

Université du Québec

Mémoire présenté à

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

comme exigence partielle
de la
maîtrise ès sciences
par
Michel Patoine

Mise au point d'un modèle informatisé de gestion de l'irrigation

Janvier 1988

REMERCIEMENTS

Je désire remercier en premier lieu monsieur Jean-Pierre Fortin, professeur à l'INRS-Eau et directeur de thèse, ainsi que monsieur Yvon Brochu, responsable du projet de gestion de l'irrigation au Service du génie du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation qui ont dirigé conjointement ma recherche. Leurs conseils nombreux et constants m'ont été d'une aide précieuse. Je tiens à leur témoigner ma reconnaissance pour l'enthousiasme et la disponibilité manifestés tout au long de cette étude.

Je tiens de plus à remercier monsieur André Moreau pour le soutien informatique qu'il m'a apporté.

Mes remerciements vont également à madame Diane-Joël Cossette qui a travaillé à l'élaboration des figures de la présente étude et à l'entrée de données sur ordinateur.

J'adresse un merci tout particulier à madame Francyne Genest qui a assuré la dactylographie du présent mémoire.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui de près et de loin ont permis la réalisation de ce travail.

Je désire de plus remercier de façon particulière mon épouse Pascale Angers pour le soutien et l'encouragement qu'elle m'a témoigné tout au long de ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

	<u>PAGE</u>
REMERCIEMENTS.....	i
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
TABLE DES MATIÈRES (ANNEXES).....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX (ANNEXES).....	xv
LISTE DES FIGURES (ANNEXES).....	xvii
1. INTRODUCTION.....	1
2. RAPPELS SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET HYDRAULIQUES DES SOLS ET SUR LES BESOINS EN EAU DES CULTURES.....	13
2.1 Propriétés des sols.....	15
2.1.1 Evaluation de la teneur en eau des sols...	15
2.1.2 Propriétés hydrodynamiques.....	19
2.2 Besoins en eau des cultures.....	24
2.2.1 Profondeurs d'enracinement.....	24
2.2.2 Périodes de croissance critiques.....	30
3. PRÉSENTATION DE DIFFÉRENTS MODÈLES DE GESTION DE L'IRRIGATION.....	33
3.1 Introduction.....	35
3.2 Présentation de quelques modèles de gestion de l'irrigation rencontrés dans la littérature.....	37

	<u>PAGE</u>
3.2.1 Le modèle d'Agriculture Canada.....	37
3.2.2 Le modèle de l'USDA.....	40
3.2.3 Le modèle du MAPAQ (Service de génie).....	41
4. DESCRIPTION DES SITES EXPÉRIMENTAUX RETENUS.....	51
4.1 Présentation des sites.....	53
4.2 Mesures climatiques.....	55
4.3 Description physique des sites.....	55
5. ÉTUDE DES MESURES DE TENEUR EN EAU DU SOL SERVANT A LA VALIDATION DU MODÈLE.....	59
5.1 Erreur sur les mesures de teneur en eau du sol....	61
5.2 Présentation et traitement des mesures de teneur en eau recueillies sur chaque site.....	62
5.3 Choix des valeurs décrivant le degré d'humidité du sol dans un site à utiliser pour valider le modèle.....	64
5.4 Discussion de la variabilité spatiale du degré d'humidité du sol à l'intérieur d'un site et d'un site à un autre à l'intérieur d'un même champ....	65

	<u>PAGE</u>
6. RÉSULTATS DES SIMULATIONS AVEC LE MODÈLE DU SERVICE DU GÉNIE (MAPAQ).....	67
6.1 Paramètres de départ et résultats des simulations.	69
6.2 Discussion des résultats et identification des points à améliorer.....	78
7. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE ET AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES.....	91
7.1 Sensibilité de la réponse du modèle à ses composantes.....	93
7.2 Ajustement des paramètres du modèle.....	95
8. RECOMMANDATIONS POUR L'UTILISATION DU MODÈLE AU CHAMP EN TEMPS RÉEL POUR FINS DE GESTION DE L'IRRIGATION.....	97
9. CONCLUSION.....	107
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	115

ANNEXE
TABLE DES MATIÈRES

	<u>PAGE</u>
A. RAPPELS SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET HYDRAULIQUES DES SOLS.....	125
A.1 Propriétés physiques.....	127
A.2 Teneurs en eau caractéristiques.....	133
B. DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES SITES EXPÉRIMENTAUX RETENUS.....	137
B.1 Présentation des sites.....	139
B.2 Localisation des stations de mesures climatiques..	151
B.3. Description physique des sites.....	152
C. ÉTUDE DES MESURES DE TENEUR EN EAU DU SOL SERVANT A LA VALIDATION DU MODÈLE.....	175
C.1 Revue de littérature sur les différentes méthodes de mesure de la teneur en eau du sol.....	177
C.2 Étude de l'erreur sur les mesures de teneur en eau du sol obtenues par thermogravimétrie et à l'aide d'une sonde à neutrons.....	179
C.2.1 Thermogravimétrie.....	179
C.2.2 Sonde à neutrons.....	180
C.3 Présentation et traitement des mesures de teneur en eau recueillies sur chaque site.....	190
C.3.1 Thermogravimétrie.....	190
C.3.2 Sonde à neutrons.....	201

	<u>PAGE</u>	
C.4	Choix des valeurs décrivant le degré d'humidité du sol dans un site à utiliser pour valider le modèle.....	217
C.5	Discussion de la variabilité spatiale du degré d'humidité du sol à l'intérieur d'un site et d'un site à un autre à l'intérieur d'un même champ....	224
D.	COMPTES NEUTRONIQUES MESURÉS A L'AIDE D'UNE SONDE A NEUTRONS POUR LES SITES CULTIVÉS EN POMMES DE TERRE ET EN FRAISES A L'ILE D'ORLÉANS POUR L'ÉTÉ 1986.....	231
E.	MESURES DE TENEURS EN EAU DU SOL AYANT SERVI A LA CALIBRATION DE LA SONDE A NEUTRONS POUR LES SITES LOCALISÉS A L'ILE D'ORLÉANS POUR LES ÉTÉS 1985 ET 1986.....	239
F.	ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE ET AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES.....	251
F.1	Étude de sensibilité des principaux paramètres servant au calcul du déficit en eau journalier du sol.....	253
F.2	Ajustement des paramètres du modèle.....	265

LISTE DES TABLEAUX

	<u>PAGE</u>
Tableau 1.1 Compilation des précipitations hebdomadaires et identification des périodes de déficits en eau pour les stations de Saint-Jean et Sainte-Clothilde (tiré de Mélançon, 1982).....	5
Tableau 1.2 Répartition des systèmes d'irrigation en opération selon les cultures au Québec (Harnois, 1982).....	8
Tableau 1.3 Superficie irriguée, superficie souhaitable à irriguer et nombre de producteurs agricoles possédant un système d'irrigation pour chaque région agricole du Québec en 1980 (Brochu, 1982).....	9
Tableau 2.1 Valeurs représentatives de certaines propriétés du sol selon le type de sol (les teneurs en eau sont exprimées sur une base pondérale) (tiré de Gallichand et al., 1983).....	17
Tableau 2.2 Profondeur d'enracinement effective de diverses cultures arrivées à maturité, cultivées sur sols profonds et homogènes (tiré de Payen, 1982).....	28
Tableau 2.3 Données générales sur la profondeur d'enracinement de certaines cultures à maturité. La fraction de la réserve utile (p.) et la réserve facilement utilisable (p. sa) pour différents types de sol (en mm/m de sol), quand l'évapotranspiration est environ 5 - 6 mm/jour (tiré de Gallichand et al., 1983).....	29
Tableau 2.4 Périodes critiques pour différentes cultures au point de vue de la demande d'eau (tiré de Payen, 1982).....	32

	<u>PAGE</u>
Tableau 3.1 Numéro de courbe pour différents types de sol et différentes pratiques culturales (tiré de Moffet, 1979).....	48
Tableau 4.1 Parcelles et sites expérimentaux retenus pour la validation du modèle de gestion de l'irrigation.....	54
Tableau 6.1 Dates des stades culturaux utilisées comme paramètres d'entrée pour les simulations.....	75
Tableau 6.2 Résultats des simulations: essai numéro un.....	76
Tableau 6.3 Comparaison des déficits hydriques calculés avec le modèle aux déficits mesurés au champ et correctifs à apporter.....	80
Tableau 8.1 Valeurs minimales et maximales des coefficients culturaux et coefficients servant à évaluer Kco au cours de la saison pour la culture de la pomme de terre et de la fraise.....	102

LISTE DES FIGURES

		<u>PAGE</u>
Figure 1.1	Étude fréquentielle des déficits hydriques au Québec et localisation des sites de mesure du degré d'humidité du sol pour les étés 1985, 1986 (carte tirée de Massin, 1971).....	4
Figure 1.2	Bilan calculé en ajoutant la précipitation quotidienne et en soustrayant l'évapotranspiration journalière pour Saint-Jean en 1980 (tiré de Mélançon, 1982).....	6
Figure 1.3	Carte des régions agricoles du Québec (tiré de Brochu, 1982).....	10
Figure 2.1	Capacité de rétention en eau des sols de différentes textures (tiré de Gallichand et al., 1983).....	18
Figure 2.2	Évolution des profils hydriques (P_n) suite à une irrigation au temps t_0 (adapté de Bentz, 1983).....	21
Figure 2.3	Taux d'infiltration prédit par des méthodes numériques en fonction du temps pour différents sols (tiré de Gallichand et al., 1983).....	23
Figure 2.4	Profils radiculaires pour différentes cultures (tiré de Bentz, 1983).....	25
Figure 2.5	Activité des racines de la luzerne (tiré de Payen, 1982).....	26
Figure 2.6	Extraction de l'eau en fonction du temps après une irrigation pour une culture de luzerne sur loam limoneux (tiré de Bentz, 1983).....	27

Figure 2.7	Courbe généralisée de la variation de Kco en fonction de l'époque physiologique des plantes (tiré de Bentz, 1983).....	31
Figure 3.1	Quelques courbes d'assèchement trouvées dans la littérature (courbes A à H) et courbe d'assèchement retenue dans la présente étude (courbe I) (tiré de Penel, 1984).....	39
Figure 3.2	Relation entre pluviométrie (en pouce) et ruissellement (en pouces) pour différents numéros de courbes de ruissellement (RCN). Cet abaque correspond au cas $I_a = 0,2 S$ (tiré de Penel, 1984).....	47
Figure 3.3	Calcul du déficit journalier à l'aide du modèle présenté par Penel (1984).....	50
Figure 6.1	Évolution du déficit calculé et mesuré et de la réserve utile au cours de la saison pour les sites BUIP1 et BUIP2 (pommes de terre) en 1985 et 1986.....	70
Figure 6.2	Évolution du déficit calculé et mesuré et de la réserve utile au cours de la saison pour les sites NDPP1 et NDPP2 (pommes de terre) en 1985 et 1986.....	71
Figure 6.3	Évolution du déficit calculé et mesuré et de la réserve utile au cours de la saison pour les sites BLOP1 et BLOP2 (pommes de terre) en 1985 et 1986.....	72
Figure 6.4	Évolution du déficit calculé et mesuré et de la réserve utile au cours de la saison pour les sites PREP1, PREP2, PREF1 et PREF2 (pommes de terre et fraises) en 1985.....	73

Figure 6.5	Évolution du déficit calculé et mesuré et de la réserve utile au cours de la saison pour les sites GOSF1 et GOSF2 (fraises) en 1985 et 1986.....	74
Figure 6.6	Comparaison des températures maximums journalières mesurées à l'aéroport de Québec et mesurées au champ à 1,52 m au-dessus du sol pour les sites BLOP1 et BLOP2 en août 1986.....	82
Figure 6.7	Comparaisons des vitesses du vent ramenées à deux mètres de hauteur pour l'aéroport de Québec et les sites BLOP1 et BLOP2 pour le mois d'août 1986.....	84
Figure 6.8	Fonctions de vitesse du vent (pour des conditions d'été) utilisées pour Québec (Penel, 1984) et tirée de la littérature pour neuf autres localités (d'après Doorembos et Pruitt, 1977).....	86
Figure 6.9	Zones des courbes d'assèchement trouvées dans la littérature pour des sables, des limons et des argiles, et courbes retenues pour représenter un sable, un loam sableux, un loam ou un loam sablo-argileux, un loam argileux et une argile à l'aide de l'équation 6.1.....	88

ANNEXE
LISTE DES TABLEAUX

	<u>PAGE</u>
Tableau B.1 Parcelles et sites expérimentaux retenus pour la validation du modèle de gestion de l'irrigation.....	150
Tableau B.2 Description topographique des parcelles et principaux stades de développement des cultures.....	153
Tableau B.3 Description des caractéristiques du sol des différents horizons identifiés sur chaque site.....	162
Tableau B.4 Caractéristiques de rétention en eau du sol pour les différents horizons de chaque site.....	165
Tableau B.5 Évolution de la densité du sol mesurée dans le profil de sol pour le site BLOP1 en 1985.....	168
Tableau C.1 Teneurs en eau pondérales du sol mesurées par thermogravimétrie pour les sites localisés à Baie-Comeau...	191
Tableau C.2 Teneurs en eau pondérales du sol mesurées par thermogravimétrie pour les sites localisés à Notre-Dame-de-la-Paix.....	195
Tableau C.3 Caractéristiques des droites de régression linéaire simple (pente, ordonnée à l'origine, coefficient de détermination, écart-type) retenus pour chaque site, et coefficients servant à calculer l'intervalle de prévision.....	208
Tableau C.4 Caractéristiques des droites de régression linéaire simple (pente, ordonnée à l'origine, coefficient de détermination, écart-type) retenus pour l'ensemble des sites après regroupement et coefficients servant à calculer l'intervalle de prévision.....	212

	<u>PAGE</u>
Tableau F.1 Sensibilité relative de l'équation de Penman à ses paramètres pour juin 1986 pour l'aéroport de Québec..	264
Tableau F.2 Résultats des simulations: essai numéro deux.....	267
Tableau F.3 Résultats des simulations: essai numéro trois.....	268
Tableau F.4 Résultats des simulations: essai numéro quatre.....	271

ANNEXE
LISTE DES FIGURES

		<u>PAGE</u>
Figure A.1	Volume apparent de sol tel qu'on le voit en réalité et tel qu'on le verrait si on pouvait faire la séparation de ses trois composantes (tiré de Bentz, 1983)..	127
Figure A.2	Profils de masses volumiques apparentes sèches (tiré de Bentz, 1983).....	129
Figure A.3	Triangle textural de classification des sols (tiré de Gallichand et al., 1983).....	131
Figure A.4	Courbes de succion/teneur en eau pour trois grandes catégories de sol (tiré de Penel, 1984).....	134
Figure A.5	Estimation de la capacité de rétention au champ (tiré de Bentz, 1983).....	136
Figure B.1	Plan de localisation des parcelles expérimentales de la station les Buissons pour 1985 et 1986.....	140
Figure B.2	Plan de localisation des parcelles expérimentales à Notre-Dame-de-la-Paix pour 1985 et 1986.....	143
Figure B.3	Localisation des sites expérimentaux et pluviomètres sur l'Ile d'Orléans pour les cultures de la pomme de terre et de la fraise au cours des étés 1985 et 1986.....	144
Figure B.4	Plan de localisation et profil topographique des sites BLOP1 et BLOP2 en 1985 et 1986.....	145

	<u>PAGE</u>
Figure B.5 Plan de localisation et profil topographique des sites PREP1 et PREP2 en 1985.....	146
Figure B.6 Schéma de localisation et profil topographique des sites GOSF1 et GOSF2 en 1985.....	147
Figure B.7 Plan de localisation et profil topographique des sites GOSF1 et GOSF2 en 1986.....	148
Figure B.8 Schéma de localisation et profil topographique des sites PREF1 et PREF2 en 1985.....	149
Figure B.9 Disposition des tuyaux d'accès pour la sonde à neutrons à l'intérieur d'un site, position de l'échantillonnage pour la calibration et profondeur de lecture pour chacune des deux cultures étudiées.....	159
Figure B.10 Schéma de l'échantillonnage réalisé à proximité des sites pour déterminer les propriétés physiques du sol.	160
Figure B.11 Evolution de la teneur en eau mesurée par la méthode neutronique (un compte) et par thermogravimétrie (un échantillon) en fonction du temps depuis la saturation pour le site PREP1 à 20 et 40 cm de profondeur.....	170
Figure B.12 Évolution de la teneur en eau mesurée par la méthode neutronique (moyenne de trois comptes) et par thermogravimétrie (un échantillon) en fonction du temps depuis la saturation pour le site BLOP1 à 15 et 35 cm de profondeur.....	171

Figure B.13	Évolution de la teneur en eau mesurée par la méthode neutronique (moyenne de trois comptes) et par thermogravimétrie (un échantillon) en fonction du temps depuis la saturation pour le site BLOP2 à 15 et 35 cm de profondeur.....	172
Figure C.1	Schéma de la sonde à neutrons (d'après Bernier et al., 1983).....	181
Figure C.2	Évolution de la teneur en eau pondérale pour le site BUIP1 en 1985 et des comptes neutroniques pour le site BLOP1 en 1986 au cours d'une saison de culture à différentes positions à l'intérieur d'un site cultivé en pommes de terre.....	200
Figure C.3	Courbes de calibration de la sonde à neutrons après regroupement des sites semblables, et intervalles de confiance à 95%.....	213
Figure C.4	Erreur sur l'estimation de la teneur en eau pondérale moyenne à partir de mesure neutroniques, attribuable à l'hétérogénéité du site et à l'erreur associée à la prévision à partir de la droite de régression.....	219
Figure C.5	Hypothèse concernant la distribution des gradients de teneurs en eau sur le profil de sol à partir de mesures à deux profondeurs.....	221
Figure C.6	Détermination de la hauteur d'eau dans le sol sur la profondeur des racines à partir de mesures à deux profondeurs à l'aide de la sonde à neutrons.....	222

	<u>PAGE</u>
Figure C.7 Comparaison de l'évolution de la teneur en eau (ou du compte neutronique) moyen au cours d'une saison entre sites (et entre profondeurs) d'un même champ.....	225
Figure F.1 Sensibilité du modèle à une variation de 25% de la teneur en eau à la capacité au champ, de la réserve utile (en mm/m) et de la profondeur d'enracinement pour le site BLOP1 en 1986.....	255
Figure F.2 Sensibilité du modèle à l'indice d'abstraction initiale (Ia) pour le site BLOP1 en 1986).....	257
Figure F.3 Sensibilité du modèle aux paramètres entrant dans le calcul de l'évapotranspiration réelle pour le site BLOP1 en 1986.....	258
Figure F.4 Sensibilité du modèle à l'indice d'abstraction initiale (Ia) pour le site GOSF1 en 1985.....	259
Figure F.5 Sensibilité du modèle aux paramètres entrant dans le calcul de l'évapotranspiration réelle pour le site GOSF1 en 1985.....	261
Figure F.6 Simulations après ajustement du modèle pour les sites BUIP1 et BUIP2 en 1985 et 1986.....	272
Figure F.7 Simulations après ajustement du modèle pour les sites NDPP1 et NDPP2 en 1985 et 1986.....	273
Figure F.8 Simulations après ajustement du modèle pour les sites BLOP1 et BLOP2 en 1985 et 1986.....	274

	<u>PAGE</u>
Figure F.9 Simulations après ajustement du modèle pour les sites PREF1 et PREF2 en 1985.....	275
Figure F.10 Simulations après ajustement du modèle pour les sites GOSF1 et GOSF2 en 1985 et 1986.....	276

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

L'irrigation des cultures est utilisée depuis des siècles dans certaines régions du monde où les apports d'eau par les précipitations au cours de la saison de croissance sont nettement insuffisants pour combler les besoins en eau des plantes.

Au Québec, l'apport pluviométrique moyen au cours des mois d'été (juin, juillet, août) est presque aussi élevé que l'évapotranspiration potentielle moyenne. Par contre, une étude fréquentielle des déficits hydriques pour la province (figure 1.1) montre que certaines régions sont plus exposées. On peut identifier en particulier la vallée de l'Outaouais, la région de Montréal, les régions en bordure du Saint-Laurent et la région du Lac Saint-Jean qui sont de plus les régions du Québec possédant le meilleur potentiel agricole.

