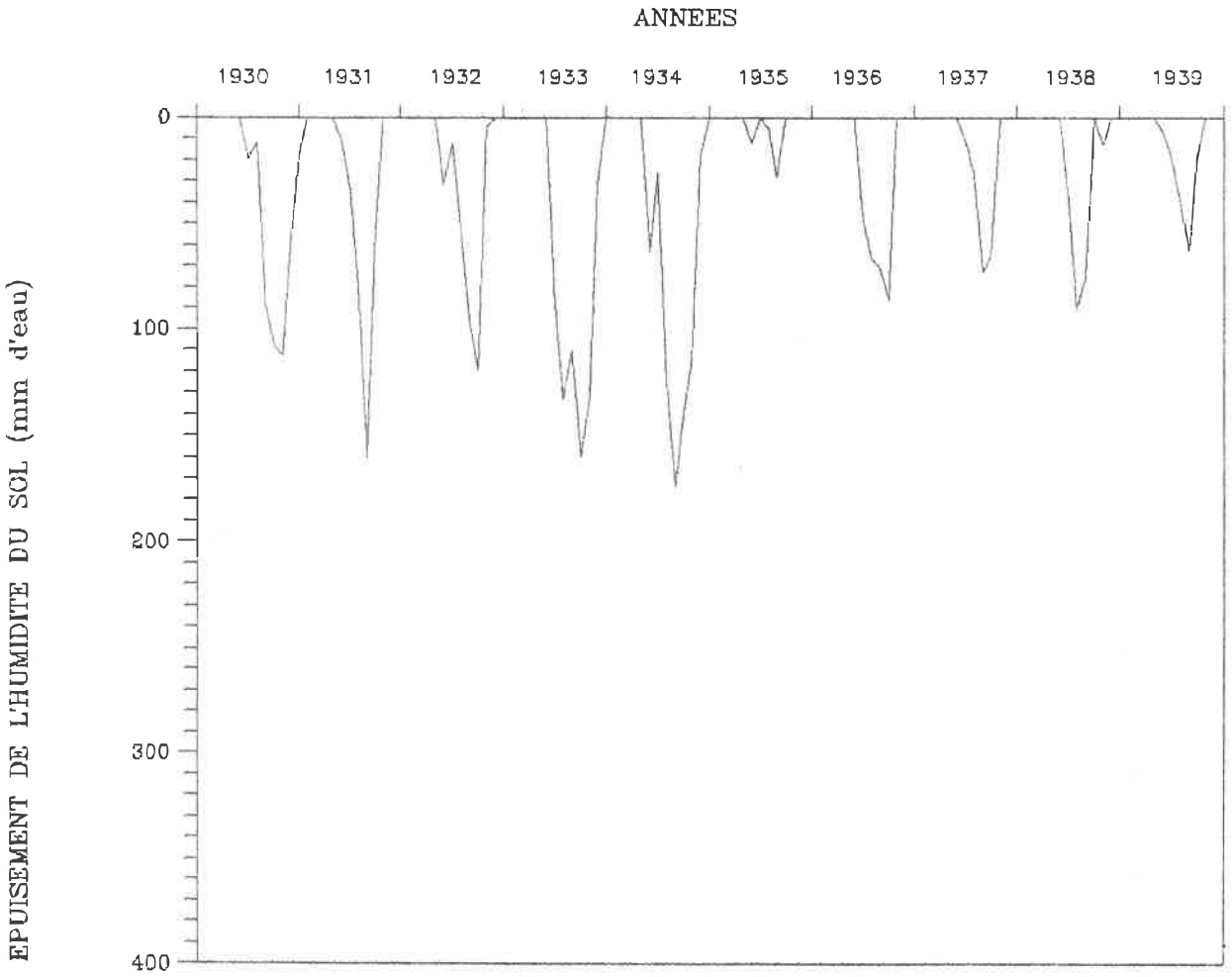


Figure A.2-1
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1930-1939
(l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite)

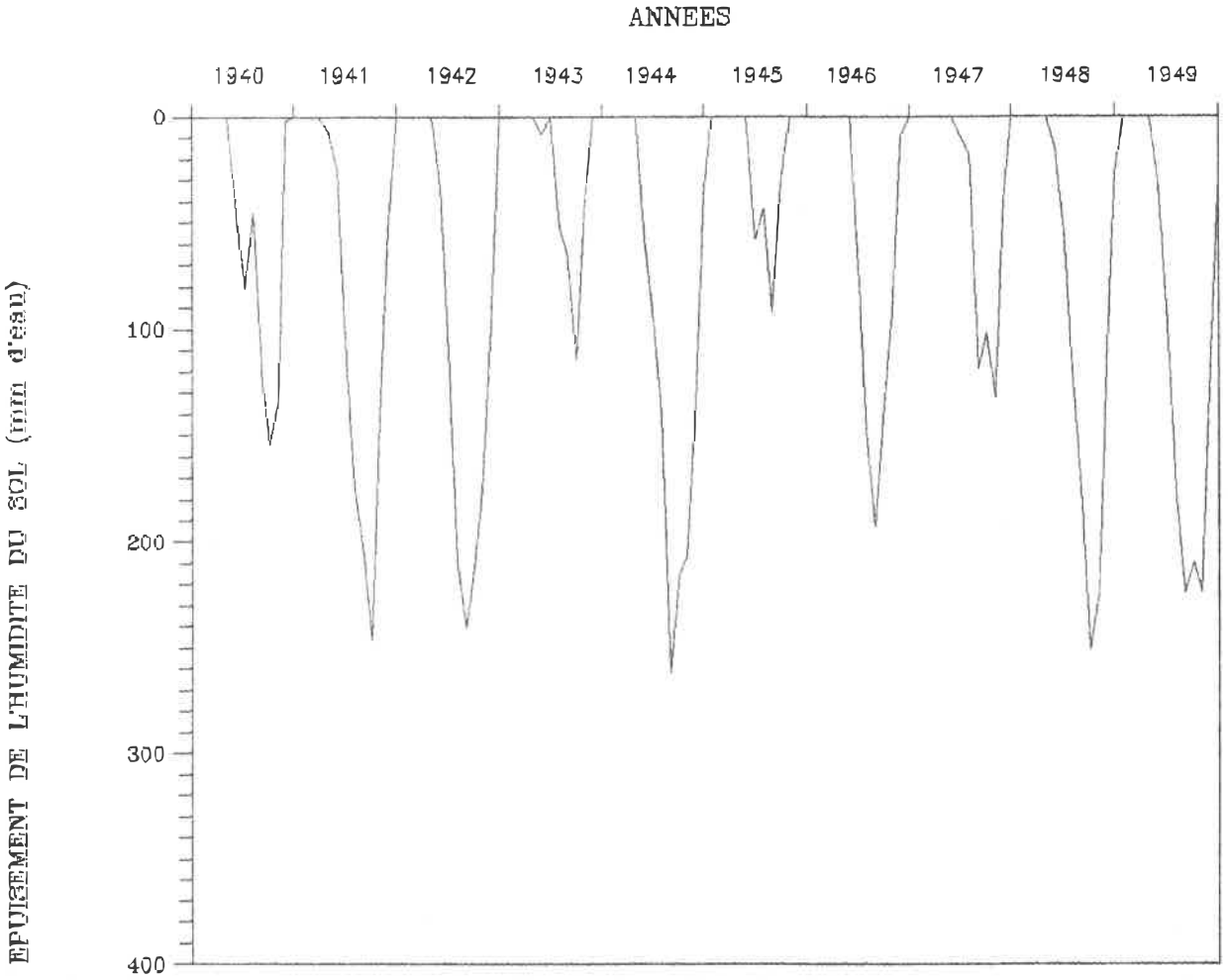


Figure A.2-2
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1940-1949
(l'ETP a été estimee par la formule de Thornthwaite)