Penel (1984) mentionne que les déficits en eau du sol au Québec sont occasionnés par la mauvaise répartition des précipitations au cours de la saison de croissance et par le ruissellement d'une partie importante de la pluie tombée. Les déficits attribuables à la répartition des précipitations au cours de la saison de croissance peuvent être visualisés par une étude hebdomadaire ou journalière des précipitations. Melançon (1982) présente une compilation des précipitations hebdomadaires pour les stations de Saint-Jean (Ile d'Orléans) et de Sainte-Clothilde (près de Montréal) et il identifie les périodes de déficits en eau (tableau 1.1). L'auteur constate qu'il y a un déficit en eau évident cinq années sur huit à l'Ile d'Orléans. Il montre de plus que pour la station de Saint-Jean, en 1980, un bilan journalier révèle la présence de déficits en eau (figure 1.2) que les précipitations hebdomadaires ne montraient pas. L'auteur note finalement que les périodes sèches sont souvent suivies d'un orage qui provoque le ruissellement d'une partie importante de la pluie tombée. Selon Payen (1982) la proportion de pluie ruisselée peut atteindre 50% pour une fraisière.

L'INRS ne détient pas les droits pour diffuser cette carte. Vous pouvez le consulter dans la version papier de cette thèse :

PRECIPITATION HEBDOMADAIRE (mm)

ST-JEAN	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Juin	I	8,64	2,03	29,97	0,00	34,80	15,75	7,60
	II	16,00	8,85	34,80	26,42	12,19	25,40	2,60
	III	11,18	52,75	7,11	24,64	48,26	34,80	18,30
	IV	45,72	3,81	2,29	31,75	n.d.	35,05	56,70
		22,86	5,36	0,00	39,37	10,67	26,67	
Juillet	I	92,46	32,60	1,78	11,94	7,62	0,00	4,40
	II	20,83	11,43	67,06	98,55	17,53	6,10	29,00
	III	5,33	10,67	31,75	36,83	40,64	15,24	17,00
	IV	37,59	49,78	75,18	27,18	17,27	40,64	42,80
		5,33	15,49	0,00	6,10	29,97	0,25	
Août	I	60,20	33,27	8,13	11,94	23,11	0,00	15,70
	II	73,66	1,27	5,33	54,10	26,16	40,80	28,50
	III	24,64	3,05	19,81	14,73	27,18	20,00	38,10
	IV	32,26	8,89	6,60	14,99	24,64	0,80	1,60
		25,40	6,60	0,00	9,13	10,92	26,80	23,00

○ : période de déficit hydrique

Tableau 1.1 Compilation des précipitations hebdomadaires et identification des périodes de déficits en eau pour les stations de Saint-Jean et Sainte-Clothilde (tiré de Mélançon, 1982).

STE-CLOTHILDE		1980
Avril	I	23,4
	II	32,4
	III	10,4
	IV	16,2
		5,2
Mai	I	0,0
	II	10,0
	III	9,2
	IV	17,8
		16,8
Juin	I	11,0
	II	11,6
	III	17,0
	IV	4,8
		3,6
Juillet	I	13,0
	II	7,2
	III	13,8
	IV	21,6
		23,8
Août	I	7,6
	II	2,8
	III	55,3
	IV	4,0
		28,2
		23,0

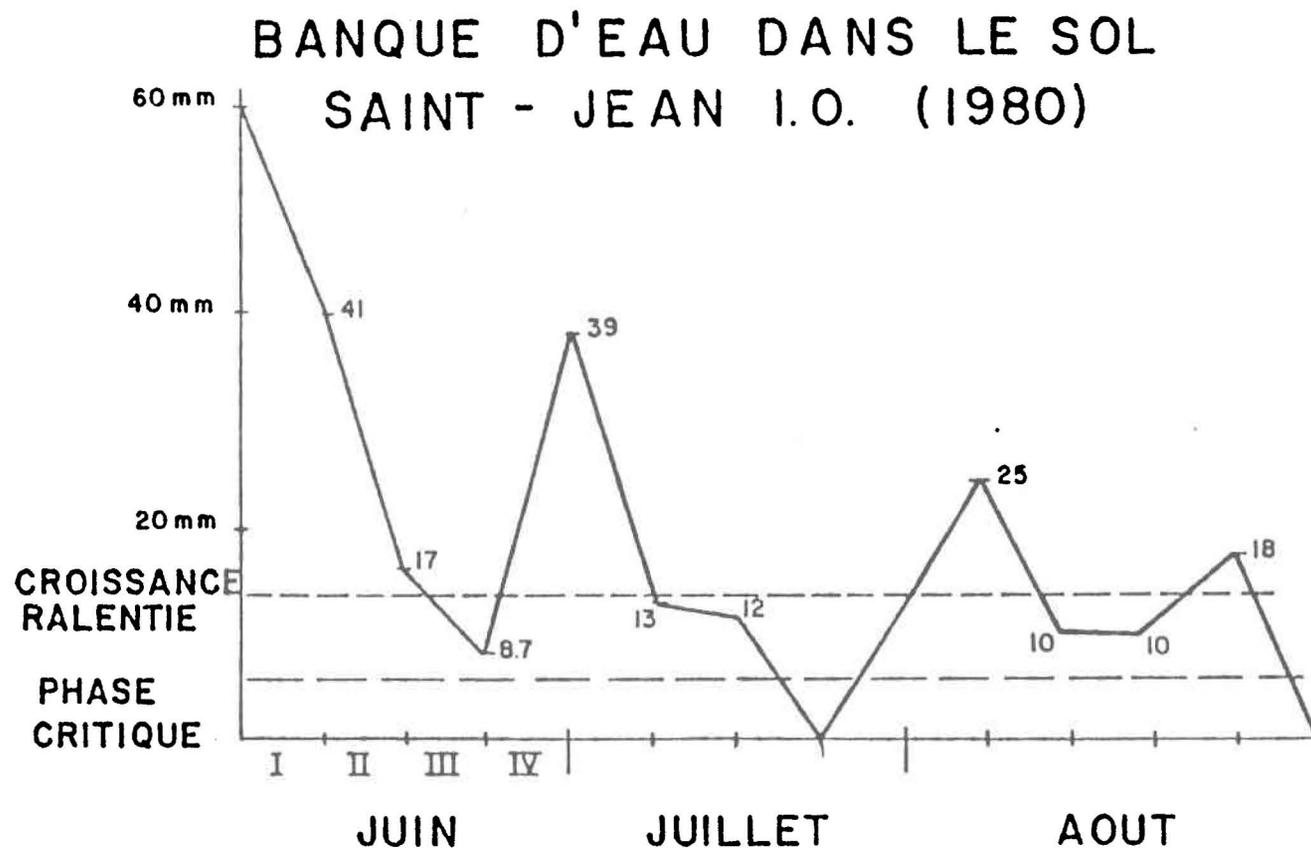


Figure 1.2

Bilan calculé en ajoutant la précipitation quotidienne et en soustrayant l'évapotranspiration journalière pour Saint-Jean en 1980 (tiré de Mélançon, 1982).

Les cultures à enracinement peu profond sont plus susceptibles de voir diminuer leurs rendements de façon importante suite à une période de déficit en eau plus ou moins longue surtout si le déficit se produit à un stade de croissance critique. Au Québec, les cultures les plus sensibles à un manque d'eau présentent également une valeur économique élevée. Ce sont les légumes, les petits fruits (fraises, framboises, bleuets, etc.), la pomme de terre, le tabac et les pommiers (en particulier les variétés naines et semi-naines). Ces espèces possèdent pour la plupart un système racinaire peu profond. Elles sont surtout cultivées sur des sols sablonneux possédant un bon drainage ce qui permet de limiter les maladies et facilite le passage de la machinerie au champ. Par contre, ces sols possèdent une faible capacité de rétention en eau. Ce facteur combiné à la faible profondeur d'enracinement des cultures considérées et à la mauvaise répartition des pluies rend nécessaire l'apport des quantités d'eau supplémentaires pour assurer des rendements appréciables.

La mécanisation et l'intensification de l'agriculture du Québec au cours des trente dernières années ont favorisé un développement important de l'irrigation pour les cultures à haute valeur économique de façon à diminuer les pertes rattachées aux déficits hydriques. Les premières cultures irriguées ont été le tabac, puis la fraise. Elles occupent encore une place importante avec les légumes et les pommes de terre (tableau 1.2). Harnois (1982) rapporte que 700 systèmes d'irrigation étaient en opération au Québec en 1976. Une étude plus récente dont les résultats sont présentés au tableau 1.3 indique qu'en 1980, 980 producteurs possédaient un système d'irrigation. Cette étude révèle de plus que les superficies irriguées dans la province se chiffraient à 14 700 hectares ce qui correspond à 35% des superficies souhaitables à irriguer. Brochu (1987) rapporte de plus que les superficies irriguées ont augmenté de 5 et 10% au cours des six dernières années pour les régions agricoles 06 et 09 respectivement et qu'un pourcentage d'augmentation semblable peut être attribué aux autres régions.

L'expansion des superficies irriguées soulève deux questions. La première est liée à l'approvisionnement en eau en particulier dans les régions où la concentration des utilisateurs est élevée tandis que la seconde est rattachée aux coûts d'opération des systèmes d'irrigation. Le producteur agricole doit donc connaître le moment propice à l'irrigation ainsi que la quantité d'eau à appliquer de façon à utiliser les ressources dont il dispose (eau, équipements et main-d'oeuvre) de façon optimale.

Tableau 1.2 Répartition des systèmes d'irrigation en opération selon les cultures au Québec (Harnois, 1982)

CULTURE	NOMBRE DE SYSTÈMES
Légumes	245
Fraises	240
Tabac	147
Pommes de terre	49
Plants de pépinière	18
Pâturages	7
Vergers	3
Atocas	3
Maïs	1

Tableau 1.3

Superficie irriguée, superficie souhaitable à irriguer et nombre de producteurs agricoles possédant un système d'irrigation pour chaque région agricole du Québec en 1980 (Brochu, 1982)

Région agricole*	Superficie irriguée (ha)	Superficie souhaitable à irriguer (ha)	Producteurs possédant un système
01	85	300	20
02	475	6140	40
03	99	500	11
04	250	2000	30
05	131	223	65
06	2000	5000	250
07	5055	13700	177
08	1069	1600	45
09	3	370	2
10	5198	7720	297
11	162	1214	30
12	140	1240	12
TOTAL :	14667	40007	979

* Voir figure 1.3

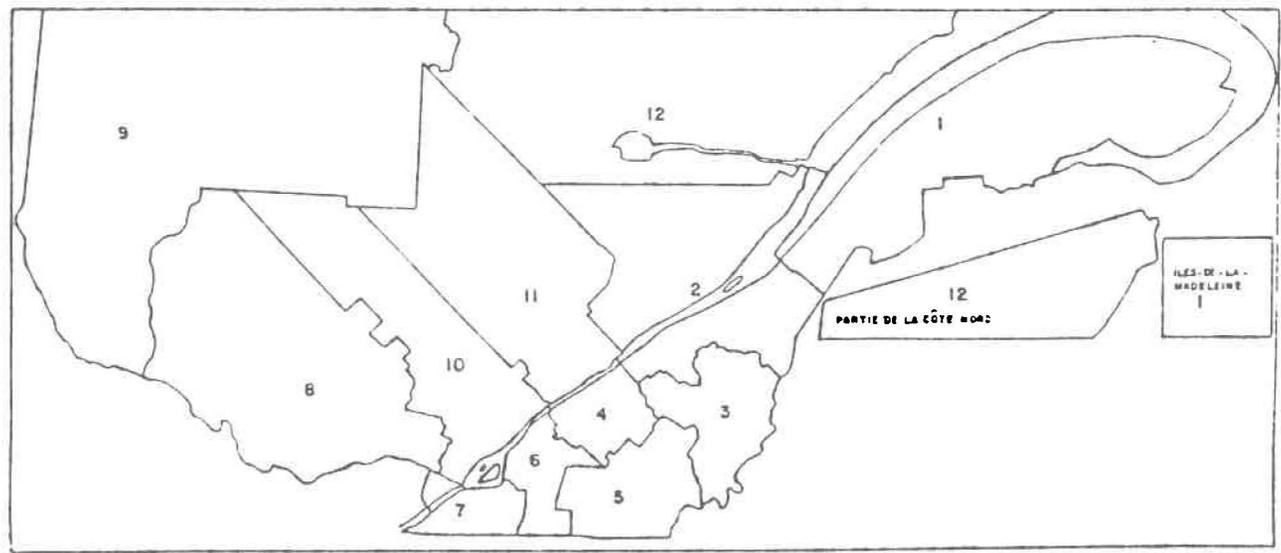


Figure 1.3 Carte des régions agricoles du Québec (tiré de Brochu, 1982).

Pour l'aider dans sa décision, le Service du génie du MAPAQ a adapté un modèle informatisé de gestion de l'irrigation qui calcule un bilan journalier du déficit en eau du sol dans la zone des racines de la plante, de façon à évaluer la quantité d'eau à appliquer et la date d'application. Une campagne de mesure du degré d'humidité du sol a été réalisée à trois localités au Québec (figure 1.1) au cours de trois étés consécutifs, soient 1984 à 1986. Les sites retenus pour la validation du modèle sont cultivés en pommes de terre et en fraises. Toutefois, le modèle sera adaptable à d'autres cultures ultérieurement.

Le présent mémoire portera sur la mise au point finale du modèle développé de façon à le rendre utilisable au Québec pour fins de prédiction en temps réel.

Dans un premier temps, nous ferons un rappel sur les propriétés physiques et hydrauliques des sols et sur les besoins en eau des plantes. Nous présenterons ensuite différents modèles de gestion informatisée de l'irrigation.

Dans un troisième temps, nous décrirons les sites expérimentaux et ferons une étude des mesures de teneurs en eau du sol recueillies sur chaque site en vue de l'ajustement d'un modèle.

Puis, une présentation des résultats des simulations du modèle retenu pour les sites étudiés nous amènera à identifier les composantes à améliorer dans la version originale du modèle à valider.

Une étude de sensibilité de la réponse du modèle à ses paramètres d'entrée permettra de préciser le degré de précision requis sur ceux-ci. Nous présenterons ensuite les résultats finaux du modèle avec les paramètres caractéristiques des sites étudiés, et nous déterminerons les critères de décision qui serviront à l'utilisation du modèle au champ en temps réel.

CHAPITRE 2

RAPPELS SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET
HYDRAULIQUES DES SOLS ET SUR LES BESOINS EN EAU DES CULTURES

2. RAPPELS SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET HYDRAULIQUES DES SOLS ET SUR LES BESOINS EN EAU DES CULTURES

2.1 Propriétés physiques des sols

Les sols agricoles peuvent être définis selon leurs différentes propriétés physiques, celles-ci étant résumées à l'annexe A. Nous y retrouvons en particulier les définitions de la masse volumique apparente, du taux de matière organique, des teneurs en eau pondérales et volumiques ainsi que des teneurs en eau caractéristiques. Ces définitions de base nous seront utiles ultérieurement.

2.1.1 Evaluation de la teneur en eau des sols

On retrouve dans la littérature différents moyens d'évaluer la teneur en eau des sols à la capacité au champ et au point de flétrissement en connaissant les caractéristiques texturales de la fraction plus petite que 2 mm. Dans certains cas, les caractéristiques structurales du sol sont également considérées.

Hansen et al. (1980) présentent au tableau 2.1 des valeurs représentatives de certaines propriétés du sol (perméabilité, porosité totale, densité apparente, capacité au champ, point de flétrissement et réserve en eau utile) pour différentes classes texturales de sols.

Côté (1982) présente à la figure 2.1 l'évolution des teneurs en eau caractéristiques des sols en fonction des différentes classes texturales. Il montre de plus l'effet d'un pourcentage élevé de matière organique sur la capacité de rétention en eau des sols.

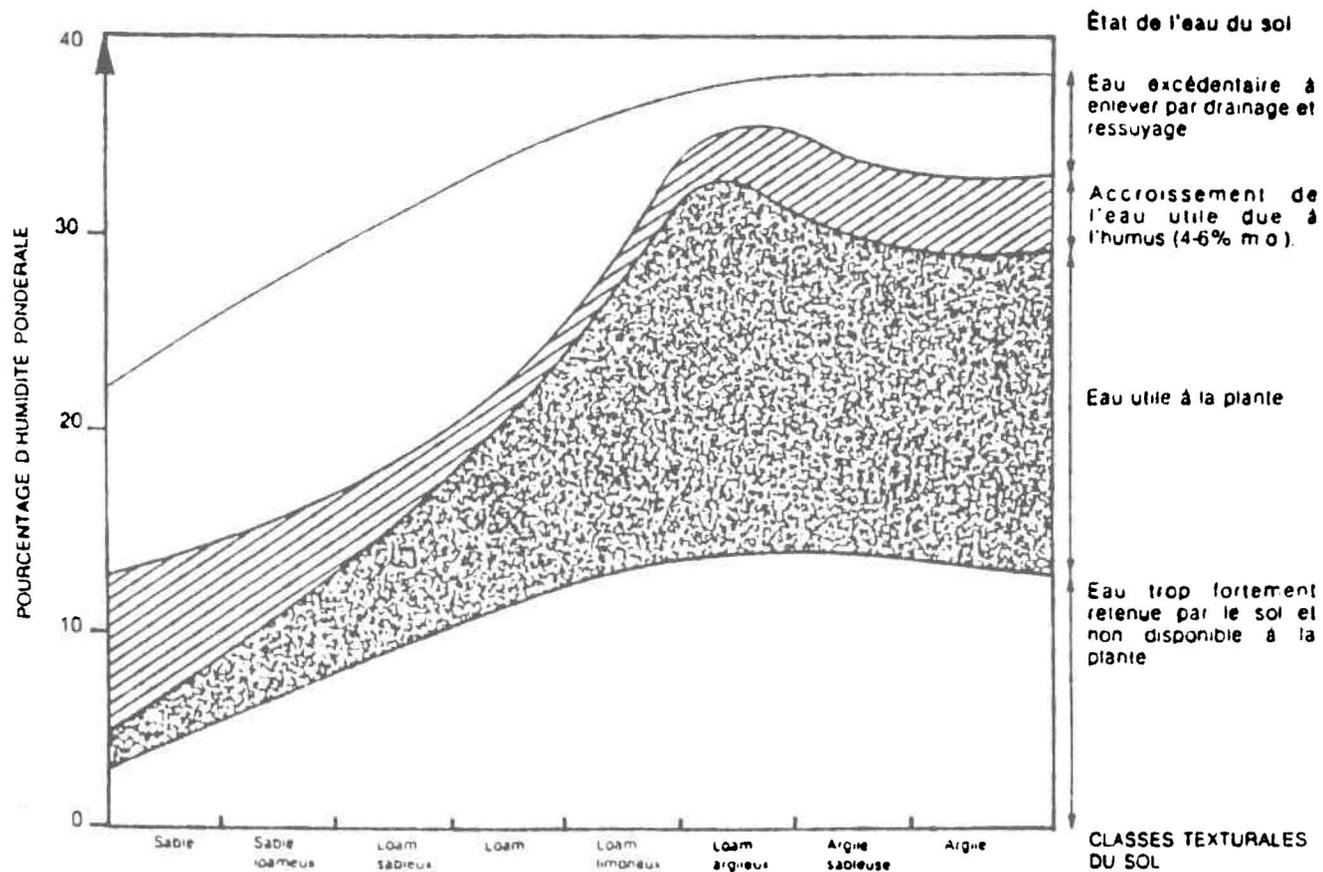
Ahuja et al. (1985) comparent six modèles permettant de relier la teneur en eau du sol à ses propriétés texturales et structurales à différents potentiels matriciels. Un de ces modèles (Rawls et al., 1982) considère seulement le pourcentage de sable et d'argile alors qu'un second (Rawls et al., 1983) considère en plus le pourcentage de matière organique et la densité apparente du sol. Ces modèles ont été développés par régressions multiples à partir de données de sol provenant de 32 états des États-Unis. Ahuja et al. (1985) observent que pour le bassin ayant fait l'objet de leur étude, le biais le plus faible entre les valeurs de teneurs en eau calculées et mesurées, soit $-0,001 \text{ m}^3/\text{m}^3$, est obtenu pour le modèle présenté par Rawls et al. (1983) à un potentiel matriciel de -1500 kPa voisin du point de flétrissement. Pour un potentiel matriciel voisin de la teneur en eau à la capacité au champ (-33 kPa), un biais de $0,026 \text{ m}^3/\text{m}^3$ est obtenu avec un écart-type de l'estimation de la teneur en eau volumique de $\pm 0,059 \text{ m}^3/\text{m}^3$ comparativement à $\pm 0,055 \text{ m}^3/\text{m}^3$ au point de flétrissement. Le modèle présenté est donc moins biaisé à -1500 kPa (équation 2.1) qu'à -33 kPa (équation 2.2), mais la dispersion des valeurs est semblable dans les deux cas.