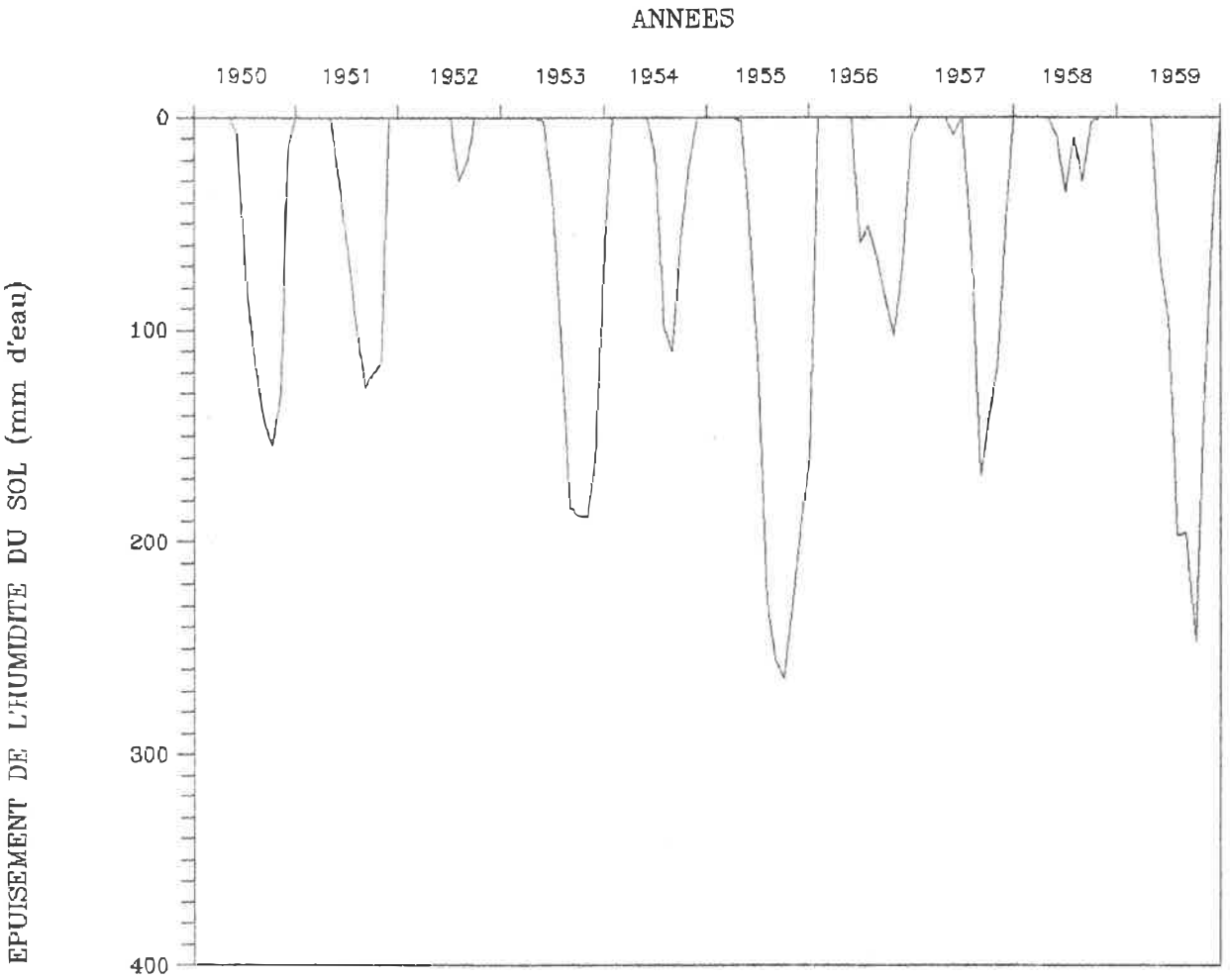


Figure A.2-3
Conditions de l'humidité du sol calculées a partir des données climatologiques 1950-1959
(l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite)

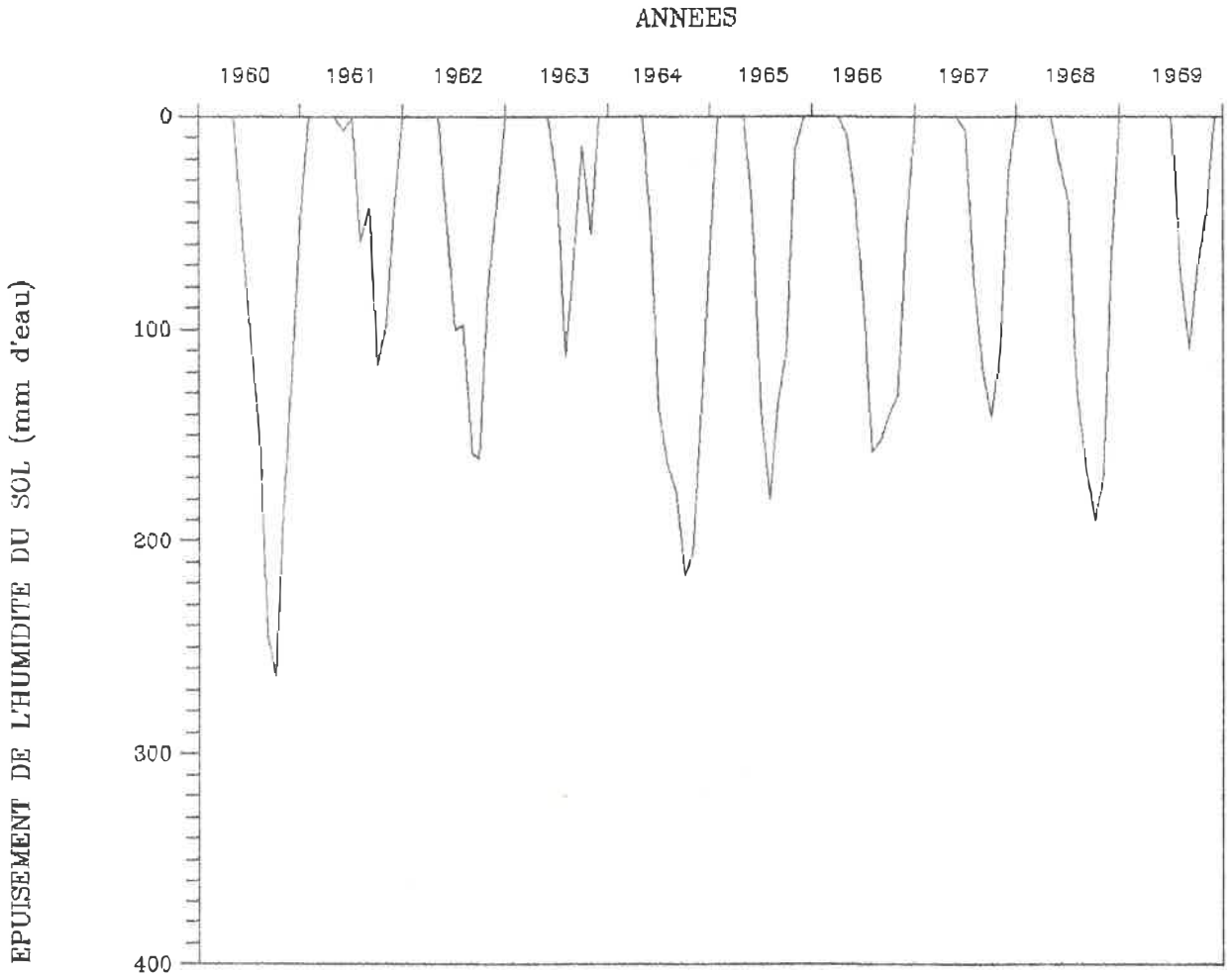


Figure A.2-4
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1960-1969
(l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite)