Tableau 2.1 Valeurs représentatives de certaines propriétés du sol selon le type de sol (les teneurs en eau sont exprimées sur une base pondérale) (tiré de Gallichand et al., 1983).

Texture	Infiltration ^{a/} et perméabilité (cm/h)	Porosité totale (%)	Densité apparente (g/cm ³)	Capacité au champ (% b.s.)	Point de flétrissement (% b.s.)	Réserve utile		
						% base sèche	% volume	cm/m
Sable	5 (2,5 - 25)	38 (32 - 42)	1,65 (1,55 - 1,80)	6 (6 - 12)	4 (2 - 6)	5 (4 - 6)	8 (6 - 10)	8 (7 - 10)
Loam sableux	2,5 (1,3 - 7,6)	43 (40 - 47)	1,50 (1,40 - 1,60)	14 (10 - 18)	6 (4 - 8)	8 (6 - 10)	12 (9 - 15)	12 (9 - 15)
Loam	1,3 (0,8 - 2,0)	47 (43 - 49)	1,40 (1,35 - 1,50)	22 (18 - 26)	10 (8 - 12)	12 (10 - 14)	17 (14 - 20)	17 (14 - 19)
Loam argileux	0,8 (0,25 - 1,5)	49 (47 - 51)	1,35 (1,30 - 1,40)	27 (23 - 31)	13 (11 - 15)	14 (12 - 16)	19 (16 - 22)	19 (17 - 22)
Loam limoneux	0,25 (0,03 - 0,5)	51 (49 - 53)	1,30 (1,30 - 1,40)	31 (27 - 35)	15 (13 - 17)	16 (14 - 18)	21 (18 - 23)	21 (18 - 23)
Argile	0,5 (0,01 - 0,1)	53 (51 - 55)	1,25 (1,20 - 1,30)	35 (31 - 39)	17 (15 - 19)	18 (16 - 20)	23 (20 - 25)	23 (20 - 25)

Note: La gamme des valeurs est donnée entre parenthèses. (D'après Hansen et al., 1980)

^{a/} L'infiltration varie beaucoup avec la structure du sol même au delà de la gamme des valeurs montrées.



(D'après Côté, 1982)

Figure 2.1 Capacité de rétention en eau des sols de différentes textures (tiré de Gallichand et al., 1983).

$$\begin{aligned} \text{à } -1500 \text{ kPa} \quad H_v &= 0,0854 - 0,0004(S) + 0,0044(A) \\ (R=0,81) \quad &+ 0,0122 (M0) - 0,0182(Da) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \text{à } -33 \text{ KPa} \quad H_v &= 0,3486 - 0,0018(S) + 0,0039(A) \\ (R=0,88) \quad &+ 0,0228(M0) - 0,0738 (Da) \end{aligned} \quad (2.2)$$

- H_v = teneur en eau volumique (m^3/m^3)
 S = pourcentage de sable (%)
 A = pourcentage d'argile (%)
 $M0$ = pourcentage de matière organique (%)
 Da = masse volumique sèche apparente (Mg/m^3)

Les deux expressions précédentes ainsi que la figure 2.1 et le tableau 2.1 permettent d'obtenir une estimation grossière de la teneur en eau d'un sol au point de flétrissement et à la capacité au champ en connaissant les propriétés texturales et structurales du sol considéré. Les propriétés texturales s'appliquent à la fraction inférieure à 2 mm.

Une estimation plus précise de la teneur en eau à la capacité au champ peut être obtenue en mesurant la teneur en eau d'un sol au champ un à deux jours après avoir atteint la saturation ou en mesurant la teneur en eau d'un échantillon non remanié soumis à une succion de 20 à 33 kPa. Cette mesure prend en compte la fraction du sol ayant un diamètre supérieur à 2 mm.

2.1.2 Propriétés hydrodynamiques

Le mouvement de l'eau du sol est engendré par les précipitations, l'évaporation et les autres facteurs rencontrés dans la nature qui viennent perturber l'équilibre statique. Ce mouvement peut se produire en milieu saturé ou en milieu non saturé.

Dans un sol cultivé, les mouvements de l'eau en milieu saturé se produisent suite à une irrigation, à une pluie intense ou à la fonte des neiges. Ils sont également reliés à l'abaissement et à la remontée

d'une nappe phréatique. La conductivité hydraulique est la grandeur physique généralement utilisée pour quantifier ce phénomène. Elle varie suivant les classes texturales de sols.

Sous les conditions normales de développement des plantes, le sol dans la zone des racines est ordinairement non saturé. L'eau tendra à se déplacer le plus souvent de l'endroit le plus humide vers l'endroit le plus sec. La remontée de l'eau par capillarité à partir d'une nappe en est un exemple. Elle peut être importante pour un sol à texture fine lorsque celle-ci est près de la surface. Par contre, pour les sols à texture grossière, ce phénomène peut être négligé comme apport d'eau pour les plantes.

Lorsqu'une irrigation ou une pluie de courte durée vient saturer l'horizon supérieur d'un sol non saturé en profondeur, il s'établit un profil hydrique qui évolue au cours du temps comme l'illustre la figure 2.2. La quantité d'eau en surplus de la capacité de rétention au champ va d'abord s'infiltrer et humecter le sol plus en profondeur. L'extraction de l'eau par évapotranspiration conduira aux profils subséquents.

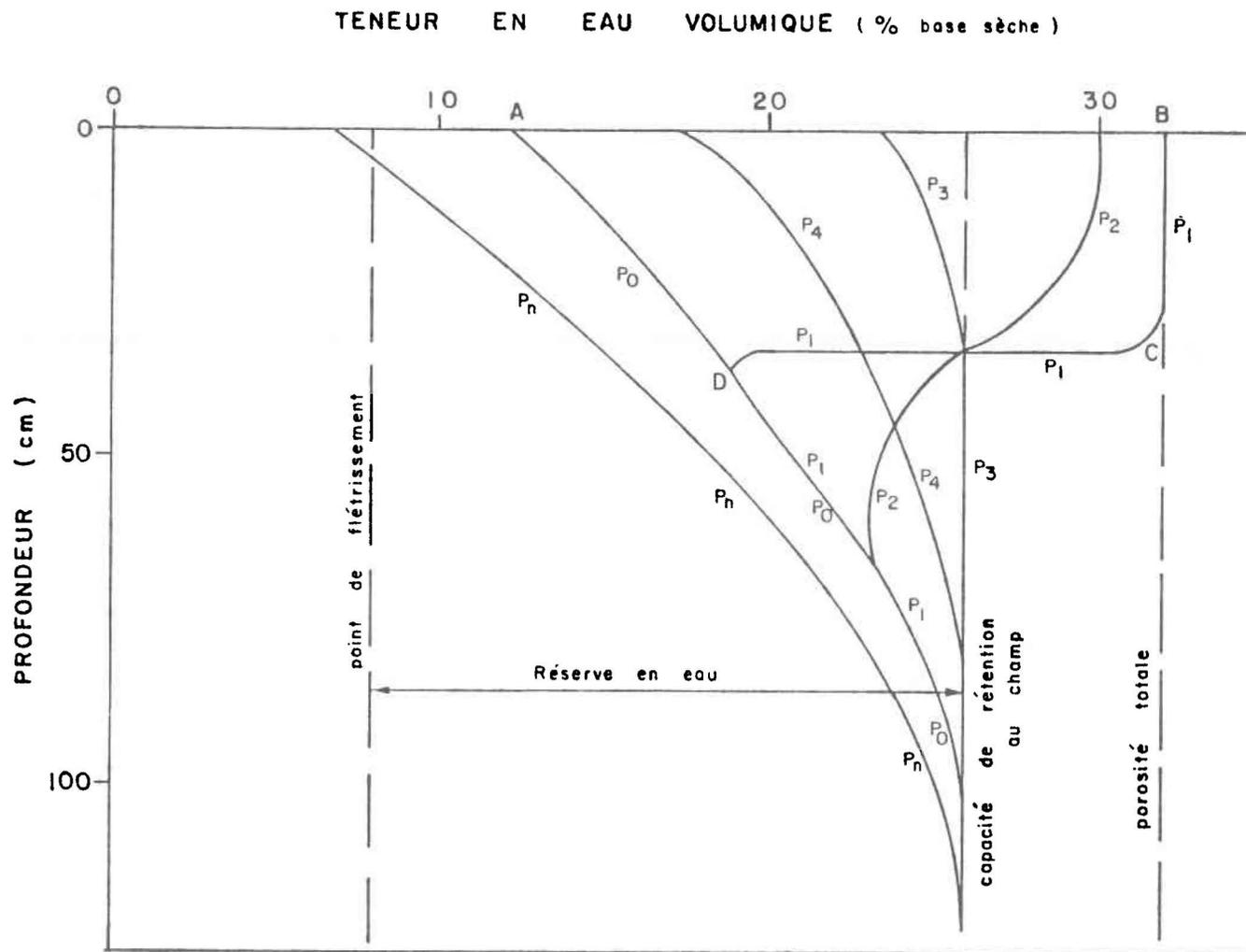


Figure 2.2 Évolution des profils hydriques (P_n) suite à une irrigation au temps t_0 (adapté de Bentz, 1983) .

Pour saturer en surface une épaisseur de sol cultivé non saturé en profondeur, il faut une pluie dont l'intensité est égale ou supérieure au taux d'infiltration du sol considéré. Dans ce cas, une partie de la pluie tombée va ruisseler en surface.

Or, dans la pratique, cette hauteur de pluie ruisselée est difficile à déterminer avec précision parce que le taux d'infiltration varie dans le temps à partir du début d'une pluie comme l'illustrent Skaggs et al. (1980) à la figure 2.3 pour divers types de sols. De plus, l'intervalle de mesure de la pluie pour des applications agricoles est souvent d'une journée et plus rarement d'une heure. La hauteur de pluie ruisselée varie également pour un type de sol donné, avec la pente du terrain, la couverture du sol, le sens de la culture et le type de culture, et aussi avec l'état hydrique du sol au début de la précipitation.

Plusieurs modèles plus ou moins complexes sont proposés dans la littérature pour tenter de représenter l'infiltration d'événements pluvieux. La plupart des modèles physiques comme les équations de Holtan, de Richards et de Philip et le modèle Green-Ampt nécessitent la connaissance de nombreuses caractéristiques des sols difficiles à évaluer et demandent une connaissance des pluies avec un pas de temps inférieur à une heure.

Un modèle plus empirique, celui du SCS (Soil Conservation Service), a été conçu pour prédire l'infiltration de la pluie sur des petits bassins versants en utilisant des données de pluies journalières. Ce modèle prend en compte le type de culture ainsi que le type de sol.

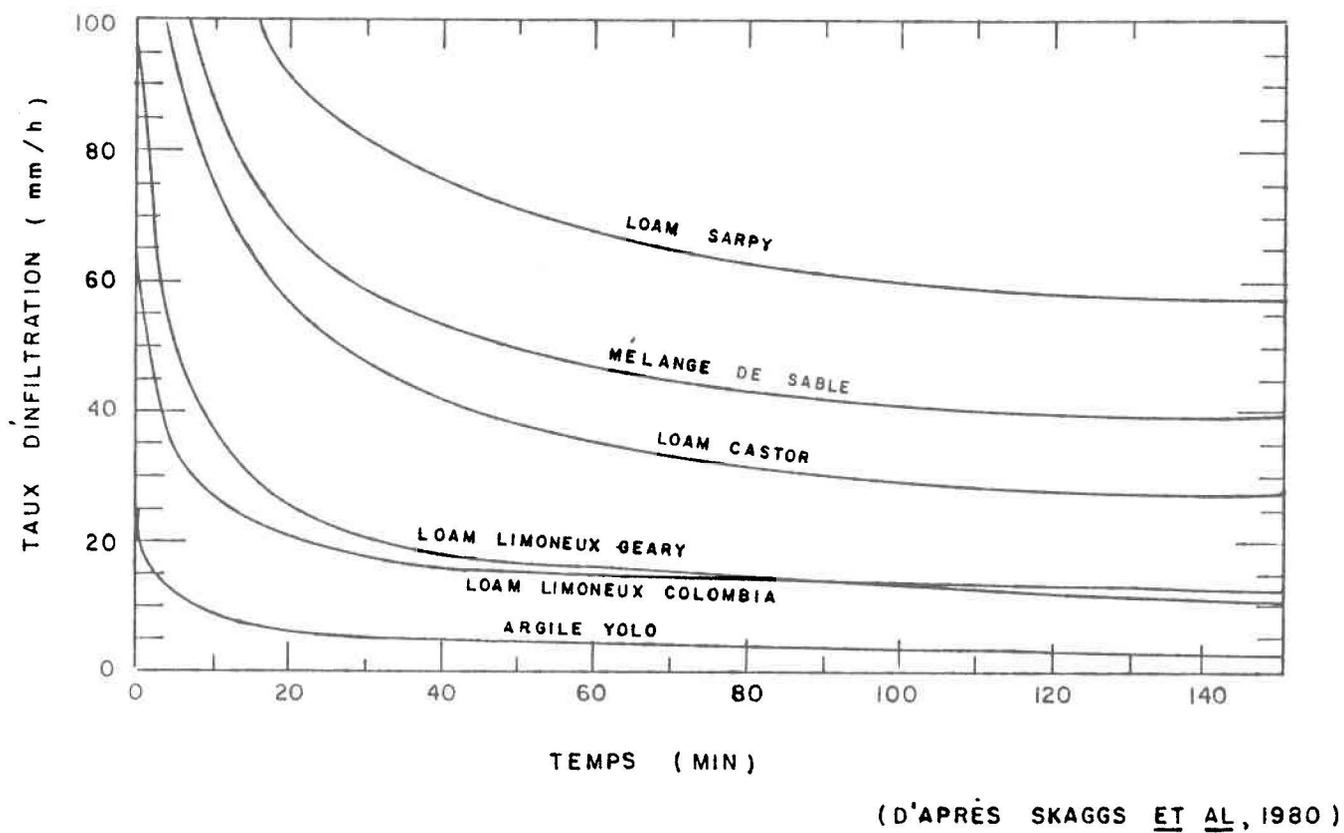


Figure 2.3 Taux d'infiltration prédit par des méthodes numériques en fonction du temps pour différents sols (tiré de Gallichand et al., 1983).

2.2 Besoins en eau des cultures

2.2.1 Profondeurs d'enracinement

L'eau nécessaire au développement des plantes est extraite en grande partie par les racines. Ainsi, la profondeur d'enracinement d'une plante déterminera la profondeur de sol sur laquelle elle pourra s'alimenter.

Comme l'illustrent les figures 2.4 et 2.5, la profondeur d'enracinement et la distribution des racines à différentes profondeurs variera d'une espèce végétale à une autre. On observe que la densité de racines est plus forte près de la surface et décroît avec la profondeur pour toutes les espèces. Lorsque le sol est bien pourvu en eau sur tout le profil, la plante va d'abord extraire l'eau située près de la surface là où la densité des racines est plus forte. Au fur et à mesure que le sol en surface s'assèchera, la plante extraira davantage d'eau en profondeur tel qu'indiqué à la figure 2.6.

Pour une espèce végétale donnée, la profondeur d'enracinement va augmenter du début de la saison de croissance à la maturité, puis demeurera constante pour le reste de la saison. Les profondeurs d'enracinement pour diverses cultures arrivées à maturité sont présentées aux tableaux 2.2 et 2.3. Ces profondeurs sont valables pour des sols profonds et homogènes lorsque les conditions sont favorables à la croissance des plantes. Ces valeurs peuvent être plus faibles si une couche de sol très dense empêche la pénétration des racines. Une forte pluviométrie peut également limiter la profondeur d'enracinement d'une culture, celle-ci n'ayant pas besoin d'aller chercher d'eau dans les couches de sol plus profondes. Borg et Grimes (1986) montrent que l'évolution de la profondeur des racines au cours de la saison pour diverses cultures peut être décrite à l'aide d'une relation empirique (équation 2.3) pour des conditions de croissance idéales. Le tableau

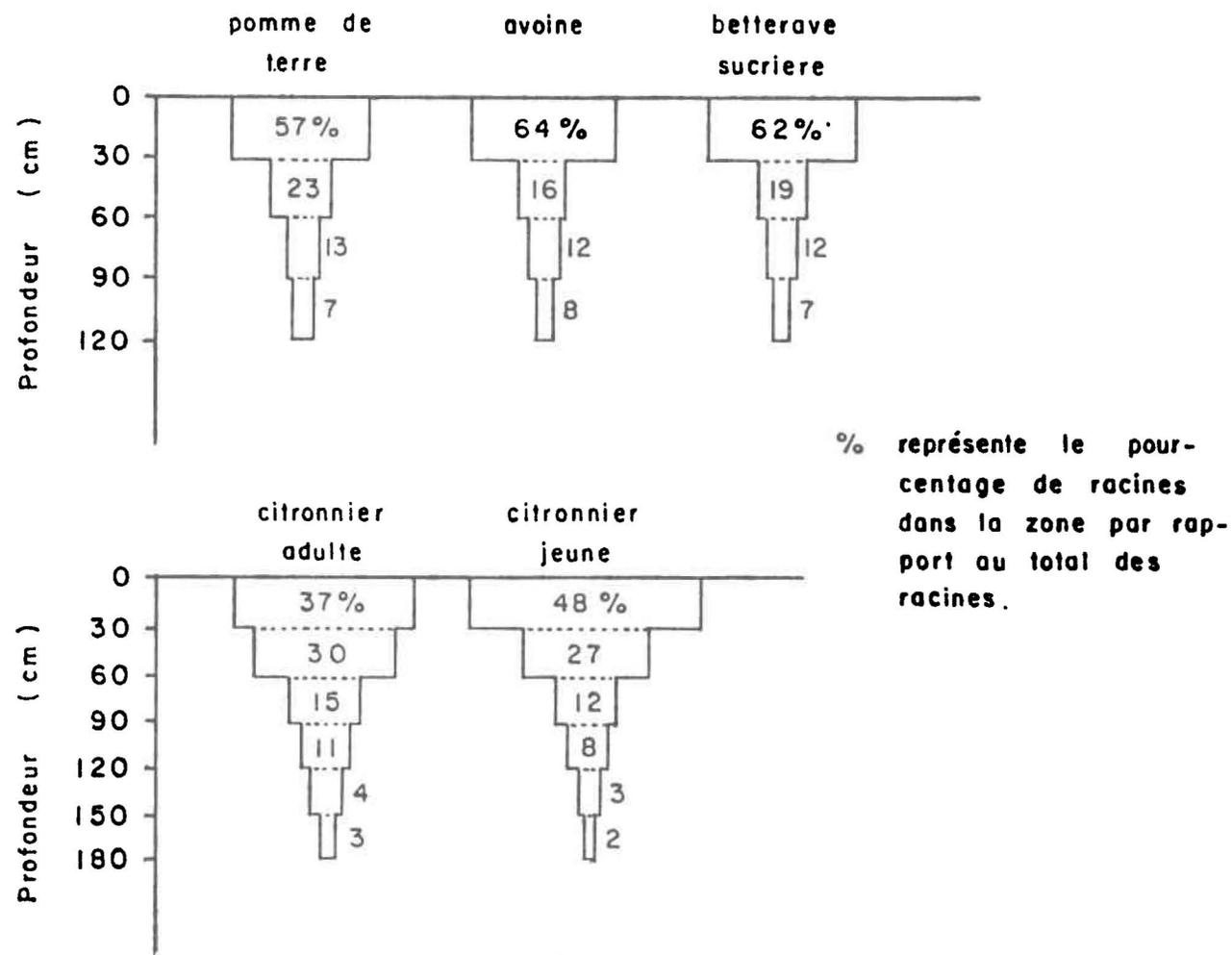


Figure 2.4 Profils radiculaires pour différentes cultures (tiré de Bentz, 1983).

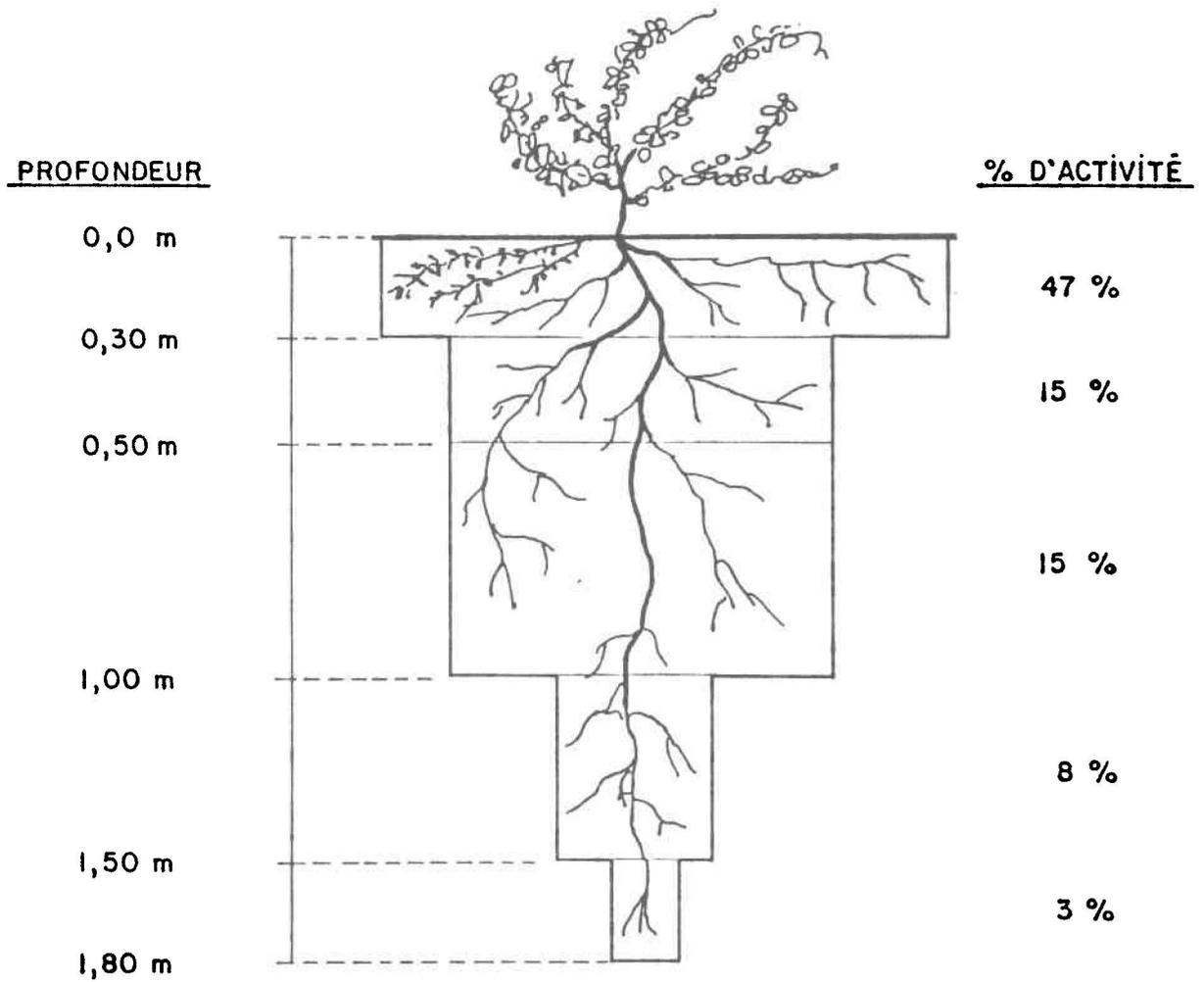
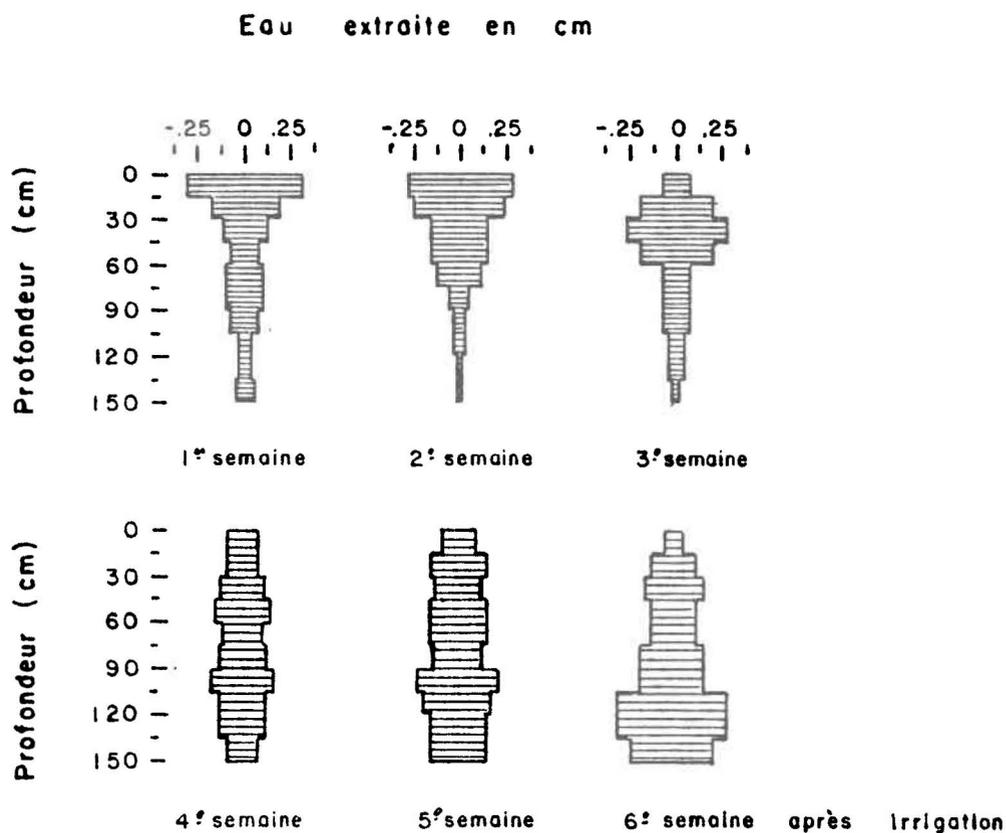


Figure 2.5

Activité des racines de la luzerne
(tiré de Payen, 1982).



(adapté de Taylor et Ashcroft, 1972)

Figure 2.6

Extraction de l'eau en fonction du temps après une irrigation pour une culture de luzerne sur loam limoneux (tiré de Bentz, 1983).

Tableau 2.2 Profondeur d'enracinement effective de diverses cultures arrivées à maturité, cultivées sur sols profonds et homogènes (tiré de Payen, 1982).

Luzerne	90 - 180 cm	Olives	100 - 150 cm
Haricots	50 - 90	Oignons	30 - 75
Crucifères	30 - 60	Herbages	60 - 100
Cucurbitacées	75 - 125	Poivrons	40 - 100
Vergers de		Fèves de soja	60 - 125
caducifoliés	100 - 200	<u>Fraises</u>	20 - 30
Aubergines	75 - 120	Betterave sucrière	60 - 125
<u>Pommes de terre</u>	30 - 75	Canne à sucre	75 - 180
Céréales	60 - 150	Tomates	40 - 100
Raisins	75 - 180	Tabac	45 - 90
Légumineuses	50 - 125	Légumes	30 - 60
Maïs	75 - 160		

TABLEAU 2.3 Données générales sur la profondeur d'enracinement de certaines cultures à maturité. La fraction de la réserve utile (p.) et la réserve facilement utilisable (p. Sa) pour différents types de sol (en mm/m de sol), quand l'évapotranspiration est environ 5 - 6 mm/jour (tiré de Gallichand et al., 1983).

Culture	Profondeur d'enracinement (D) m	Fraction (p) de la réserve utile facilement utilisable ^{1/}	Réserve facilement utilisable (p. Sa) mm/m ^{1/}		
			Fine	Moyenne	Grossière
Ananas	0,3 - 0,6	0,5	100	65	30
Arachides	0,5 - 1,0	0,4	80	55	25
Arbres fruitiers	1,0 - 2,0	0,5	100	70	30
Bananes	0,5 - 0,9	0,35	70	50	20
Betteraves	0,6 - 1,0	0,5	100	70	35
sucrières	0,7 - 1,2	0,5	100	70	30
Blé	1,0 - 1,5	0,55	105	70	35
(maturation)	1,0 - 1,5	0,9	180	130	55
Cacao		0,2	40	30	15
Carottes	0,5 - 1,0	0,35	70	50	20
Céleri	0,3 - 0,5	0,2	40	25	10
Citrons	1,2 - 1,5	0,5	100	70	30
Choux	0,4 - 0,5	0,45	90	65	30
Concombres	0,7 - 1,2	0,5	100	70	30
Coton	1,0 - 1,7	0,65	130	90	40
Dattes	1,5 - 2,5	0,5	100	70	30
Fraises	0,2 - 0,3	0,15	30	20	10
Epinards	0,3 - 0,5	0,2	40	30	15
Grains (petits) ^{2/}	0,9 - 1,5	0,6	120	80	40
Grains (hiver) ^{2/}	1,5 - 2,0	0,6	120	80	40
Haricots	0,5 - 0,7	0,45	90	65	30
Laitue	0,3 - 0,5	0,3	60	40	20
Légumes	0,3 - 0,6	0,2	40	30	15
Lin ^{2/}	1,0 - 1,5	0,5	100	70	30
Luzerne	1,0 - 2,0	0,55	110	75	35
Maïs ^{2/}	1,0 - 1,7	0,6	120	80	40
Ensilage	1,0 - 1,7	0,5	100	70	30
Melons	1,0 - 1,5	0,35	70	50	25
Oignons	0,3 - 0,5	0,25	50	35	15
Olives	1,2 - 1,7	0,65	130	95	45
Orge ^{2/}	1,0 - 1,5	0,55	110	75	35
Pâturages	0,5 - 1,5	0,5	100	70	30
Palmiers	0,7 - 1,1	0,65	130	90	40
Pois	0,6 - 1,0	0,35	70	50	25
Poivre	0,5 - 1,0	0,25	50	35	15
Patates	0,4 - 0,6	0,25	50	30	15
Patates sucrées	1,0 - 1,5	0,65	130	90	40
Raisin	1,0 - 2,0	0,35	70	50	20
Sisal	0,5 - 1,0	0,8	155	110	50
Soya	0,6 - 1,3	0,5	100	75	35
Sorgho ^{2/}	1,0 - 2,0	0,55	110	75	35
Tabac (hâtif)	0,5 - 1,0	0,35	70	50	25
Tabac (tardif)	0,5 - 1,0	0,65	130	90	40
Tomates	0,7 - 1,5	0,4	180	60	25
Tournesol ^{2/}	0,8 - 1,5	0,45	90	60	30
Trèfle	0,6 - 0,9	0,35	70	50	20
Réserve utile totale (Sa)			200	140	60

(D'après Doorembos et Pruitt, 1977)

^{1/} Quand l'évapotranspiration (ET) est inférieure ou égale à 3 mm/jour, augmenter les valeurs d'environ 30%; quand (ET) est supérieure ou égale à 8 mm/jour, réduire les valeurs d'environ 30%, supposant des conditions non salines ($EC_e < 2$ mmho/cm).

^{2/} Des valeurs plus grandes que celles montrées doivent être appliquées durant la maturation.

$$PR_j = PR_m \left[0,5 + 0,5 \sin \left(3,03 \frac{JAP}{JAM} - 1,47 \right) \right] \quad (2.3)$$

où

PR_j : profondeur d'enracinement "j" jours après la plantation

PR_m : profondeur d'enracinement maximum

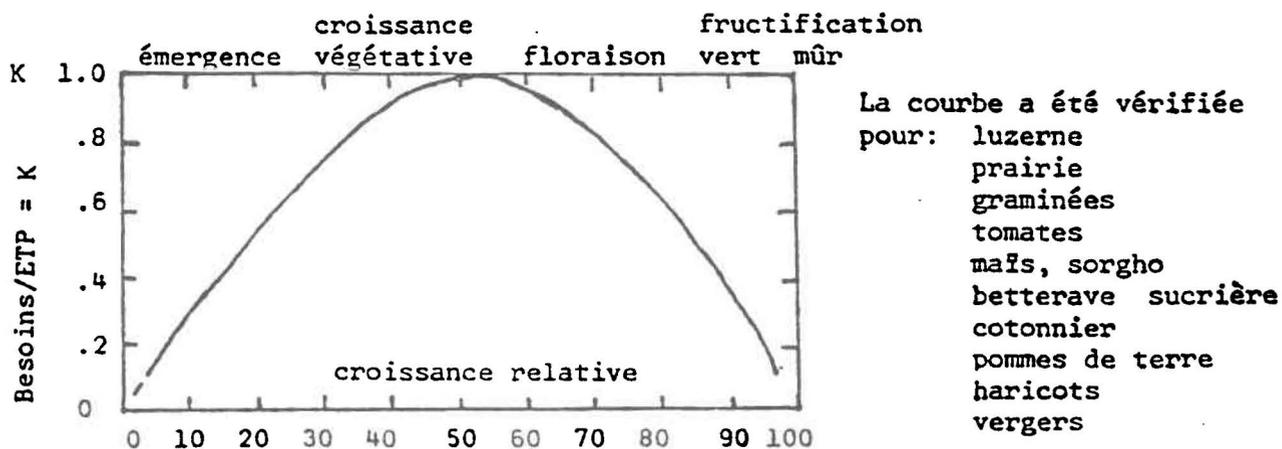
JAP : nombre de jours après la plantation

JAM : nombre de jours de la plantation à la maturité.

2.3 montre également que la facilité avec laquelle une plante peut extraire l'eau du sol sur la profondeur de ses racines varie sensiblement d'une culture à l'autre.

2.2.2 Périodes de croissance critiques

Les besoins en eau des cultures varient au cours de leurs périodes de croissance. Pour plusieurs espèces dont les pommes de terre, des chercheurs ont observés une augmentation progressive de l'évapotranspiration à partir du moment du semis jusqu'à la maturité, puis une diminution sur les stades physiologiques ultérieurs tel qu'illustré à la figure 2.7. Notons que l'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à la demande climatique en eau. De nombreuses formules (Penman, Turc, Baier et Robertson, etc.) sont préposées dans la littérature pour son évaluation à différents pas de temps (Voir Penel, 1984).



(adapté d'Israelsen , 1962)

Figure 2.7 Courbe généralisée de la variation de K_{CO} en fonction de l'époque physiologique des plantes (tiré de Bentz, 1983).

Pour différentes cultures, on peut également identifier des périodes critiques au point de vue de la demande en eau (tableau 2.4). Ces périodes correspondent aux stades physiologiques où les plantes sont plus sensibles aux déficits hydriques et non aux époques où leurs besoins en eau sont les plus élevés. Pour beaucoup d'espèces, le stade de la floraison et de la formation des fruits est critique. Pour la culture des pommes de terre, il est important de maintenir un contenu en eau du sol uniforme et assez élevé au cours du développement des tubercules tout en évitant les surplus d'eau à cause de la susceptibilité des tubercules à l'attaque des microorganismes (Irrigation of agricultural lands, 1967).

Tableau 2.4 Périodes critiques pour différentes cultures au point de vue de la demande d'eau (tiré de Payen, 1982).

Luzerne	juste après la coupe pour la production de fourrage sec, et au début de la floraison pour la production de semences
Abricotier	période de la floraison et du développement des bourgeons
Orge	début de la montaison > stade pâteux > début du tallage ou de la phase de maturation
Haricot	floraison et période de formation des cosses > un peu plus tôt > période de maturation. Cependant, période de maturation plus tôt si la culture n'a pas manqué d'eau auparavant
Broccoli	pendant la pomaison et le renflement des pommes
Chou	pendant la pomaison et le renflement des pommes
Graines de ricin	demande un sol relativement très humide pendant toute la période de croissance
Chou-fleur	demande des arrosages fréquents depuis la plantation jusqu'à la récolte
Cerisier	période de croissance rapide du fruit avant la maturation
Agrumes	floraison et nouaison; on peut provoquer une forte floraison en retenant l'irrigation juste avant la floraison (citron); on peut empêcher la "chute de juin" des fruits plus faibles par une forte teneur en eau du sol
Coton	floraison et moment de la formation des capsules > début de la croissance > après la formation des capsules
Arachides	floraison et développement des semences > entre la germination et la floraison et fin de campagne végétative
Laitue	demande un sol humide, notamment avant la récolte
Maïs	période de pollinisation, depuis la formation des panicules jusqu'au stade des grains laitoux > avant la formation des panicules > période de remplissage des grains; la période de pollinisation est très critique, s'il n'y a pas eu manque d'eau auparavant
Avoine	début de l'apparition des épis, éventuellement jusqu'à l'épiaison
Olivier	juste avant la floraison et pendant le gonflement des fruits
Pêcher	période de croissance rapide du fruit avant maturité
Pois	au début de la floraison et au moment du gonflement des cosses
Pomme de terre	forte teneur en eau du sol; après la tubérisation, de la floraison à la récolte
Radis	pendant la période de grossissement de la racine
Tournesol	éventuellement au moment du semis et de la floraison - stade de développement des semences
Petites céréales	de la montaison à l'épiaison
Sorgho	enracinement secondaire et tallage jusqu'à la montaison > épiaison, floraison et formation du grain > remplissage du grain
Fèves de soja	floraison et nouaison, et éventuellement période de croissance végétative maximum
Fraisier	développement du fruit jusqu'à maturation
Betterave sucrière	trois à quatre semaines après la levée

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DE DIFFÉRENTS MODÈLES DE GESTION DE L'IRRIGATION

3. PRÉSENTATION DE DIFFÉRENTS MODÈLES DE GESTION DE L'IRRIGATION

3.1 Introduction

Une gestion optimale de l'irrigation requiert des méthodes permettant d'évaluer la disponibilité de l'eau pour la plante suffisamment de temps à l'avance pour permettre une application d'eau adéquate au bon moment. Des méthodes imprécises ou ayant trop peu de pouvoir prédictif pour la détection des déficits hydriques peuvent conduire à des baisses de rendement des cultures dû à un manque d'eau ou à un gaspillage d'eau et d'énergie dans le cas de décision trop sécuritaires (Hatfield, 1981).

Les méthodes présentées dans la littérature peuvent être regroupées en trois catégories soit: 1° les méthodes basées sur la mesure (directe ou indirecte) du degré d'humidité du sol, 2° les méthodes basées sur l'état hydrique des plantes et 3° les méthodes basées sur un bilan hydrique du sol et sur des données climatiques. Divers auteurs comparent dans "Irrigation Scheduling for Water and Energy Conservation in the 80's" (1981) les avantages et désavantages des différentes méthodes.

Les méthodes basées sur la mesure du degré d'humidité du sol (voir section C.1) offrent l'avantage d'intégrer tous les facteurs influençant l'état hydrique du sol (type de sol, culture, variété, stade de croissance, région, maladies et pestes, pluie infiltrée, drainage, etc.) en plus de déterminer avec une bonne précision la quantité d'eau à appliquer (English et al., 1981). Par contre, ces méthodes sont coûteuses et demandent beaucoup de temps à cause du nombre et de la fréquence des mesures requises pour représenter adéquatement l'ensemble d'un champ. Elles présentent également des problèmes de calibration (sauf la méthode thermogravimétrique) et offrent peu de pouvoir prédictif. On aura donc avantage à les utiliser pour calibrer d'autres méthodes.

Les méthodes basées sur l'état hydrique des plantes permettent de déterminer le moment où les plantes ont besoins d'irrigation mais offrent un faible pouvoir prédictif et ne renseignent pas sur la hauteur d'eau à appliquer. Une de ces méthodes utilisant la thermométrie infrarouge semble la plus prometteuse à cause de la facilité de mesurer rapidement la température du feuillage et de son adaptabilité à la télédétection qui permet de couvrir de grandes superficies en peu de temps. Toutefois, des problèmes de calibration doivent être surmontés. Divers modèles physiologiques simulent le transport de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère mais sont trop complexes pour être utilisés comme outil de gestion de l'irrigation.