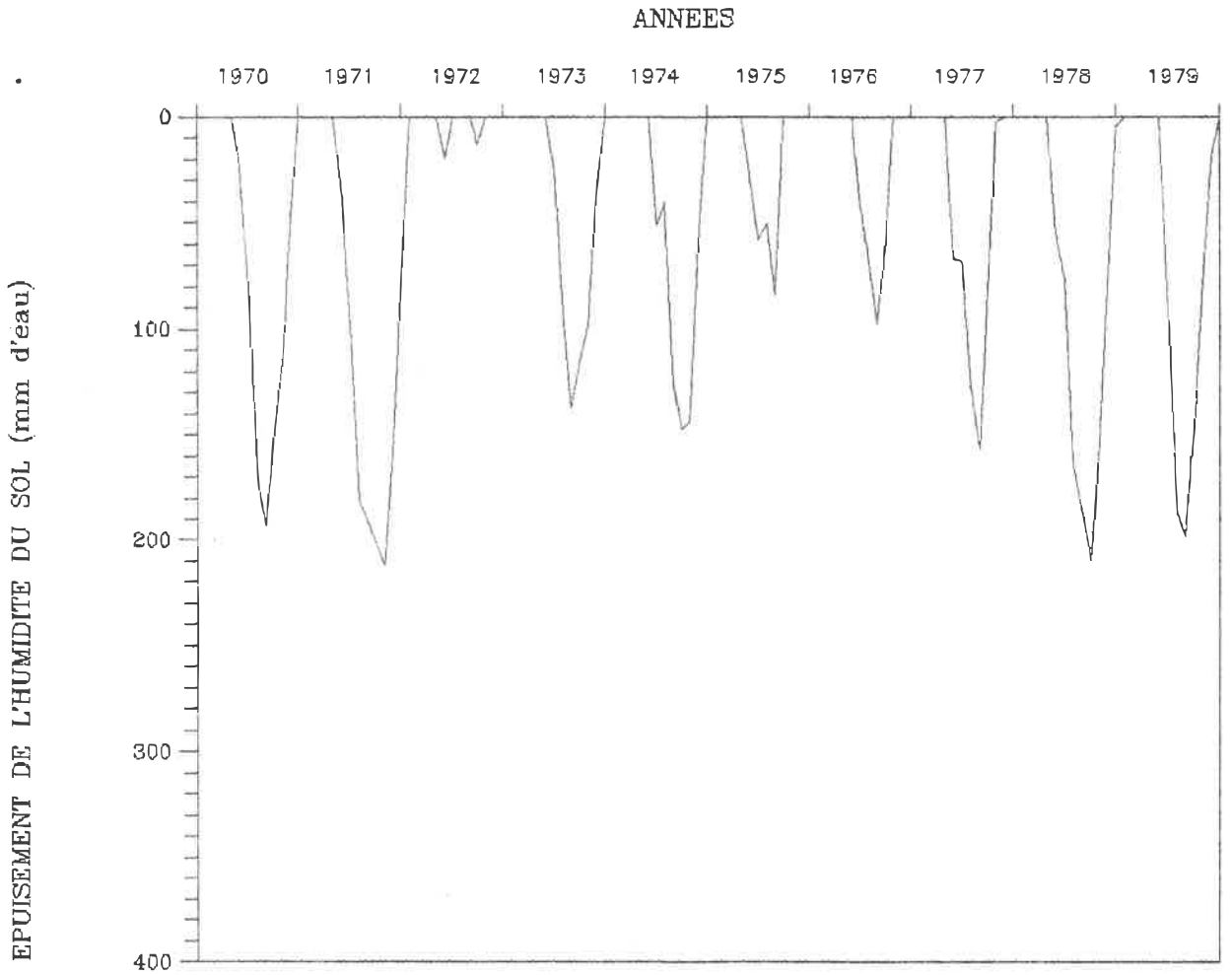


Figure A.2-5
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1970-1979
(l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite)

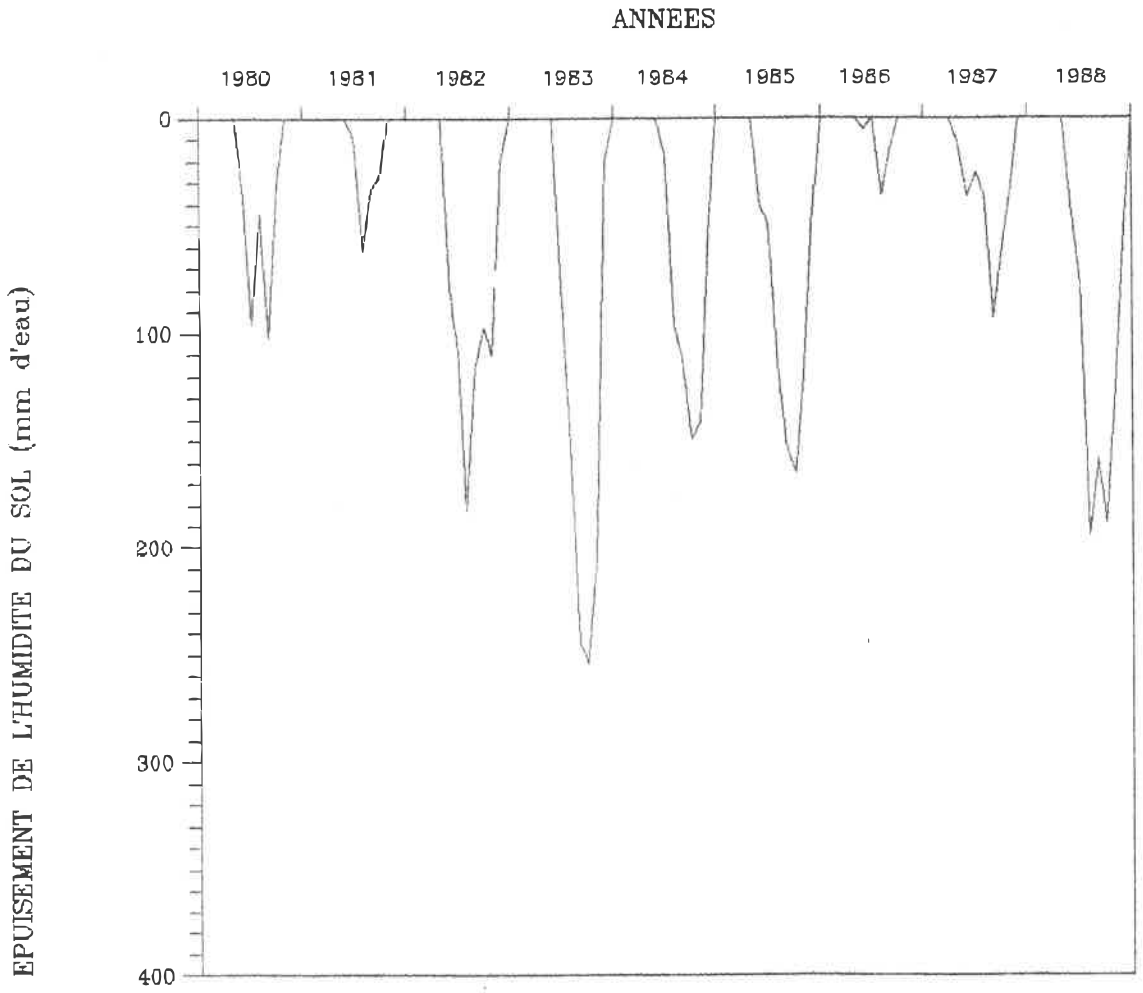


Figure A.2-6
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1980-1988
(l'ETP a été estimée par la formule de Thornthwaite)

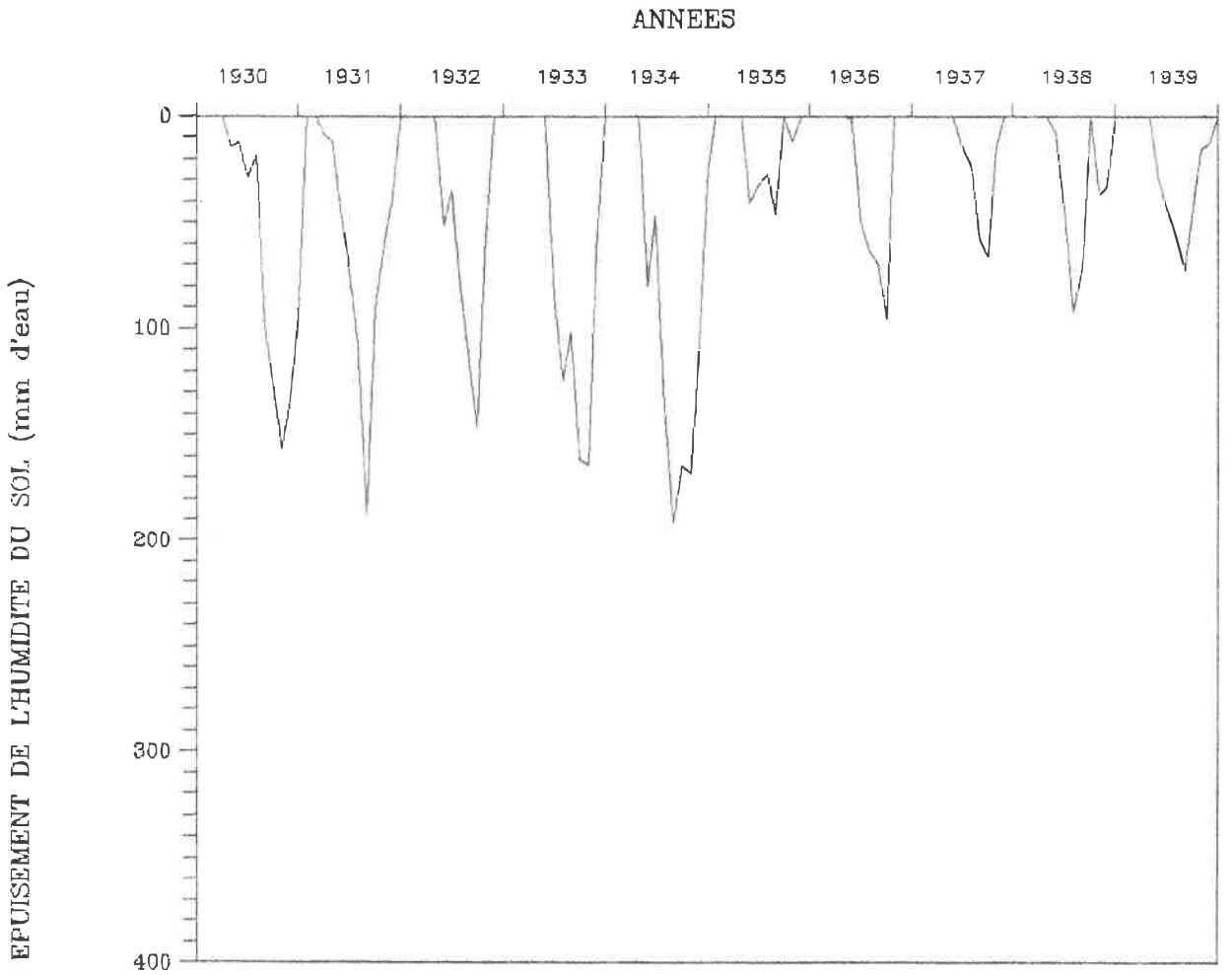


Figure A.3-1
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1930-1939
(l'ETP a été estimée par la formule de Blaney et Criddle)