Les méthodes basées sur un bilan hydrique de l'eau du sol et sur des données climatiques comprennent les bacs d'évaporation et les modèles de bilan hydrique sur ordinateurs. Les bacs d'évaporation sont bien acceptés par les agriculteurs à cause de leur simplicité d'utilisation mais sont peu flexibles (calibration pour une seule profondeur racinaire, absence de pouvoir prédictif). Les modèles de gestion de l'irrigation sur ordinateur par bilan hydrique de l'eau dans le sol sont en mesure d'indiquer avec fiabilité les moments propices ainsi que les hauteurs d'eau à appliquer pour une culture donnée au cours d'une saison de croissance complète (Harrington et al., 1981). Ils possèdent de plus un bon pouvoir prédictif. Leur fonctionnement requiert des données climatiques facilement mesurables ainsi que certaines propriétés des sols supportant les cultures. Ils doivent par contre être calibrés pour chaque région et chaque culture (English et al., 1981). On recherchera des modèles simples d'utilisation pour favoriser leur acceptation par les agriculteurs (Shearer et al., 1981). La suite de ce chapitre présentera divers modèles de gestion de l'irrigation sur ordinateurs.

3.2 Présentation de quelques modèles informatisés de gestion de l'irrigation rencontrés dans la littérature

De nombreux modèles permettant de gérer l'irrigation ou d'assurer le suivi du contenu en eau du sol à partir d'un bilan journalier ont été développés au cours des dernières années. Nous en présenterons trois pouvant trouver une application au Québec. Le premier est présenté par Dyer et Mack (1983) d'Agriculture Canada, le second par Duke et al. (1985) du Département d'Agriculture des États-Unis et le troisième par Penel (1984) du Service du génie du MAPAQ. La structure du dernier modèle sera étudiée de façon plus détaillée puisqu'il sera retenu pour les simulations subséquentes.

La formulation générale du bilan en eau est semblable pour tous les modèles et peut s'exprimer comme suit:

$$H_i = H_{i-1} + ETR_i + Dr_i - PTEinf_i - IRRinf_i - Rc_i \quad (3.1)$$

La quantité H représente ici le déficit en eau du sol exprimé en millimètres ou la hauteur d'eau nécessaire pour ramener le sol à sa teneur en eau à la capacité au champ. D'un modèle à l'autre, le pas de temps (i) du bilan en eau ainsi que le nombre de couches de sol et leur épaisseur peuvent varier. Par contre, les pertes d'eau sont occasionnées dans tous les cas par l'évaporation de l'eau du sol, par son extraction par les racines des plantes suite à la transpiration (ETR), et par le drainage de l'eau gravitaire (Dr). Les apports d'eau proviennent de la pluie infiltrée (PTEinf), de l'irrigation infiltrée (IRRinf) ainsi que de la remontée capillaire (Rc).

3.2.1 Le modèle d'Agriculture Canada

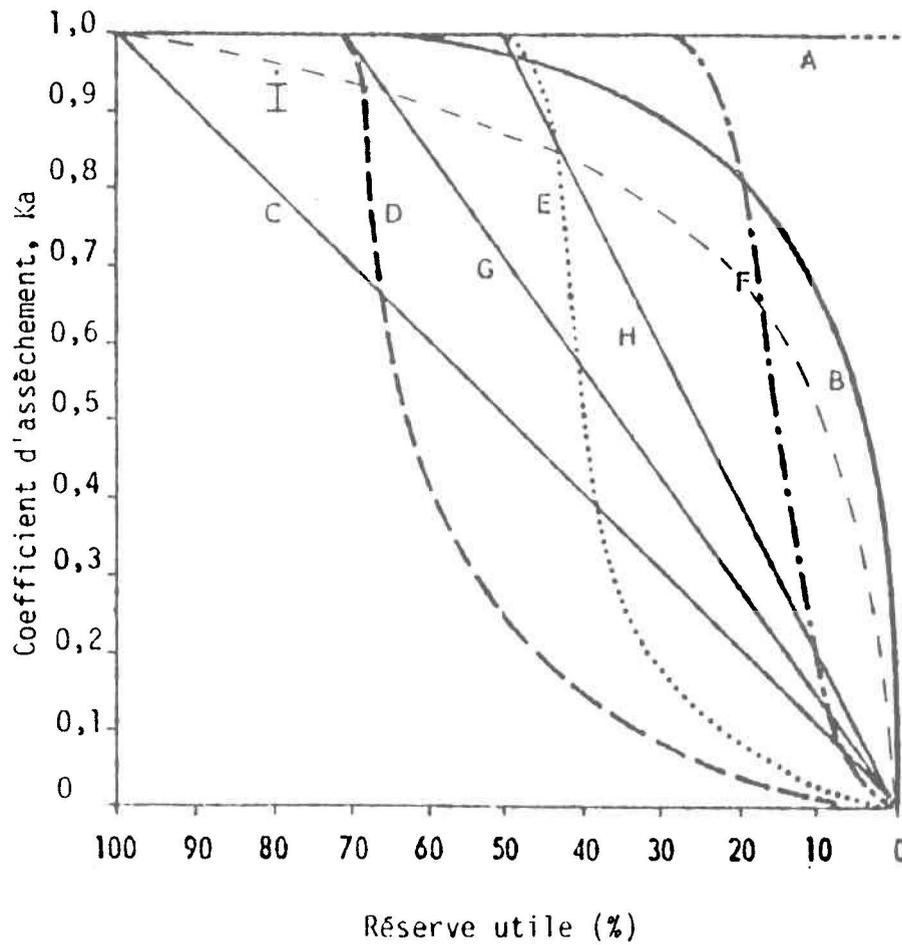
Le modèle présenté par Dyer et Mack (1983) est une version améliorée du modèle "budget versatile" développé par Baier et al. (1979). Les deux versions offrent la particularité de permettre le calcul du bilan en eau journalier de six zones de sol de façon indépendante. La remontée capillaire n'est pas considérée.

L'évapotranspiration réelle (ETR) est calculée à partir de la relation 3.2 (Baier et Robertson, 1966) qui prend en compte l'évapotranspiration potentielle (ETP), la teneur en eau (S_j) et les caractéristiques de rétention en eau du sol (C_j , Z_j) pour chaque zone (j) ainsi que les caractéristiques d'extraction d'eau des racines (K_{ij}) pour diverses cultures et différentes périodes (i) et zones (j).

$$ETR = \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{S_j}{C_j} Z_j ETP \quad (3.2)$$

Le modèle ne comporte pas de routine pour le calcul d'ETP, celle-ci pouvant être calculée par une méthode reconnue. Le coefficient K_{ij} peut être ajusté pour une année de sécheresse où les plantes vont chercher l'eau dans les couches de sol plus profondes. Le coefficient Z_j sert à pondérer la diminution de consommation de l'eau par les plantes à mesure que la réserve en eau du sol en bas de la teneur en eau à la capacité au champ ($C_j - S_j$) s'épuise. La figure 3.1 illustre l'allure de différentes courbes d'assèchement trouvées dans la littérature. Selon Dyer et Mack (1983), l'allure des courbes D ou G s'applique aux sols contenant un fort pourcentage d'argile, les courbes E et H peuvent représenter les sols à texture intermédiaire alors que la courbe F convient davantage aux sols à texture grossière.

La modification majeure apportée par Dyer et Mack (1983) au modèle de Baier et al. (1979) concerne le calcul de la pluie infiltrée et du drainage. Le modèle original utilisait une relation simplifiée entre le degré d'humidité du sol dans la zone supérieure et les précipitations totales journalières (Linsley et al., 1949) pour calculer la pluie ruisselée lorsque la pluie totale excède 25,4 mm. La dernière version assume que chaque zone de sol peut être amenée à sa teneur en eau à la saturation et que le drainage de l'eau gravitaire peut s'effectuer avec un délai d'une journée ou plus. De plus, l'infiltration de l'eau est contrôlée par les coefficients de drainage de chaque zone de sol.



(D'après Baier et al., 1979)

Figure 3.1 Quelques courbes d'assèchement trouvées dans la littérature (courbes A à H) et courbe d'assèchement retenue dans la présente étude (courbe I) (tiré de Penel, 1984).

3.2.2 Le modèle de l'USDA

Le modèle présenté par Duke et al. (1985) établit un bilan simplifié du contenu en eau du sol en considérant au maximum trois zones homogènes. L'évapotranspiration potentielle est calculée par la méthode de Penman (1963) en considérant une culture de luzerne comme référence. Le mode de calcul de l'évapotranspiration réelle est semblable au modèle précédent à l'exception qu'il ajoute un terme (E_w) tenant compte de l'évapotranspiration supplémentaire lorsque la surface du sol est humidifiée suite à une pluie. Ce terme décrit par l'expression 3.3 est plus important lorsque le couvert végétal est peu développé.

$$E_w = K_w (0,9 - K_c) ETP \quad (3.3)$$

Où: $K_c = K_{co} \quad K_a$

$K_w = 0,8 ; 0,5$ ou $0,3$ selon qu'une pluie ou une irrigation s'est produite il y a un, deux ou trois jours et

$K_w = 0,8 ; 0 ; 0$, un, deux et trois jours après une pluie pour les sols ayant une réserve en eau utile inférieure à 100 mm/m

K_{co} : coefficient cultural de base

K_a : coefficient d'assèchement

Le coefficient cultural de base est calculé par un polynôme du troisième degré de la forme:

$$K_{co} = Ar^3 + Br^2 + Cr + D \quad (3.4)$$

où les constantes A, B, C et D sont déterminées de façon empirique pour chaque culture et selon que la culture a atteint ou non la couverture totale du sol. Le coefficient d'assèchement est calculé à l'aide de la relation suivante:

$$K_a = \frac{\ln(1 + 100 \text{ RU})}{\ln(101)} \quad (3.5)$$

où RU représente le rapport entre l'eau présente dans le sol et la réserve en eau utile maximum du sol. Finalement, le modèle assume que toute l'eau de pluie et d'irrigation non drainée est utilisée par les plantes.

3.2.3 Le modèle du MAPAQ (Service du génie)

Le modèle présenté par Penel (1984) calcule un bilan journalier du déficit en eau du sol dans la zone explorée par les racines pour une culture donnée.

Le bilan prend la forme de la relation 3.1 à l'exception qu'il assume que la remontée capillaire est négligeable, qu'il n'y a pas de mouvement d'eau entre les différentes zones de sol lorsqu'on est en bas de la teneur en eau à la capacité au champ, et que l'eau excédant cette teneur en eau caractéristique est drainée instantanément. L'évapotranspiration réelle est également négligée lorsque la teneur en eau du sol dans la zone des racines devient inférieure au point de flétrissement permanent de la plante.

Trois horizons de sol ayant des caractéristiques de rétention en eau différentes peuvent être considérés, mais seule une valeur globale de déficit en eau est calculée en considérant la profondeur de racines (PR_j) présentes dans chaque zone j. On considère que les racines des plants de pommes de terre croissent de façon linéaire entre la date du début d'enracinement et la date de couverture totale du sol par le feuillage alors qu'une profondeur constante leur est attribuée par la suite. Pour les fraises, la profondeur d'enracinement (PR_j) est assumée constante pour toute la saison.

Les termes du bilan les plus importants et en même temps les plus difficiles à évaluer sont l'évapotranspiration réelle (ETR_i) et la hauteur de pluie infiltrée (PTE inf). Le ruissellement suite à l'irrigation est négligé en assumant qu'une bonne régie est employée.

Calcul de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle journalière est calculée à l'aide de la formule de Penman qui peut être représentée comme suit (Doorembos et Pruitt, 1977):

$$\lambda \text{ ETP} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(U) (e_s - e) \quad (3.7)$$

- où
- ETP : évapotranspiration potentielle (mm/j)
 - λ : chaleur latente de vaporisation (MJ/kg)
 - Δ : pente de la courbe de pression de vapeur saturante (mb/°C)
 - γ : constante psychrométrique (mb/°C)
 - T_{moy} : température moyenne journalière (°C) = (T_{max} + T_{min})/2
 - R_n : bilan net d'énergie de rayonnement (MJ/m² - j)
 - G : flux de chaleur du sol (MJ/m² - j)
 - f(U) : fonction de vitesse de vent
 - (e_s - e) : différence entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur d'eau réelle dans l'air à la température T_{moy} (mb).

Avec $\lambda = 2,502 - (2,386 \times 10^{-3} \text{ T}_{\text{moy}})$

$$\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} = 1 - \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \approx 0,605428 - 0,0172768 \text{ T}_{\text{moy}} - 0,0001469 \text{ T}_{\text{moy}}^2 \quad (3.8)$$

(en négligeant l'influence de la pression atmosphérique)

Les composantes du terme radiatif de la formule de Penman seront calculées comme suit:

$$G = -0,377 \left(T_{\text{moy}} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 T_{\text{moy } -i} \right) \quad (3.9)$$

$R_n = R_n$ (ondes courtes) + R_n (ondes longues)

$$R_n = (1 - \alpha) R_s - \sigma (T_{\text{moy}} + 273,2)^4 \left[(1 - a'') - b'' \sqrt{e} \left(C \frac{R_s + d}{R_{so}} \right) \right] \quad (3.10)$$

$$R_s = \left(a + b \frac{H}{H_1} \right) RA \quad (3.11a)$$

- où
- R_s : flux énergétique perçu à la surface du sol ($\text{MJ/m}^2 - \text{j}$)
 - RA : flux énergétique du rayonnement au sommet de l'atmosphère ($\text{MJ/m}^2 - \text{j}$)
 - H/H_1 : rapport de la durée réelle d'ensoleillement sur la durée d'ensoleillement théorique maximale
 - α : albédo
 - σ : constante de Stefan - Boltzmann ($\text{MJ/m}^2 - \text{j} - \text{k}^4$)
 $\sigma = 4,8986 \times 10^{-9} \text{ MJ/m}^2 - \text{j} - \text{k}^4$
 - R_{so} : flux énergétique perçu à la surface du sol par un jour serein

Les valeurs des coefficients a et b de l'expression 3.11a utilisés dans le modèle sont $a = 0,18$ et $b = 0,62$ et proviennent de Remenieras (1965). Penel (1984) utilise également un albédo constant ($\alpha = 0,23$) pour la modélisation au cours d'une saison de croissance.

Les termes RA , H_1 et R_{so} (à un moindre degré) peuvent être bien représentés en fonction de la latitude et de la date. Le terme RA est calculé à l'aide de la relation 3.11b présentée par Haltiner et Martin (1957) alors que R_{so} est dérivé de la relation 3.12 donnée par Harrington et al., (1981) pour les Etats-Unis. Penel (1984) mentionne que la relation 3.11b permet de calculer RA avec une erreur relative

$$RA = \frac{S}{\pi} \frac{r_m^2}{r^2} \cos \varnothing \cos \delta (\sin H_2 - H_2 \cos H_2) \quad (3.11b)$$

$$R_{SO} = A + B \cos (C (\text{Jour Julien} - 170) \frac{2\pi}{366}) \quad (3.12)$$

- Où:
- S : constante solaire (118 MJ/m² - j)
 - r : distance du soleil à la terre
 - r_m : distance moyenne du soleil à la terre
 - ∅ : latitude
 - δ : déclinaison du soleil
 - H₂ : angle horaire entre le coucher du soleil et le midi solaire
- $$A = 31,9 - 0,247 \varnothing$$
- $$B = 1,83 - 0,237 \varnothing$$
- $$C = 0,74 + 0,00472 \varnothing$$

inférieure à 3% pour la période du premier mai au 31 octobre sans citer la source de comparaison. Le terme H₁ est calculé à l'aide de la relation 3.13 donnée par Jacques (1984).

$$H_1 = 7,6395 H_2 \quad (3.13)$$

Les coefficients a", b", c et d ont été ajustés à partir des 573 données de rayonnement net (R_n) journalières obtenues pour l'aéroport de Québec de 1979 à 1983 et couvrant les mois de mai à septembre.

Le jeu de paramètres suivant a été retenu par Penel (1984) en fixant c + d = 1 et en cherchant à obtenir un biais minimum et une erreur minimum entre les valeurs observées et calculées; 1 - a" = 0,37; b" = 0,385; c = 1,201; d = -0,201.

Les composantes du terme advectif de la formule de Penman sont calculées comme suit:

$$e_s = e_s (T_{\max} + T_{\min})/2$$

$$e = e_s (HR_{\max} + HR_{\min})/2$$

$$f(U) = a (U_2)^b \quad (3.14)$$

Le terme U_2 représente la vitesse du vent en km/j mesuré à 2 mètres du sol. Lorsque la vitesse du vent est mesurée à une hauteur Z (mètres) différente, l'expression suivante est utilisée pour la ramener à deux mètres;

$$U_2 = U_z \left(\frac{2}{Z} \right)^{0,2} \quad (3.15)$$

Les coefficients a et b de l'expression 3.14 ont été calculés à partir de valeurs d'ETP calculées à l'aide de la formule 8 de Baier et Robertson (1965) pour 796 données journalières de température, rayonnement, humidité de l'air et vitesse de vent à l'aéroport de Québec. Parmi les données étudiées, 125 ont été rejetées parce qu'elles conduisaient à des valeurs de $f(U_2)$ négatives. Les coefficients obtenus par Penel (1984) pour Québec sont $a = 0,09$ et $b = 0,5$.

Le mode de calcul de l'évapotranspiration réelle utilisé par Penel (1984) est similaire à celui du modèle de l'USDA (équations 3.3 à 3.5) et peut s'écrire comme suit:

$$ETR = (K_{co} \quad K_a \quad ETP) + E_w \quad (3.16)$$

Les valeurs de K_a et E_w ont été dérivées en Idaho tandis que les coefficients A , B , C , D servant à déterminer K_{co} (équation 3.4) ont été calculés pour la pomme de terre à partir des données de Burstall et Harris (1982) en considérant l'évapotranspiration d'un gazon comme référence (voir Penel, 1984). Pour la fraise, une valeur constante de K_{co} a été retenue pour toute la saison de croissance.

Calcul de la hauteur de pluie infiltrée

Les données de pluie tombées sur chaque parcelle sont mesurées à une fréquence journalière et l'intensité ainsi que la durée de chaque événement pluvieux sont inconnues. Penel (1984) a donc retenu une méthode permettant d'évaluer la pluie infiltrée à partir des données disponibles, soit la méthode des numéros de courbes de ruissellement (RCN) conçue par le "Soil Conservation Service" (SCS) des États-Unis pour évaluer la hauteur d'eau ruissellée sur les petits bassins versants pour une hauteur de pluie donnée. On observe à la figure 3.2 la relation entre la hauteur de pluie tombée et la hauteur de pluie ruissellée pour différentes courbes de ruissellement. Le tableau 3.1 donne les numéros de courbe correspondant à différents types de sols et à différentes pratiques culturales. Penel (1984) ne prend pas en compte l'influence du degré d'humidité du sol avant la pluie sur le ruissellement, le modèle considérant une valeur d'abstraction initiale (I_a) constante au cours d'une saison de culture pour un champ donné. La hauteur de pluie ruissellée Q_r est donc calculée à l'aide de la relation suivante:

$$Q_r = \frac{(PTE - I_a)^2}{PTE + 4 I_a} ; \quad PTE = Q_r + PTE_{inf} \quad (3.17)$$

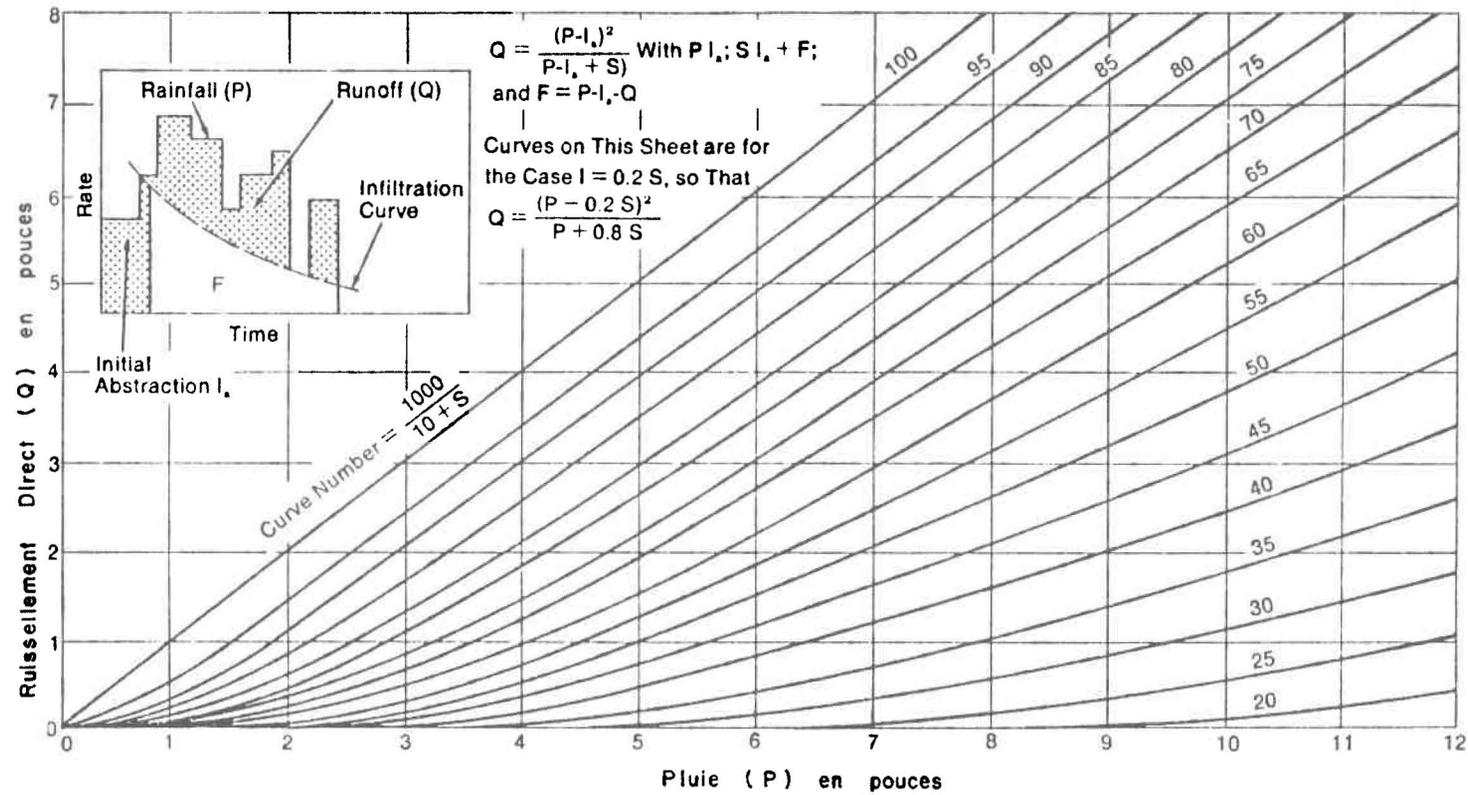
pour $PTE > I_a$

où PTE, Q_r et I_a sont exprimés en millimètre.

Prévision

Le modèle développé par Penel (1984) permet de calculer le nombre de jours N séparant la date de la prochaine irrigation et le dernier jour t_0 d'actualisation du déficit $H(t_0)$ à l'aide de la relation suivante:

$$N = \frac{RFU(t_0) - H(t_0)}{Kco(t_0) \cdot ET_{Pest}(t_0)} \quad (3.18a)$$



(extrait de "Soil and water conservation engineering"
1966)

Figure 3.2

Relation entre pluviométrie (en pouces) et ruisselle-
ment (en pouces) pour différents numéros de courbes
de ruissellement (RCN). Cet abaque correspond au cas
 $I_a = 0,2 S$ (tiré de Penel, 1984).

Tableau 3.1 Numéro de courbe pour différents types de sol et différentes pratiques culturales (tiré de Moïffet, 1979) .

	Pente	Condition hydrologique	Classe de sol			
			A	B	C	D
Culture intensive	< 3%	pauvre	63	74	80	82
		bonne	60	70	78	81
	3-8%	pauvre	65	76	84	88
		bonne	63	75	83	87
	> 8%	pauvre	72	81	88	91
		bonne	67	78	85	89
Culture extensive	< 3%	pauvre	39	61	74	80
		bonne	25	40	70	78
	3-8%	pauvre	49	69	79	84
		bonne	39	61	74	80
	> 8%	pauvre	68	79	86	89
		bonne	49	69	79	84
Boisé	< 3%	pauvre	25	55	70	77
		bonne	22	53	65	74
	3-8%	pauvre	41	63	75	81
		bonne	25	55	70	77
	> 8%	pauvre	47	68	80	84
		bonne	41	63	75	81
Résidentielle, commerciale dense			73	83	88	90
peu dense			59	74	82	86

A- Gravier et sables grossiers

B- Sables moyens et fins

C- Sables fins mal drainés, sols limoneux et argiles perméables

D- Argiles lourdes et sols minces

$$\text{avec } \text{ETPest } (t_0) = A (t - B)^2 + C \quad (3.18b)$$

$$\text{où } A = -31 \cdot 10^{-5}$$

$$B = 187 \quad (\text{région de Québec})$$

$$C = 4,18$$

La dose à appliquer sera égale à la réserve facilement utilisable (RFU).

Les différentes composantes du modèle de Penel (1984) servant au calcul du déficit journalier sont représentées à la figure 3.3.

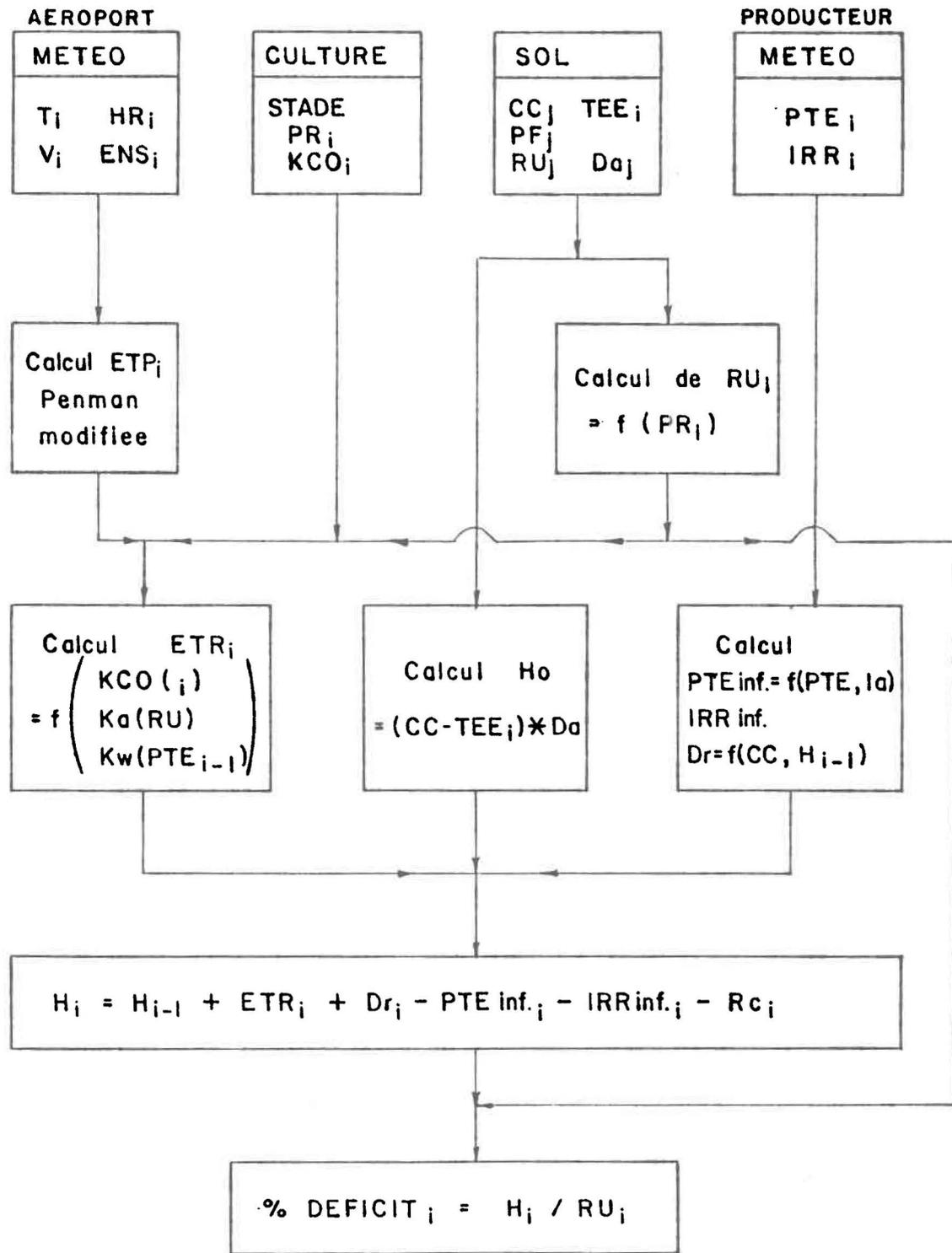


Figure 3.3

Calcul du déficit journalier à l'aide du modèle présenté par Penel (1984).

CHAPITRE 4

DESCRIPTIONS DES SITES EXPÉRIMENTAUX RETENUS

4. DESCRIPTION DES SITES EXPÉRIMENTAUX RETENUS

A l'intérieur du présent chapitre, nous présentons une description sommaire des sites expérimentaux retenus pour la validation du modèle de façon à faciliter la compréhension de la suite de ce travail. Cependant, une description plus détaillée comprenant un schéma de localisation pour chaque site, des tableaux décrivant la topographie des parcelles, les principaux stades de développement des cultures, les caractéristiques physiques et de rétention en eau du sol de chaque site est présentée à l'annexe B. On y présente également la méthodologie utilisée pour évaluer la teneur en eau et les propriétés physiques du sol.

4.1 Présentation des sites

Les parcelles et sites expérimentaux retenus pour la validation du modèle sont présentés au tableau 4.1.

Des mesures du niveau d'humidité du sol ont été effectuées à un intervalle de 2 à 5 jours au cours de deux saisons de croissance successives, soient les étés 1985 et 1986, pour deux cultures pour lesquelles l'irrigation est largement pratiquée au Québec, soient les cultures de la pomme de terre et de la fraise (tableau 1.2). Les localités retenues pour les sites cultivés en pommes de terre sont Baie-Comeau, Notre-Dame-de-la-Paix et l'Ile d'Orléans (figure 1.1). Les sites cultivés en fraises ont été choisis à l'Ile d'Orléans seulement.

Sur chaque parcelle en culture choisie, deux sites de mesure ont été retenus. Les sites sur deux parcelles ont été localisés au même endroit au cours des deux étés, soient les sites NDPP1 et 2 ainsi que BLOP1 et 2. Les sites BUIP1 et 2, par contre, étaient situés en 1986 dans un champ voisin des sites de l'année précédente pour lequel les caractéristiques du sol étaient semblables.

Tableau 4.1 Parcelles et sites expérimentaux retenus pour la validation du modèle de gestion de l'irrigation

Localité	Culture	Localisation des parcelles	Nom du site	
			été 1985	été 1986
Baie-Comeau (Station les Buissons)	Pommes de terre	Champs voisins	BUIP 1	BUIP 1
			BUIP 2	BUIP 2
Notre-Dame- de-la-Paix	Pommes de terre	Même champ	NDPP1	NDPP1
			NDPP2	NDPP2
Ile d'Orléans	Pommes de terre	Même champ	BLOP1	BLOP1
			BLOP1	BLOP2
Ile d'Orléans	Pommes de terre		PREP1	
			PREP2	
Ile d'Orléans	Fraises		GOSF1	
			GOSF2	
Ile d'Orléans	Fraises		PREF1	
			PREF2	
Ile d'Orléans	Fraises			GOSF1
				GOSF2

4.2 Mesures climatiques

Les données météorologiques journalières nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle à l'aide de la formule de Penman modifiée ont été obtenues des stations météorologiques d'Environnement Canada les plus rapprochées des sites. Il s'agit des stations d'Ottawa, de Baie-Comeau et de l'aéroport de Québec.

Les précipitations journalières, par contre, ont été mesurées à proximité de chaque champ contenant des sites expérimentaux.

Finalement, les hauteurs d'eau d'irrigation appliquées sur les champs contenant des sites expérimentaux ont été mesurées à l'aide de jauges pluviométriques disposées à différents endroits sur les champs et à proximité des sites.

4.3 Description physique des sites

Arrangements cultureux

Les deux cultures étudiées, soit la pomme de terre et la fraise, sont effectuées en rangs sur billons espacés de 0,90 m environ. De plus, les champs de fraises contiennent un paillis entre les rangs. Pour tous les sites étudiés, la culture est effectuée dans le sens de la pente, celle-ci variant de 2 à 6% à l'Ile d'Orléans et de 0 à 2% à proximité des sites des deux autres localités. La pente des parcelles étudiées est généralement orientée vers le sud ce qui favorise l'absorption de rayonnement solaire.

Tous les sites à l'exception de PREF1 et 2 et PREP1 et 2 sont situés à une distance suffisante des boisés pour ne pas créer de microclimat.

Mesure de la teneur en eau du sol

Pour les sites localisés à Baie-Comeau et Notre-Dame-de-la-Paix, la teneur en eau pondérale du sol a été détermi-

née par thermogravimétrie en prélevant sur chaque site sept ou huit échantillons (selon la localité) dans les vingt premiers centimètres à partir du dessus du billon.

A l'Ile d'Orléans, par contre, une sonde à neutrons a été utilisée pour suivre l'évolution du contenu en eau du sol de tous les sites. Des comptes neutroniques ont été effectués à deux profondeurs à chaque tuyau d'accès (15 ou 20 cm et 30, 35 ou 40 cm de profondeur). Sur chaque site, quatre à sept tuyaux d'accès ont été installés. Des échantillons de sol ont été prélevés autour d'un tuyau aux deux profondeurs de lecture de la sonde, et ceci à intervalle d'une fois par semaine en changeant de tuyau à chaque semaine. Ces échantillons vont servir à établir des courbes d'étalonnage permettant de transformer les comptes neutroniques obtenus en teneurs en eau pondérales.

Propriétés physiques du sol

Pour la majorité des sites étudiés (sauf BUIP1 et 2, en 1986), une fosse d'identification du profil du sol a été creusée à proximité des sites. A l'intérieur de chaque fosse, une série de trois échantillons de 193 cm³ chacun a été prélevée à chaque niveau dans le profil de 0 à 65 cm.

Pour la plupart des fosses étudiées, deux des trois échantillons de chaque niveau ont servi à établir 1) la densité apparente sèche de l'échantillon non remanié; 2) la teneur en eau à la capacité au champ de l'échantillon non remanié (-33 à -20 kPa); 3) le pourcentage de sable, limon et argile de la fraction inférieure à 2 mm; 4) le pourcentage de sol ayant une granulométrie supérieure à 2 mm; 5) et le pourcentage de matière organique. Le troisième échantillon a été séparé en deux parties et a servi à déterminer la teneur en eau au point de flétrissement (-1500 kPa).

Les niveaux échantillonnés ont été regroupés en deux ou trois couches homogènes en fonction des propriétés physiques du sol. En général, pour la couche de surface (20 à 30 premiers centimètres), le taux de matière organique varie entre 2 et 5%, la densité apparente se situe entre 1,05 et 1,38 g/cm³ et la fraction du sol ayant un diamètre supérieur à 2 mm représente entre 15 et 40% du poids total et semble plus élevé à l'île d'Orléans. La classe texturale des sols en surface varie de loam sableux à loam argileux.

Pour certains sites, les teneurs en eau à la capacité au champ ont été évaluées de cinq façons différentes, soit en laboratoire, à l'aide de données tirées de la littérature, en utilisant la teneur en eau la plus élevée observée au cours d'une saison et à l'aide d'essais au champ (pour les sites PREP1 et 2 en 1985 et BLOP1 et 2 en 1986). La description de ces essais est présentée à l'annexe B. On observe une différence importante entre les résultats obtenus avec les différentes méthodes. Comme les teneurs en eau moyennes les plus élevées observées au cours des deux saisons pour un site se rapprochent le plus des teneurs en eau à la capacité au champ obtenues à partir des essais au champ, nous avons retenu ces premières valeurs pour l'ensemble des sites.

Comme les teneurs en eau au point de flétrissement mesurées en laboratoire sont dans plusieurs cas beaucoup trop élevées, nous avons utilisé des valeurs égales à 50% de la teneur en eau à la capacité au champ retenue, ces valeurs étant légèrement inférieures à celles obtenues de la littérature.

CHAPITRE 5

ÉTUDE DES MESURES DE TENEUR EN EAU DU SOL SERVANT A LA VALIDATION DU MODÈLE

5. ÉTUDE DES MESURES DE TENEUR EN EAU DU SOL SERVANT A LA VALIDATION DU MODÈLE

Nous présenterons dans le présent chapitre les principaux résultats de l'étude des mesures de teneur en eau effectuées sur les sites étudiés et qui serviront à la validation du modèle. Toutefois, une étude plus détaillée est présentée à l'annexe C et montre les étapes ayant permis d'obtenir les résultats présentés.

L'annexe C comprend entre autres une revue de littérature sur les différentes méthodes de mesure de la teneur en eau du sol, une étude de l'erreur sur les mesures de teneur en eau du sol obtenues par thermogravimétrie et à l'aide d'une sonde à neutrons, la présentation et le traitement statistique des mesures de teneur en eau recueillies sur chaque site, le choix des valeurs décrivant le degré d'humidité du sol dans un site à utiliser pour valider le modèle ainsi qu'une discussion sur la variabilité spatiale du degré d'humidité du sol à l'intérieur d'un site et d'un site à un autre à l'intérieur d'un même champ.

5.1 Erreur sur les mesures de teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol a été déterminée à l'aide de deux méthodes suivant les sites considérés soient par thermogravimétrie et à l'aide d'une sonde à neutrons. La première donne une mesure directe de la teneur en eau pondérale pour un volume de sol différent à chaque mesure. La seconde donne une mesure indirecte nécessitant une courbe de calibration mais le volume de sol couvert varie peu entre chaque mesure.

Thermogravimétrie

L'erreur associée à la détermination de la teneur en eau pondérale d'un échantillon de sol par thermogravimétrie peut provenir d'une perte d'eau entre le moment de l'échantillonnage et de la pesée et de la limite de précision de la balance. La première source peut

être minimisée alors que la seconde peut être évaluée. La représentativité d'un échantillon dépendra de son volume et de l'hétérogénéité du sol.

Sonde à neutrons

La mesure de la teneur en eau d'un volume de sol à l'aide d'une sonde à neutrons est entachée d'erreurs liées à l'appareil lui-même, à la méthode d'étalonnage choisie et à l'hétérogénéité du sol à l'intérieur du site à étudier. Ces trois sources d'erreurs sont discutées à la section 2.2 de l'annexe C.

On retrouve dans la littérature deux groupes de méthodes d'étalonnage, soit l'analyse neutronique et les méthodes gravimétriques (Collas et Normand, 1984). La méthode retenue dans notre étude est la calibration au champ à partir d'échantillons dont la teneur en eau pondérale a été déterminée par thermogravimétrie. Comme il existe une relation linéaire entre le compte neutronique et la teneur en eau du sol, un modèle de régression linéaire pourra être utilisé.

5.2 Présentation et traitement des mesures de teneur en eau recueillies sur chaque site

Thermogravimétrie

A Baie-Comeau, huit échantillons ont été prélevés sur chaque site à intervalle de 2 à 4 jours alors que sept échantillons ont été prélevés à Notre-Dame-de-la-Paix au même intervalle.

De façon à bien représenter le niveau d'humidité du sol sur chaque site, nous avons calculé la moyenne et l'écart-type (tiré de la variance non biaisée) des échantillons d'un site pour chaque journée de mesure. L'hypothèse de normalité a été vérifiée au moyen du test W pour les petits échantillons (Bobbée, 1983) et les valeurs douteuses ont été rejetées suite à un examen visuel en accordant une attention spéciale aux séries de mesures présentant un écart-type supérieur à 2.5%.

Sonde à neutrons

A l'Ile d'Orléans, des mesures neutroniques ont été effectuées à deux profondeurs dans des tuyaux d'accès dont le nombre variait de 4 à 7 par site. Or, ces mesures neutroniques nécessitent des courbes de calibration pour être exprimées en teneurs en eau pondérales.

Nous assumons d'abord que l'erreur sur les comptes neutroniques est négligeable par rapport à l'erreur sur la mesure de la teneur en eau (voir justification à la section 3.2 de l'annexe C). Ainsi, une régression linéaire simple de la teneur en eau en fonction du compte neutronique donnera la meilleure estimation de la droite de régression entre ces deux variables.