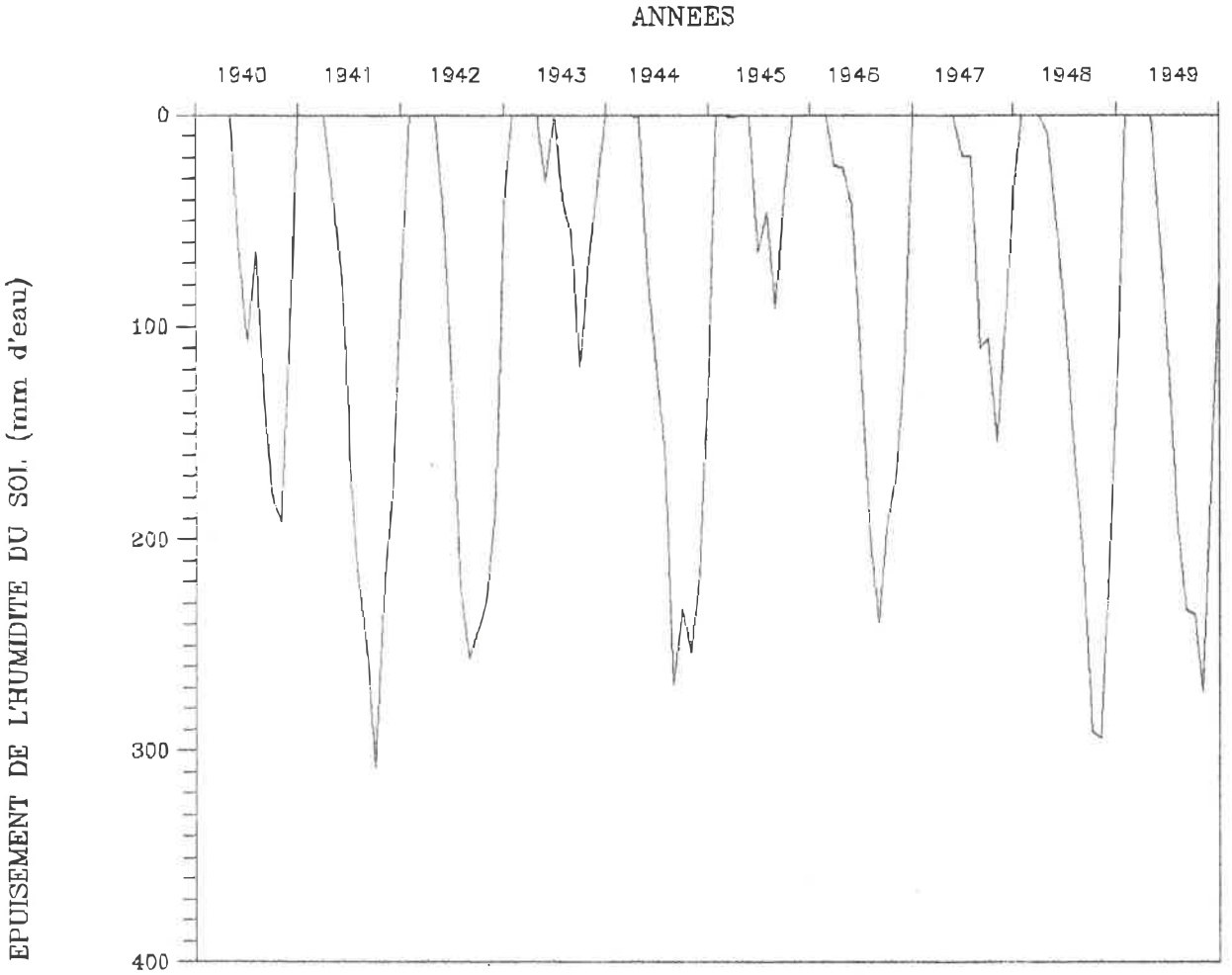


Figure A.3-2
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1940-1949
(l'ETP a été estimée par la formule de Blaney et Criddle)

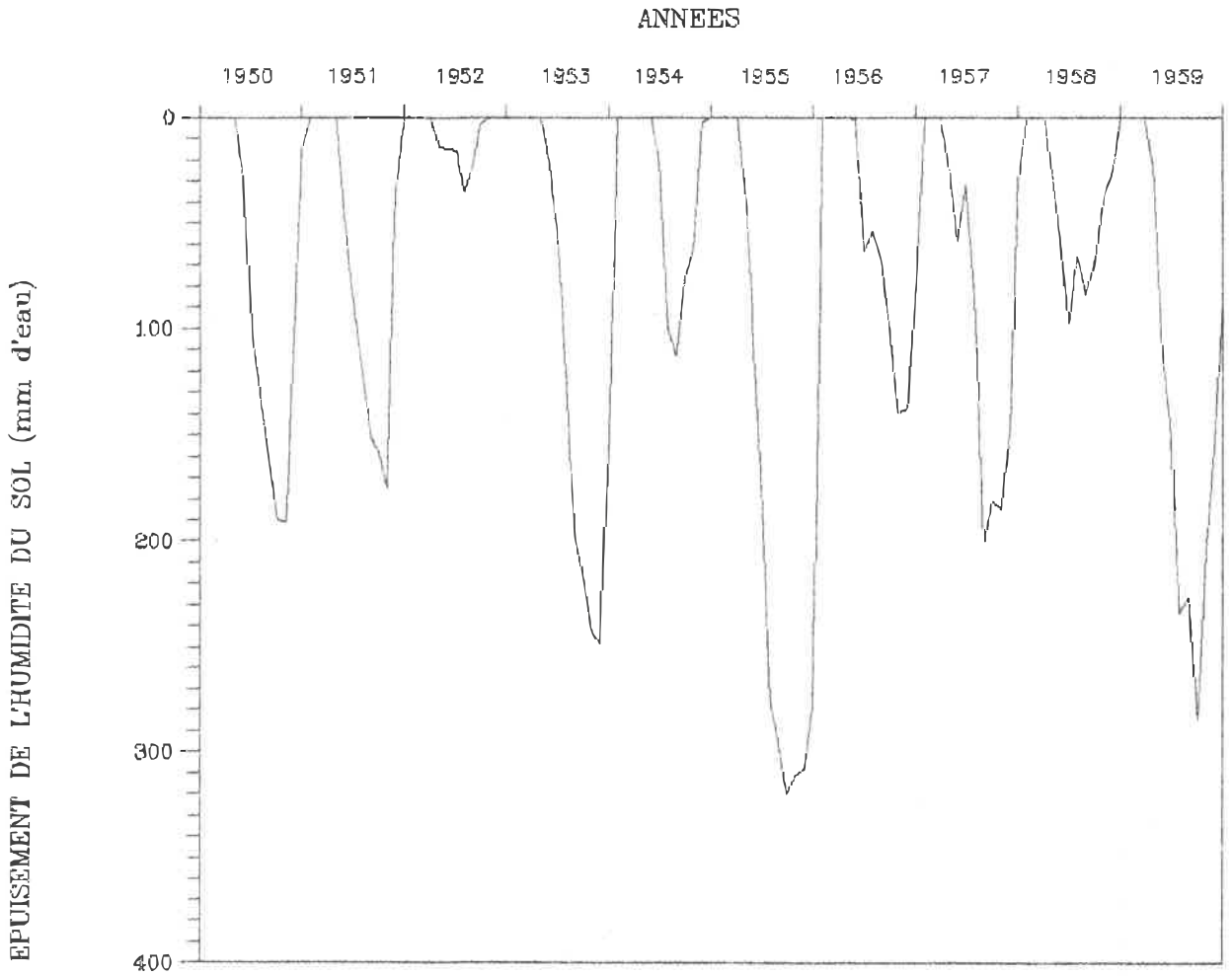


Figure A.3-3
Conditions de l'humidité du sol calculees à partir des données climatologiques 1950-1959
(l'ETP a été estimée par la formule de Blaney et Criddle)

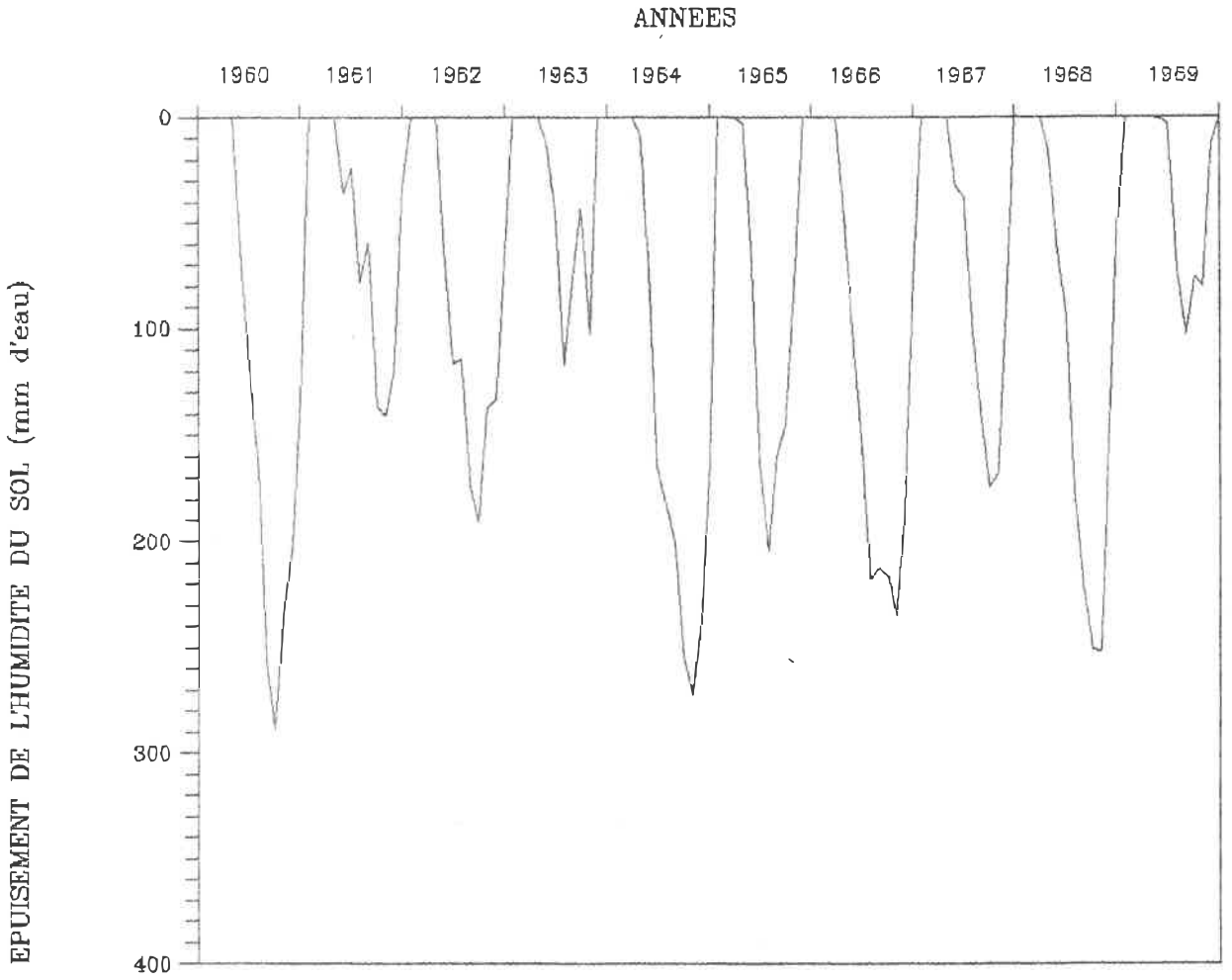


Figure A.3-4
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1960-1969
(l'ETP a été estimée par la formule de Blaney et Criddle)

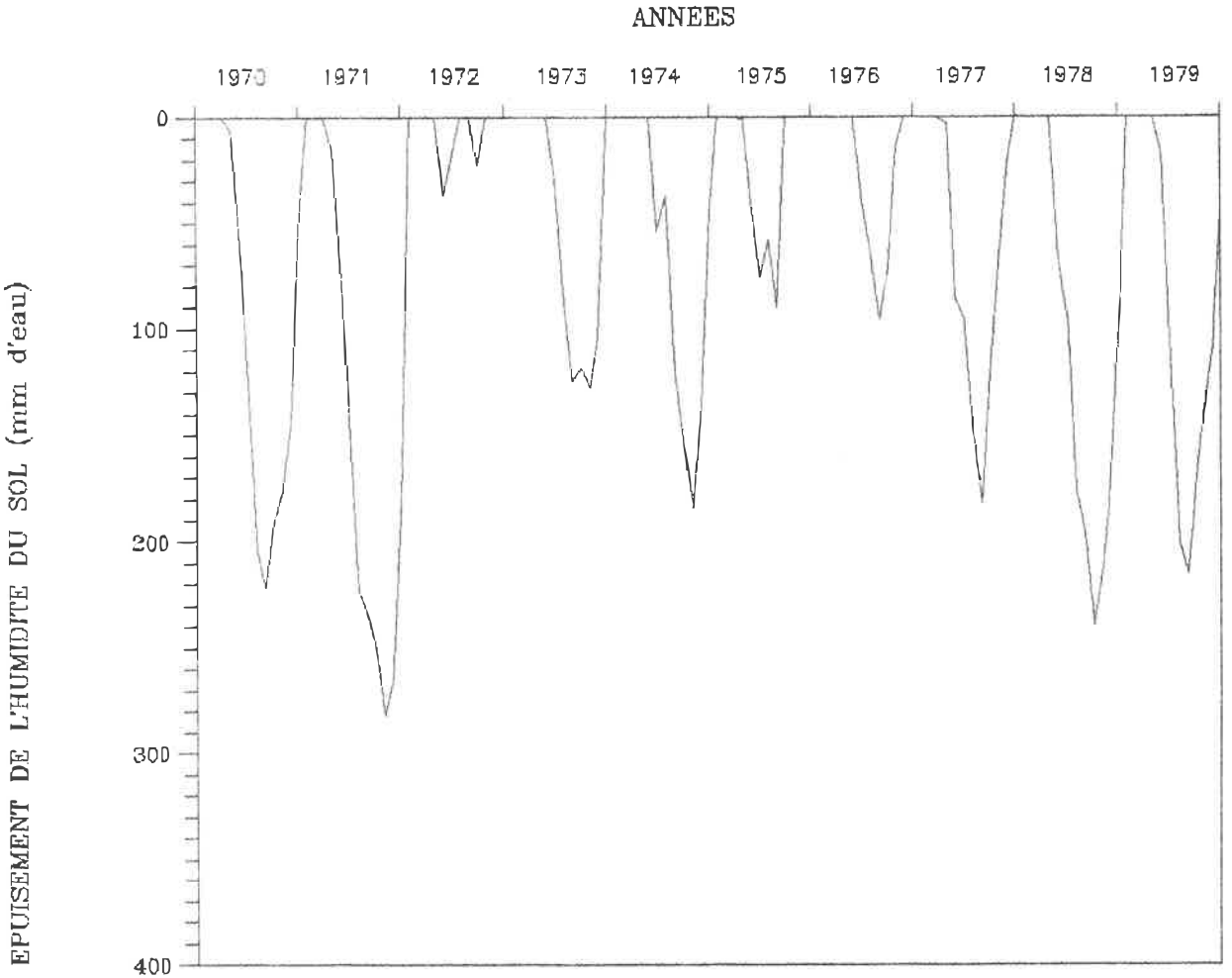


Figure A.3-5
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1970-1979
(l'ETP a été estimée par la formule de Blaney et Criddle)