Comme les échantillons pour la calibration ont été prélevés autour de chaque tuyau à des dates différentes, le nombre d'échantillons est insuffisant pour établir une courbe de calibration pour chaque tuyau. Nous avons donc retenu l'hypothèse que le degré d'humidité du sol varie d'un tuyau à l'autre dans un site et que la courbe de calibration est la même pour tout le site. (Le choix de cette hypothèse est discuté à la section 3.2 de l'annexe C).

Les deux hypothèses précédentes nous ont permis d'établir deux courbes de calibration pour chaque site, soit une pour chaque profondeur, en faisant une régression linéaire simple entre la teneur en eau pondérale mesurée autour d'un tuyau du site en fonction du compte neutronique du tuyau autour duquel l'échantillonnage a été effectué. Nous avons également assumé que la densité apparente du sol mesurée à partir des échantillons prélevés dans une fosse à proximité des sites est représentative de l'ensemble du site ce qui nous permet d'évaluer la teneur en eau volumique du sol.

Une comparaison des courbes de calibration visuellement et à l'aide du test F (Bobée, 1983) nous a permis de regrouper par profondeur certains sites d'un même champ dont les sols présentent des propriétés physiques semblables et ainsi améliorer les courbes de

calibration. Les caractéristiques des courbes de calibration retenues pour l'ajustement du modèle de gestion de l'irrigation sont présentées au tableau C.4 (page 212) alors que les courbes retenues et les points ayant servi à établir les droites sont présentés à la figure C.3 (pages 213 à 216).

Pour bien représenter le niveau d'humidité du sol sur chaque site où une sonde à neutrons a été utilisée, nous avons calculé la moyenne et l'écart-type des comptes neutroniques et éliminé les valeurs douteuses. Puis, la teneur en eau moyenne a été obtenue à l'aide du compte neutronique moyen et de la courbe de calibration du site à la profondeur voulue.

5.3 Choix des valeurs décrivant le degré d'humidité du sol dans un site à utiliser pour valider le modèle

Pour les sites dont le suivi du niveau d'humidité du sol a été effectué par thermogravimétrie en échantillonnant sur les vingt premiers centimètres de sol, nous utiliserons la valeur moyenne et l'intervalle de confiance à 95% des mesures pour chaque site (équation C.8, page 217) en assumant que la teneur en eau mesurée sur les vingt premiers centimètres est représentative de la teneur en eau sur toute la profondeur des racines. Notons que pour la culture de la pomme de terre, la plus grande densité des racines se situe dans les trente premiers centimètres de sol.

Pour les sites dont le suivi du niveau d'humidité du sol a été effectué à deux profondeurs à l'aide d'une sonde à neutrons, la valeur moyenne des comptes neutroniques à chaque profondeur ainsi que l'intervalle de confiance à 95% attribuable à l'hétérogénéité du site est considéré. De plus, l'erreur due à la prédiction à partir de la droite de régression sera prise en compte tel qu'illustré à la figure C.4 (page 219). Finalement, nous considérons que la teneur en eau du sol mesurée à 15 ou 20 cm de profondeur sur une sphère de 7.5 à 15 centimètres de diamètre est représentative de la teneur en eau de la zone de sol située dans les trente premiers centimètres tandis que la mesure effectuée à 35 ou 40 cm de profondeur représente la teneur en eau de la

couche de sol plus profonde que trente centimètres. La teneur en eau moyenne du site dépendra de la profondeur de racine dans chaque zone.

Les teneurs en eau moyennes et intervalles de confiance à 95% sont transformées en déficits par rapport à la teneur en eau à la capacité au champ exprimés en millimètre à l'aide des relations C.10 et C.11 (pages 222 et 223). On peut ainsi comparer les déficits calculés par le modèle aux déficits en eau mesurés au champ.

5.4 Discussion de la variabilité spatiale du niveau d'humidité du sol à l'intérieur d'un site et d'un site à un autre à l'intérieur d'un même champ

Une observation des mesures décrivant le degré d'humidité du sol à l'aide de deux méthodes montre qu'il existe une forte variabilité entre les mesures d'un même site alors que le niveau moyen d'humidité du sol varie très peu entre deux sites d'un même champ si les propriétés physiques du sol sont semblables aux deux endroits.

On observe également une plus grande variabilité des mesures du niveau d'humidité en profondeur qu'en surface pour les sites suivis à l'aide d'une sonde à neutrons, et l'erreur sur les courbes de calibration est plus élevée.

Finalement, on peut s'attendre à obtenir des intervalles de confiance plus élevés pour les mesures réalisées à l'aide d'une sonde à neutrons que pour celles réalisées par thermogravimétrie à cause de l'erreur de la courbe de calibration qui s'ajoute à l'erreur associée à l'hétérogénéité du site.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS DES SIMULATIONS AVEC
LE MODÈLE DU SERVICE DU GÉNIE (MAPAQ)

6. RÉSULTATS DES SIMULATIONS AVEC LE MODÈLE DU SERVICE DU GÉNIE (MAPAQ)

6.1 Paramètres de départ et résultats des simulations

Les simulations présentées aux figures 6.1 à 6.5 ont été réalisées en utilisant les valeurs de réserve en eau utile du sol présentées au tableau B.4 pour chaque site et le déficit initial mesuré lors de la première journée de lecture au champ. Les dates des stades culturaux utilisées comme paramètres d'entrée pour les simulations sont présentées au tableau 6.1. Les valeurs d'abstraction initiale (I_a) ont été choisies à partir du tableau 3.1 et des caractéristiques du sol et des cultures de chaque site. Les valeurs de I_a retenues pour chaque site ainsi que différents critères numériques permettant d'évaluer la simulation sont présentés au tableau 6.2. Le critère NTD proposé par Nash (1969) est indépendant de l'ordre de grandeur des valeurs comparées et peut s'exprimer comme suit:

$$NTD = 1 - \frac{\sum (DF_m - DF_s)^2}{(DF_m - \overline{DF}_m)^2} \quad (6.1)$$

où DF_m : déficit mesuré au champ (mm ou % RU)
 DF_s : déficit simulé par le modèle (mm ou % RU)
 \overline{DF}_m : déficit mesuré moyen pour les N jours observés

La simulation sera parfaite si NTD tend vers l'unité et d'autant médiocre que les valeurs seront négatives. Le critère S représente l'erreur type alors que le critère MOY représente la différence moyenne ($DF_s - DF_m$) et est négatif si le modèle sous-estime les valeurs mesurées. Le critère DIFMOY est la différence moyenne précédente mais en valeur absolue (écart moyen entre les valeurs mesurées et calculées en mm, ou en % de la réserve en eau utile).

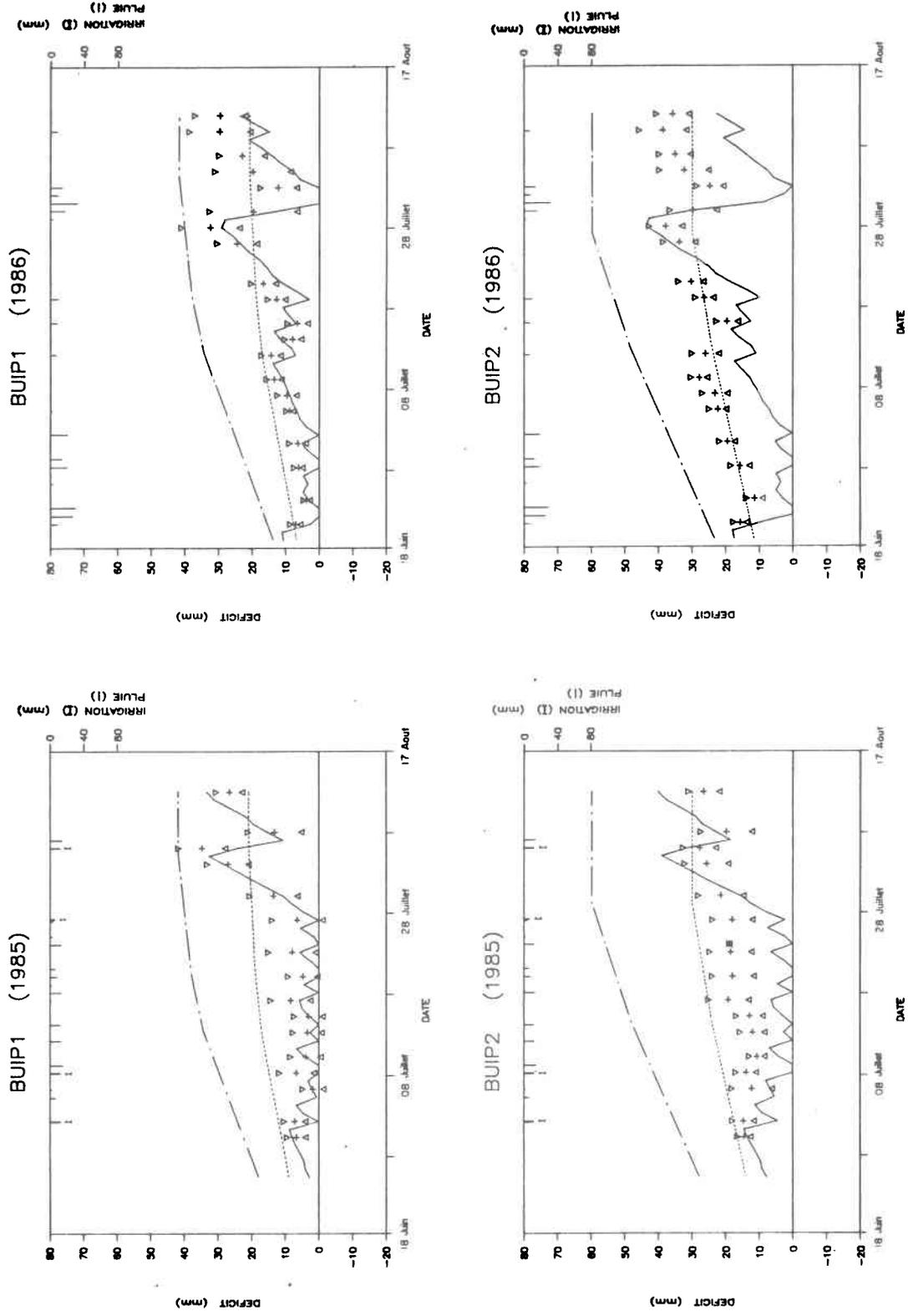


Figure 6.1 Evolution du déficit calculé (—) et mesuré (---) et mesuré (+ : moyenne; Δ, ∇ : intervalle de confiance à 95%) et de la réserve utile (--- : 100%; - - - : 50%) au cours de la saison pour les sites BUIP1 et BUIP2 (pommes de terre) en 1985 et 1986.

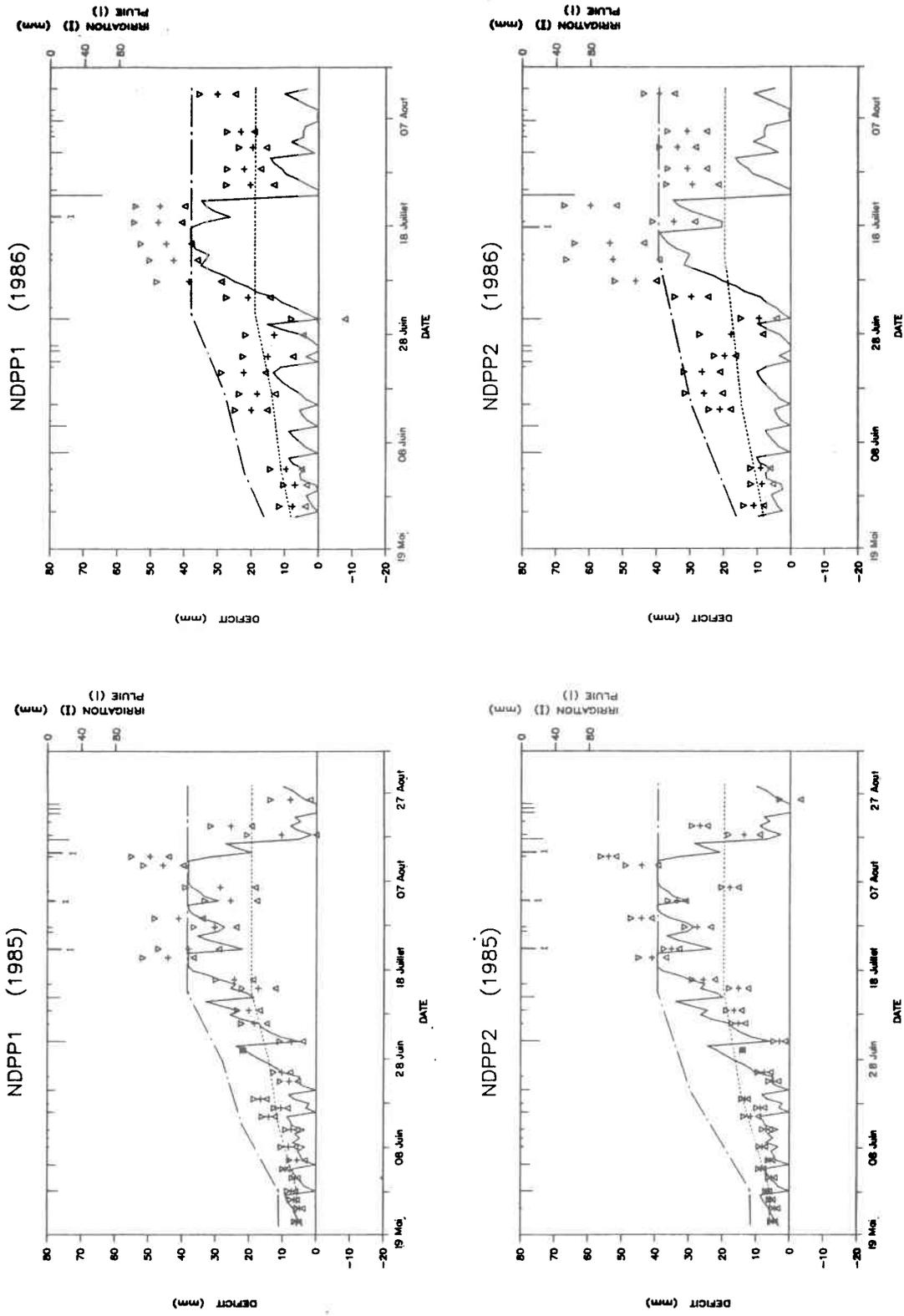


Figure 6.2 Evolution du déficit calculé (—) et mesuré (---) et intervalle de confiance à 95% (····) et de la réserve utile (— · — ·) au cours de la saison pour les sites NDPP1 et NDPP2 (pommes de terre) en 1985 et 1986.

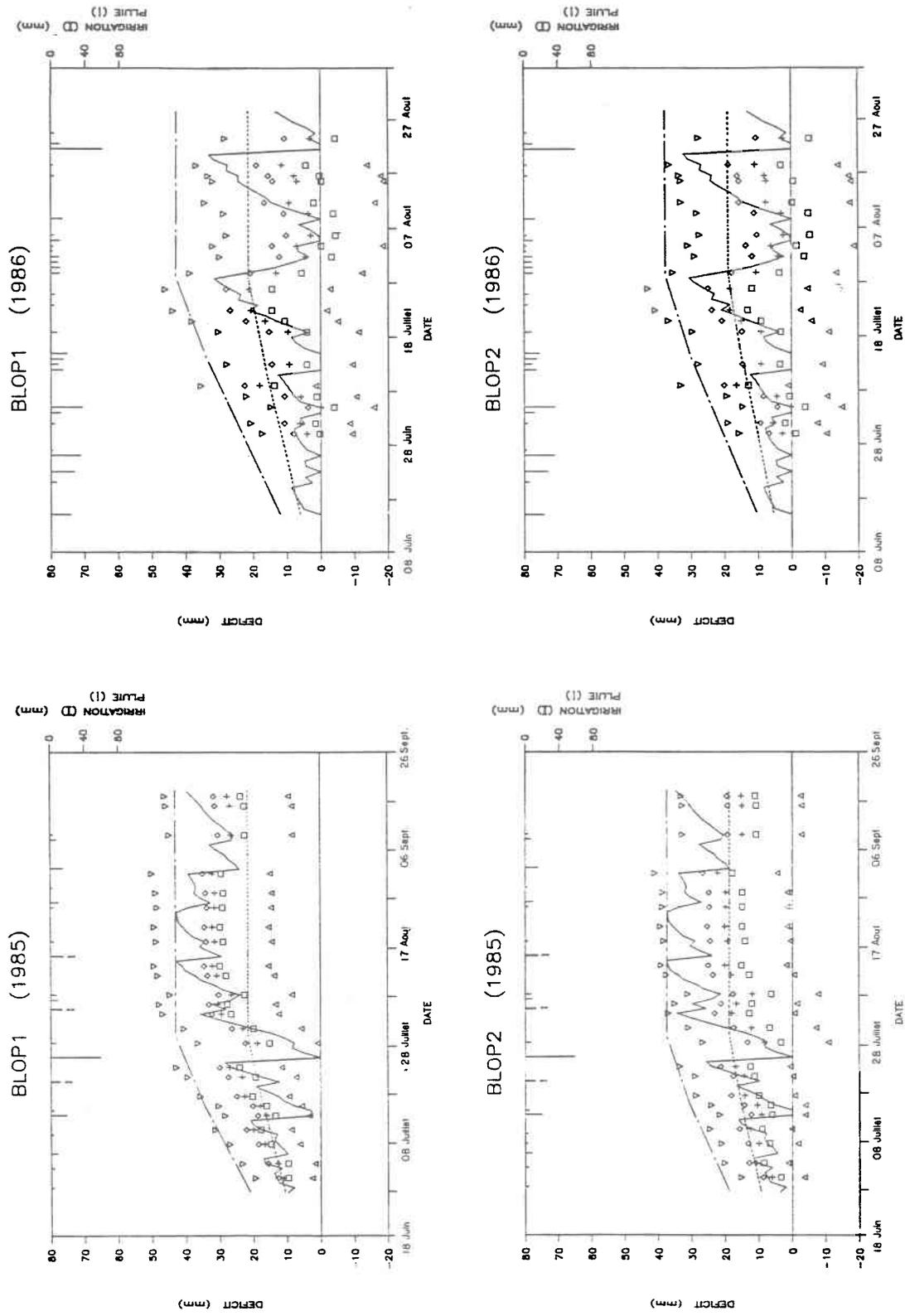


Figure 6.3 Evolution du déficit calculé (—) et mesuré (·, ∇ : intervalle de confiance à 95%) et de la réserve utile (--- : 100%; --- : 50%) au cours de la saison pour les sites BLOP1 et BLOP2 (pommes de terre) en 1985 et 1986.