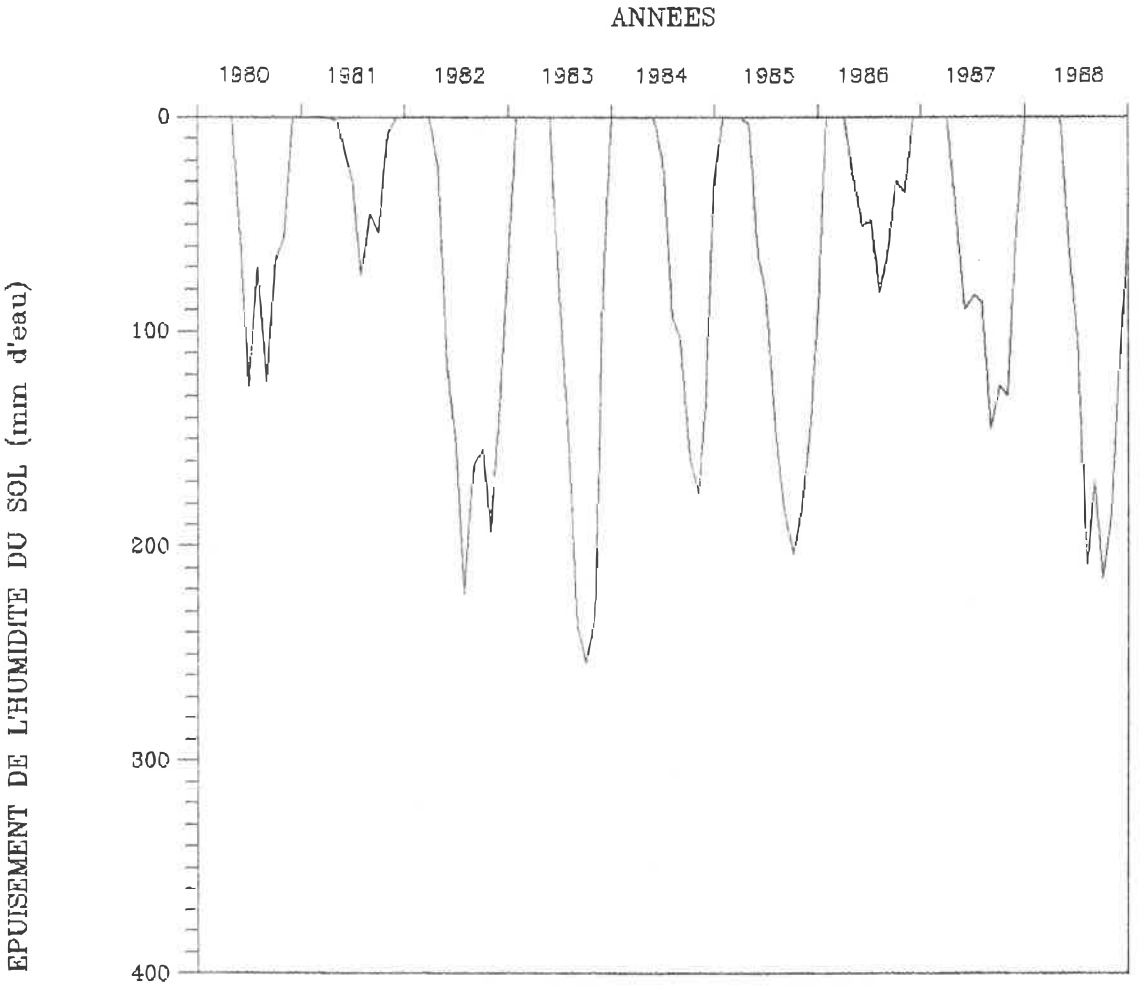


Figure A.3-6
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1980-1988
(l'ETP a été estimée par la formule de Blaney et Criddle)

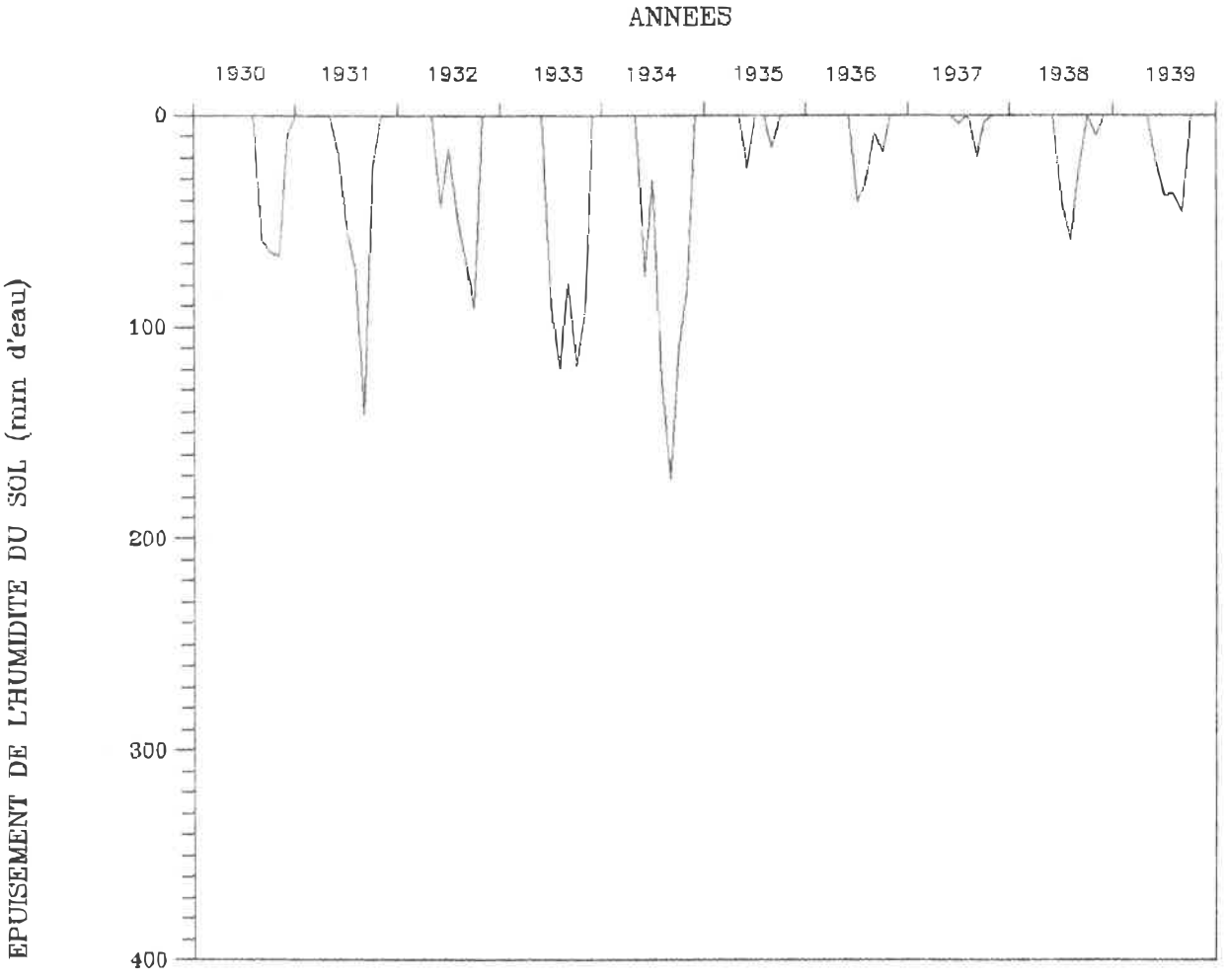


Figure A.4-1
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1930-1939
(l'ETP a été estimée par la formule de Turc)

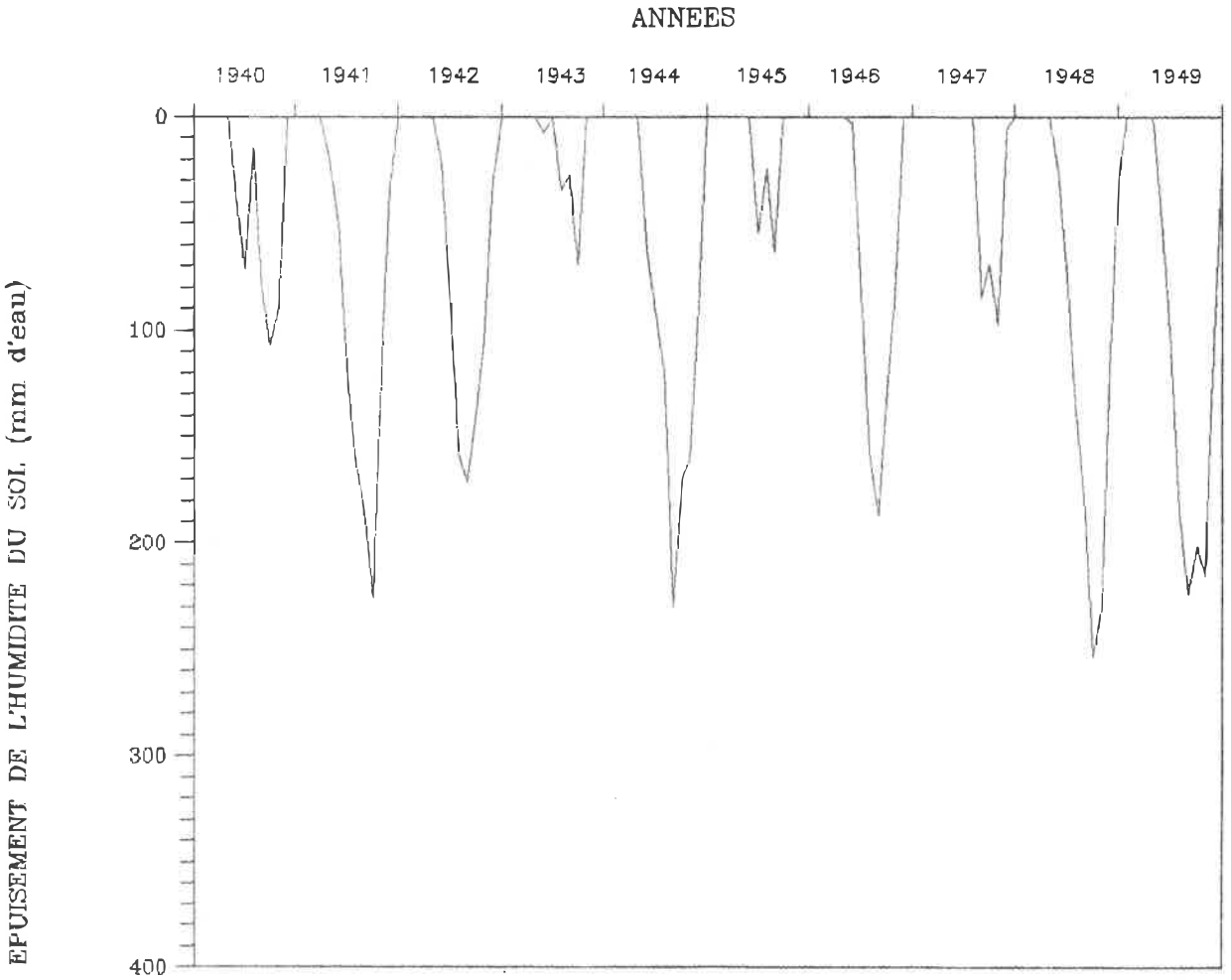


Figure A.4-2
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1940-1949
(l'ETP a été estimée par la formule de Turc)

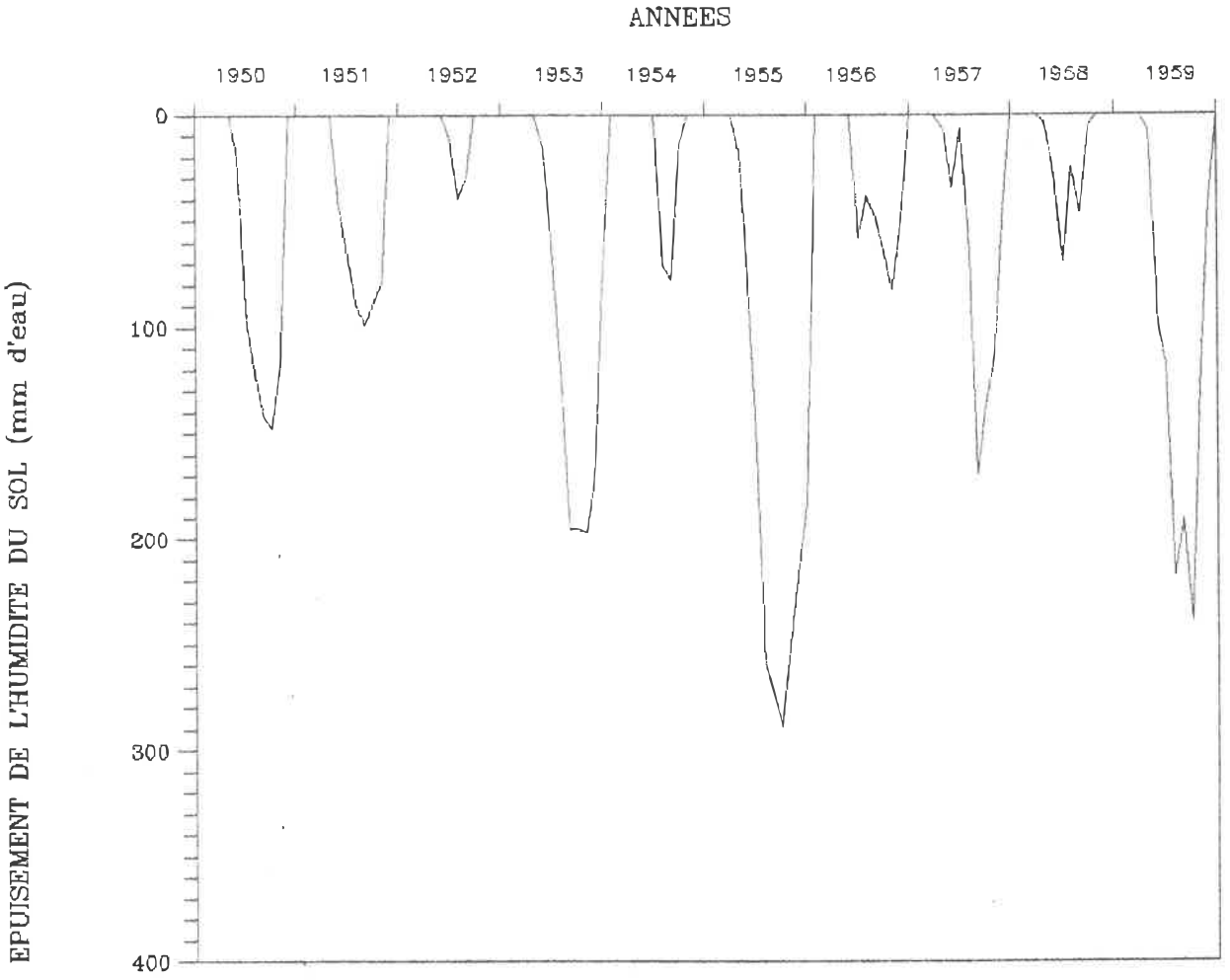


Figure A.4-3
Conditions de l'humidite du sol calculées à partir des données climatologiques 1950-1959
(l'ETP a été estimée par la formule de Turc)

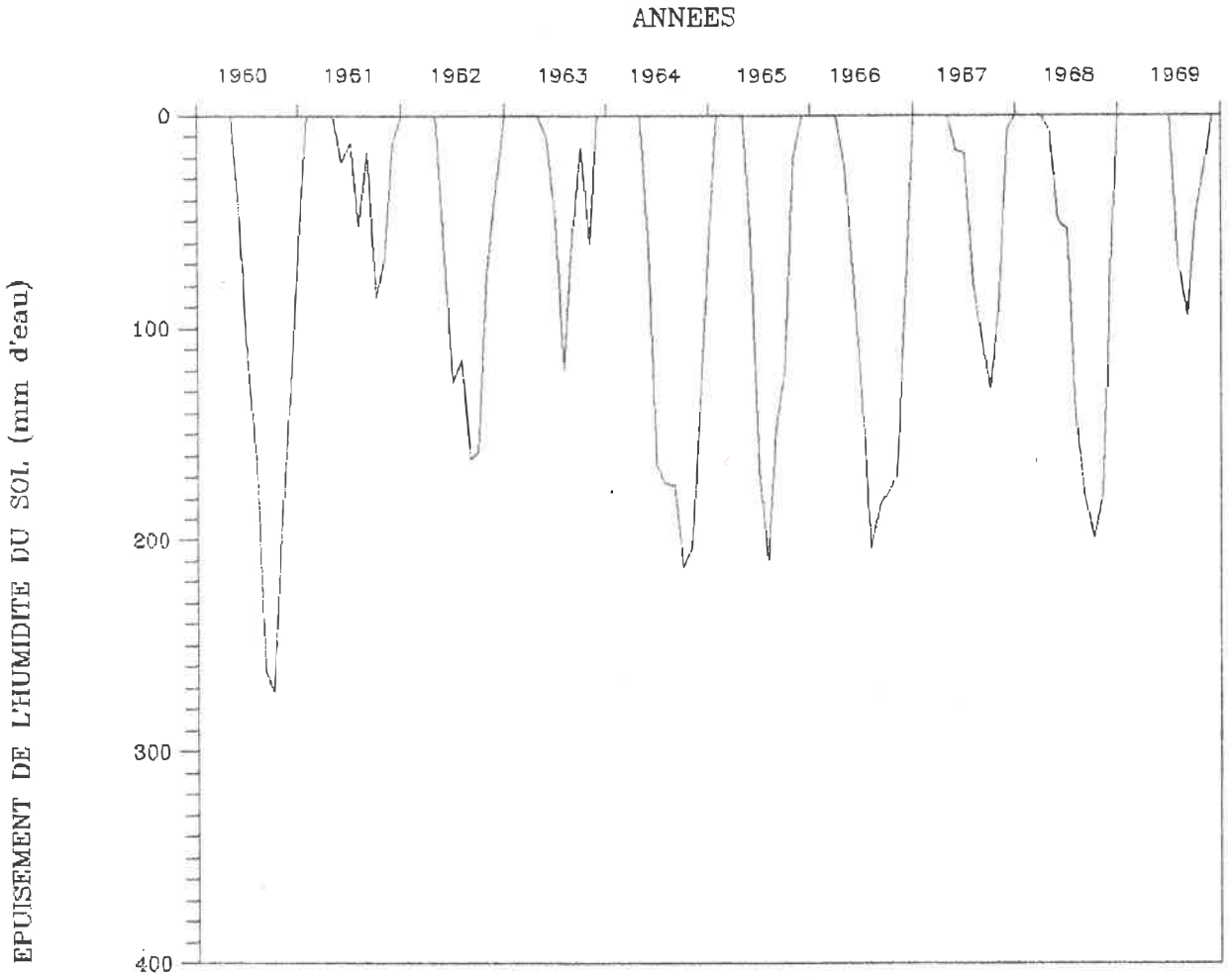


Figure A.4-4
Conditions de l'humidité du sol calculées a partir des données climatologiques 1960-1969
(l'ETP a été estimée par la formule de Turc)

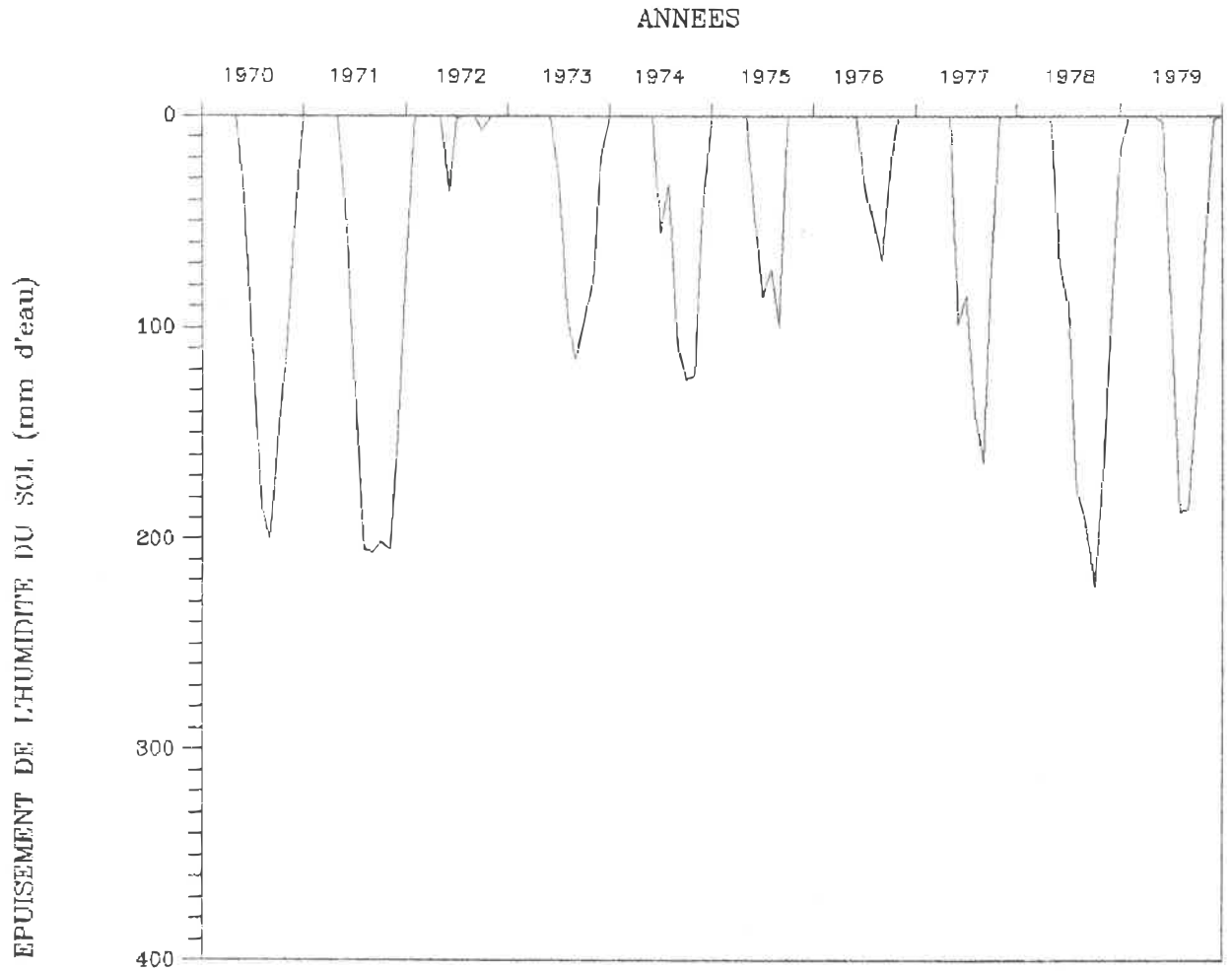


Figure A.4-5
Conditions de l'humidité du sol calculées à partir des données climatologiques 1970-1979
(l'ETP a été estimée par la formule de Turc)

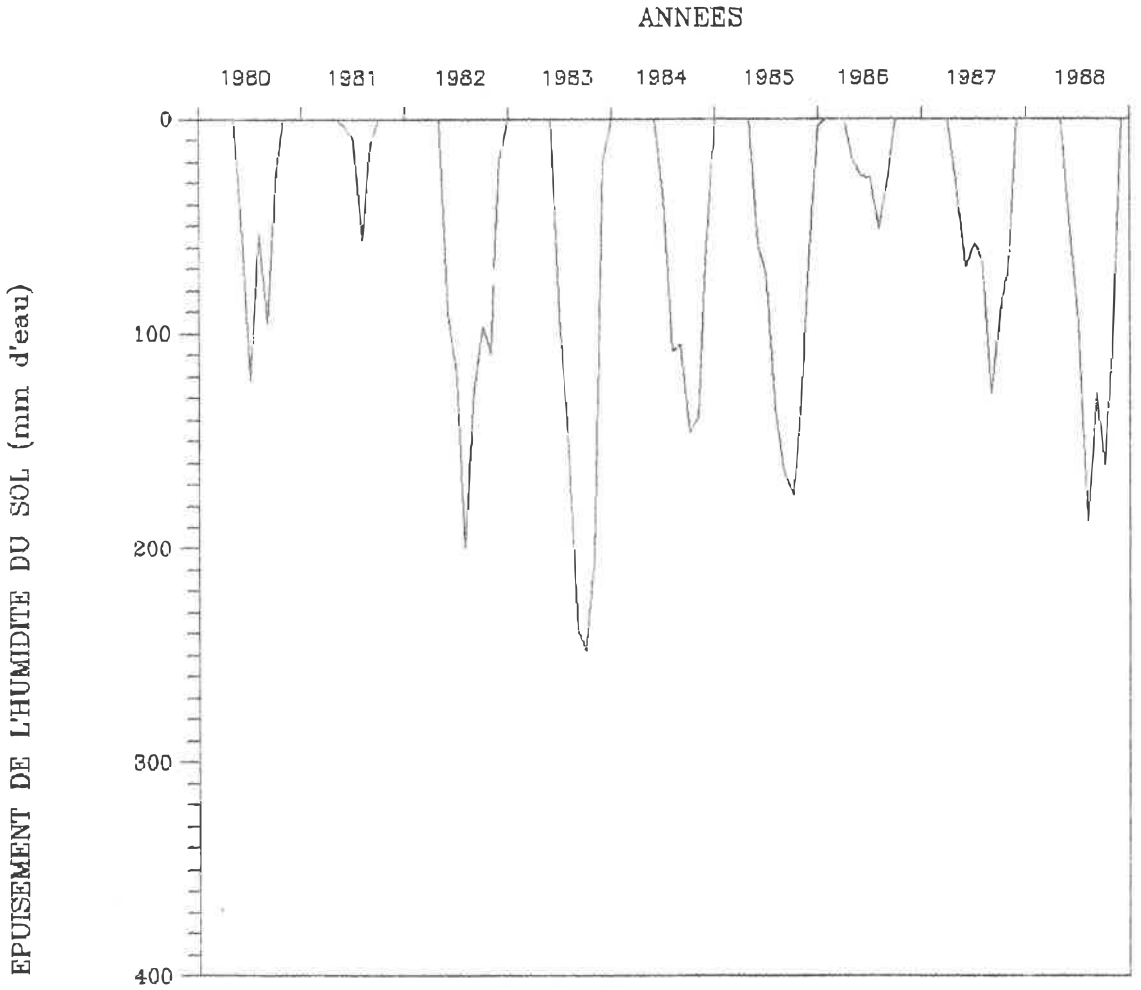


Figure A.4-6
Conditions de l'humidité du sol calculees à partir des données climatologiques 1980-1988
(l'ETP a été estimée par la formule de Turc)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00235676 2