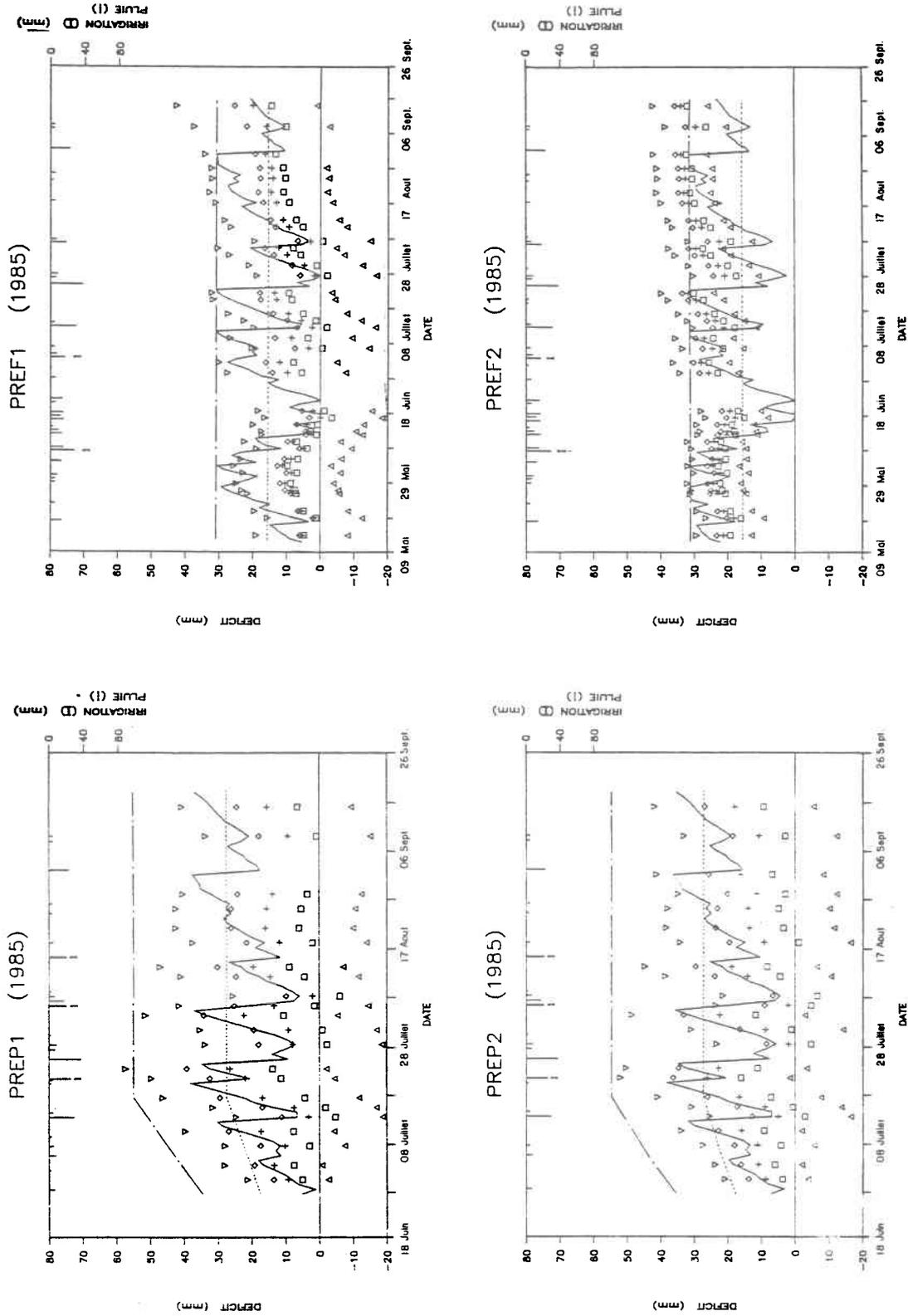


Figure 6.4 Evolution du déficit calculé (—) et mesuré (Δ, ∇ : intervalle de confiance à 95%) et de la réserve utile (--- : 100%; --- : 50%) au cours de la saison pour les sites PREP1, PREP2, PREP1 et PREP2 (pommes de terre et fraises) en 1985.

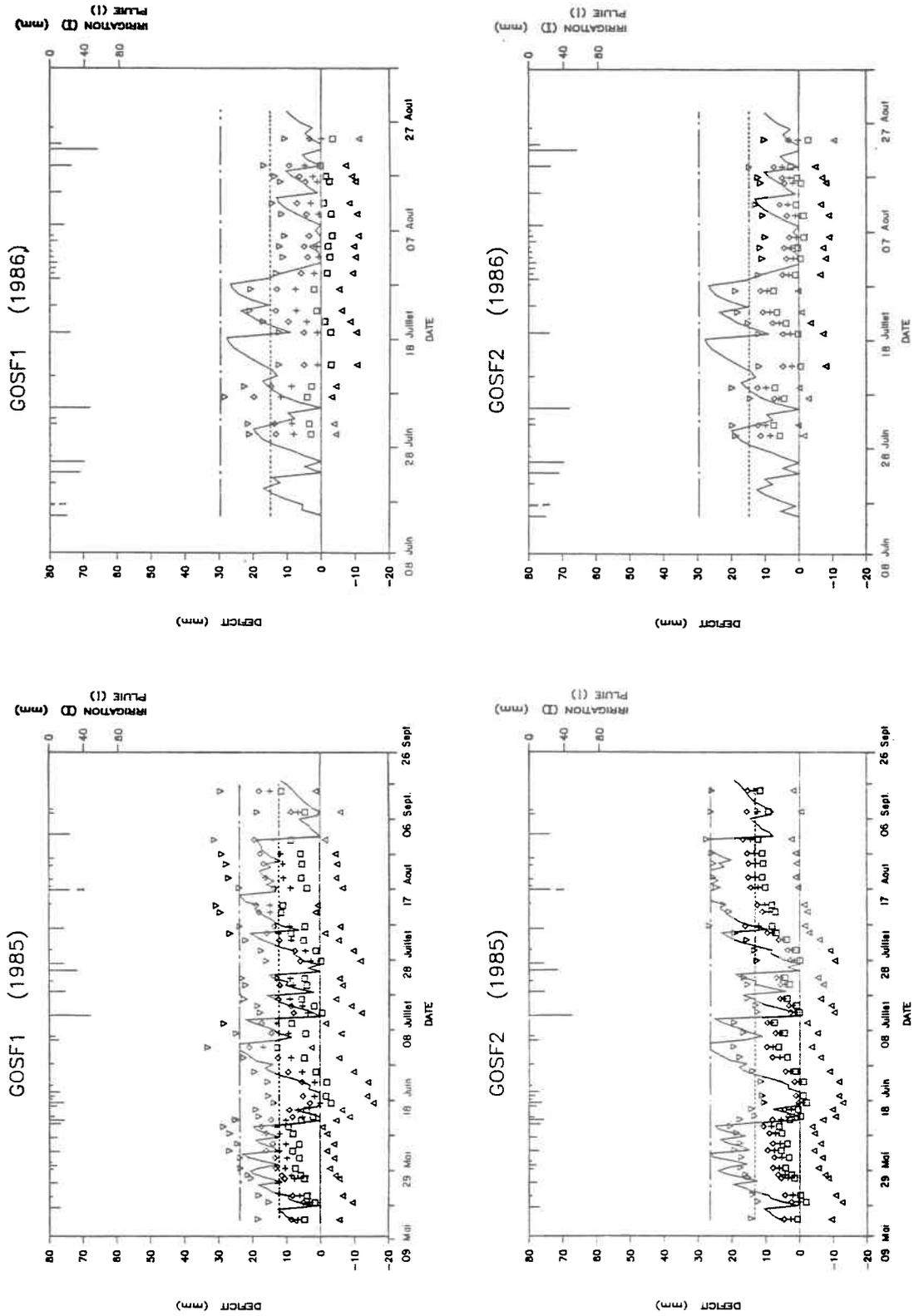


Figure 6.5 Evolution du déficit calculé (—) et mesuré (+ : moyenne; Δ, ∇ : intervalle de confiance à 95%) et de la réserve utile (--- : 100%; ···· : 50%) au cours de la saison pour les sites GOSF1 et GOSF2 (fraises) en 1985 et 1986.

Tableau 6.1 Date des stades culturaux utilisées comme paramètres d'entrée pour les simulations.

SITE	DATE				
	SEMIS	DEBUT D'EN- RACINEMENT	COUVERTURE TOTALE	RECOLTE	DF0
BUIP1 (85)	03/06	22/06	06/08	02/10	26/06
BUIP2	28/05	16/06	31/07	19/08	26/06
BUIP1 (86)	02/06	21/06	05/08	11/09	20/06
BUIP2	26/05	14/06	29/07	15/08	20/06
NDPP1 (85)	12/05	31/05	15/07	15/09	22/05
NDPP2	15/05	31/05	15/07	15/09	22/05
NDPP1 (86)	01/05	20/05	14/07	25/09	26/05
NDPP2	01/05	20/05	14/07	25/09	26/05
BLOP1 (85)	28/05	16/06	31/07	23/09	28/06
BLOP2	28/05	16/06	31/07	23/09	28/06
BLOP1 (86)	08/06	16/06	31/07	10/10	16/06
BLOP2	08/06	16/06	31/07	10/10	16/06
PREP1 (85)	22/05	10/06	19/07	18/09	28/06
PREP2	22/05	10/06	19/07	18/09	28/06
PREF1 (85)	01/05	01/05	20/07	05/07	13/05
PREF2	01/05	01/05	20/07	05/07	13/05
GOSF1 (85)	01/05	01/05	20/07	02/07	14/05
GOSF2	01/05	01/05	20/07	02/07	14/05
GOSF1 (86)	01/05	01/05	20/07	09/07	16/06
GOSF2	01/05	01/05	20/07	09/07	16/06

Tableau 6.2 Résultats des simulations (essai 1)

SITE	(mm)	NTD (%RU)	MOY (mm)	DIFMOY (mm)	S (mm)	Ia (mm)
BUIP1 (85)	0,77	0,63	-2,0	3,5	4,3	14
BUIP2	-3,85	-10,12	-6,4	9,9	9,3	8
BUIP1 (86)	0,36	-0,18	-5,1	5,5	4,8	14
BUIP2	-2,88	-15,92	-12,5	13,4	8,8	8
NDPP1 (85)	0,70	0,20	-3,5	5,5	6,5	13
NDPP2	0,67	0,39	-1,4	5,9	8,2	13
NDPP1 (86)	0,23	-0,17	-11,1	11,1	5,0	13
NDPP2	-0,69	-1,71	-17,9	17,9	7,3	13
BLOP1 (85)	-0,2	-2,7	0,8	6,0	7,1	12
BLOP2	-5,0	-9,0	7,0	8,8	8,2	13
BLOP1 (86)	-0,70	-0,46	2,3	5,4	7,6	12
BLOP2	-1,10	-0,81	2,9	5,7	7,4	13
PREP1 (85)	-0,97	-0,91	6,3	6,6	5,2	12
PREP2	-1,12	-1,21	7,6	8,1	6,2	14
PREF1 (85)	-2,88	—	8,2	8,8	6,8	10
PREF2	-2,53	—	-4,9	7,5	7,5	7
GOSF1 (85)	-1,16	—	3,5	5,0	4,8	9
GOSF2	-5,49	—	9,1	9,6	6,4	7
GOSF1 (86)	-5,65	—	6,9	7,5	6,4	9
GOSF2	-5,80	—	6,4	7,1	5,8	9

Les facteurs a et b de la fonction de vitesse de vent (équation 3.14) ont été fixés à 0,029 et 0,75 pour toutes les localités. De même, les paramètres pour le calcul de R_n (ondes longues) ont été fixés à $(1-a'') = 0,36$; $b'' = 0,035$; $c = 1,203$ et $d = -0,203$ pour la modélisation. Notons que ces valeurs diffèrent de celles présentées par Penel (1984) pour l'aéroport de Québec. L'albédo a été fixé à 0,23 pour toute la saison. De plus, les facteurs A, B, C et D des coefficients culturaux K_{co} pour la pomme de terre (équation 5.4) ont été fixés à 3, -2,6, 0,85 et 0,1 avant la date de couverture totale et à $-1,9 \times 10^{-6}$, 0,00034, -0,026 et 1,37 pour le reste de la saison ce qui diffère de ceux dérivés par Penel (1984) à partir des données de Burstall et Harris (1982). Finalement, pour les fraises, K_{co} a été fixé constant et égal à 0,65 jusqu'à la date de couverture totale tandis que les coefficients A, B, C et D ont été fixés à 0, 0, -0,005 et 0,65 pour le reste de la saison.

La profondeur d'enracinement maximale a été fixée à 0,40 m pour la culture de la pomme de terre alors qu'une profondeur constante de 0,20 m a été retenue pour la culture de la fraise. La lecture neutronique à 15 et 20 cm (selon l'année) a été utilisée pour représenter la teneur en eau des trente premiers centimètres de sol alors que la lecture plus en profondeur (35 et 40 cm) a servi à représenter la zone plus profonde que 30 cm explorée par les racines.

Finalement, l'efficacité de l'irrigation a été fixée à 90% pour les sites cultivés en pommes de terre. Pour les sites cultivés en fraises, la hauteur d'eau appliquée par irrigation sur les sites est dans certains cas beaucoup plus faible que la hauteur d'eau mesurée par les jauges pluviométriques. Ceci est attribuable au fait que les jauges n'étaient pas situées à l'intérieur des sites et que la portée des canons asperseurs ne permettait pas d'atteindre certains sites situés aux extrémités des champs. Ainsi, en 1985, nous avons assumé que 45% de l'eau d'irrigation mesurée dans le champ par les jauges a été appliquée sur le site GOSF1 contre 20% pour le site PREF1 et 0% pour les sites GOSF2 et PREF2.

6.2 Discussion des résultats et identification des points à améliorer

Les figures 6.1 à 6.5 présentent l'évolution du déficit calculé par le modèle ainsi que les valeurs moyennes et intervalles de confiance des valeurs mesurées pour chaque site. Le modèle fournira une bonne représentation des conditions au champ si les valeurs simulées se maintiennent à l'intérieur des intervalles de confiance des valeurs mesurées et de part et d'autre des valeurs moyennes. De plus, l'estimation de l'évapotranspiration réelle sera adéquate si l'augmentation des déficits mesurés et calculés sont semblables pour l'ensemble des séquences présentant de faibles précipitations. Le calcul de la pluie infiltrée sera validé en comparant les diminutions des déficits calculés et mesurés lors d'apports d'eau importants.

A Baie-Comeau, pour le site BUIP1 (figure 6.1), les valeurs simulées par le modèle se maintiennent à l'intérieur de l'intervalle de confiance à 95% des valeurs mesurées, mais sous-estime le déficit en moyenne de 4 mm (surtout après les pluies du 1 au 5 août en 1986). Pour le site BUIP2, le déficit calculé est sous-estimé de façon systématique de 9 mm en moyenne et se situe à l'extérieur des intervalles de confiance. Notons qu'en 1986, le modèle sous-estime davantage le déficit pour les deux sites qu'en 1985 en utilisant les mêmes paramètres. Ceci peut être lié à la distribution des pluies qui diffère d'un été à l'autre. Les simulations pourront être améliorées en diminuant l'indice Ia pour réduire l'infiltration ou en diminuant la teneur en eau à la capacité au champ.

A Notre-Dame-de-la-Paix, les déficits simulés pour les deux sites se maintiennent à l'intérieur des intervalles de confiance en 1985 et à l'extérieur de ceux-ci en 1986 (figure 6.2). Dans tous les cas, les déficits simulés sous-estiment les valeurs mesurées et ce phénomène est beaucoup plus marqué en 1986 où on calcule pour les sites NDPP1 et 2 des déficits sous-estimant les valeurs mesurées de 11 mm et 18 mm en moyenne. Cette différence de comportement pour les mêmes sites entre deux années peut être attribuée à la distribution des pluies

dont l'infiltration calculée semble trop forte en 1986. Une diminution de l'indice Ia devrait améliorer les simulations. Des valeurs de teneurs en eau à la capacité au champ plus faibles pourraient également conduire à de meilleurs résultats.

A l'île d'Orléans, les déficits simulés se maintiennent à l'intérieur des intervalles de confiance et surestiment les déficits mesurés de 1 à 7 mm en moyenne pour les sites cultivés en pommes de terre (figure 6.3 et 6.4 (PREP)). Dans tous les cas, l'évapotranspiration réelle est trop élevée et ceci de façon plus prononcée après la date de couverture totale (fin juillet). Les valeurs de teneurs en eau à la capacité au champ semblent bien estimées (tableau B.4). Pour les sites cultivés en fraises, les déficits simulés se maintiennent à l'intérieur des intervalles de confiance sauf en 1985 pour les sites PREF1 et GOSF2. De plus, les déficits simulés surestiment les valeurs mesurées de façon systématique de 4 à 10 mm en moyenne sauf pour le site PREF2 où les déficits simulés sont sous-estimés de 5 mm en moyenne. Dans tous les cas, l'évapotranspiration réelle est trop élevée au cours de toute la saison de culture. Pour tous les sites sauf PREF2, une augmentation de la teneur en eau à la capacité au champ rapprocherait les valeurs mesurées des valeurs simulées. On peut également noter qu'en 1985, le déficit initial choisi pour le site GOSF2 est probablement trop élevé.

Une synthèse des résultats et correctifs à apporter est présentée au tableau 6.3.

Nous avons discuté au chapitre 3 de la difficulté de déterminer avec précision la teneur en eau à la capacité au champ. Pour nos simulations, une erreur sur ce paramètre aura plus d'influence sur la position des valeurs de déficit mesurées que sur les valeurs simulées ce qui pourrait laisser apparaître un biais systématique. Par contre, on peut observer un biais sans que le paramètre précédent soit erroné comme c'est le cas pour les sites où l'évapotranspiration ou l'infiltration sont mal évalués. Il est donc important d'identifier les composantes du modèle qui entraînent une déviation de la modélisation. faut également garder à l'esprit qu'une erreur est également possible sur les précipitations et irrigations mesurées au champ quoique plus difficile à contrôler.

Tableau 6.3 Comparaison des déficits hydriques calculés avec le modèle aux déficits mesurés au champ et correctifs à apporter.

LOCALITE	SITE	ANNEE	POSITION DU DEFICIT CALCULE PAR RAPPORT AUX MESURES AU CHAMP		CORRECTIF A APPORTER
			MOYENNE	INTERVALLE A 95 %	
Baie-Comeau	BUIP1	1985	Sous-estimée de 2 mm		A l'intérieur
	BUIP2		Sous-estimée de 6 mm		A l'extérieur
	BUIP1	1986	Sous-estimée de 5 mm		A l'intérieur
	BUIP2		Sous-estimée de 13 mm		A l'extérieur
Notre-Dame-de-la-Paix	NDPP1	1985	Sous-estimée de 4 mm		A l'intérieur
	NDPP2		Sous-estimée de 1 mm		A l'intérieur
	NDPP1	1986	Sous-estimée de 11 mm		A l'extérieur
	NDPP2		Sous-estimée de 18 mm		A l'extérieur
Ile d'Orléans	BLOP1	1985	Surestimée de 1 mm		A l'intérieur
	BLOP2		Surestimée de 7 mm		A l'intérieur
	BLOP1	1986	Surestimée de 2 mm		A l'intérieur
	BLOP2		Surestimée de 3 mm		A l'intérieur
	PREP1	1985	Surestimée de 6 mm		A l'intérieur
	PREP2		Surestimée de 8 mm		A l'intérieur
	PREF1	1985	Surestimée de 8 mm		A l'intérieur
	PREF2		Sous-estimée de 5 mm		A l'extérieur (partiellement)
	GOSF1	1985	Surestimée de 4 mm		A l'intérieur
	GOSF2		Surestimée de 9 mm		A l'extérieur
GOSF1	1986	Surestimée de 7 mm		A l'intérieur	
GOSF2		Surestimée de 6 mm		A l'intérieur	

Comme l'évaluation de l'évapotranspiration réelle semble trop élevée pour tous les sites localisés sur l'île d'Orléans, et en particulier pour les pommes de terre après le premier août et pour les fraises durant toute la saison, nous allons étudier les composantes susceptibles d'entraîner un biais.

La formule de Penman servant au calcul de l'évapotranspiration potentielle (équation 3.7) comprend un terme radiatif et un terme advectif qui sont évalués à l'aide de données météorologiques journalières et de coefficients devant être calibrés localement.

Le terme radiatif est calculé à l'aide du rayonnement au sommet de l'atmosphère, de la durée d'ensoleillement et de l'albédo pour le rayonnement de courte longueur d'onde, et à l'aide de la température et de l'humidité relative moyennes journalières mesurées à la station météorologique la plus rapprochée. L'équation 3.11b entraîne une surestimation du rayonnement au sommet de l'atmosphère de 3 à 4% par rapport aux données de List (1971) pour la période du 29 mai au 31 août aux latitudes de 40° et 50° en utilisant une constante solaire de 117 MJ/m² - j.

Les mesures de températures maximums réalisées à l'île d'Orléans aux sites BLOP1 et 2 pour le mois d'août 1986 et présentées à la figure 6.6 indiquent d'une part que l'utilisation des températures mesurées à l'aéroport de Québec entraîne une sous-estimation d'environ 15% pour ces sites, et d'autre part que la variabilité des températures maximums est plus élevée à l'aéroport que dans le champ étudié. L'utilisation de températures maximums trop faibles donnera des valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP) plus faibles alors que la surestimation du rayonnement agira dans le sens inverse.

Le fait de fixer l'albédo constant pour la saison (0,23) entraîne un biais surtout en début et en fin de saison. Burnman et al. (1981) donnent pour la culture du maïs en Idaho un albédo se situant aux environs de 0,23 entre le premier juin et le quinze juillet et s'élevant à 0,25 le premier mai et le quinze août, et à 0,28 à la

AEROPORT DE QUEBEC – ILE D'ORLEANS

SITES BLOP1 & 2 (AOUT 1986)

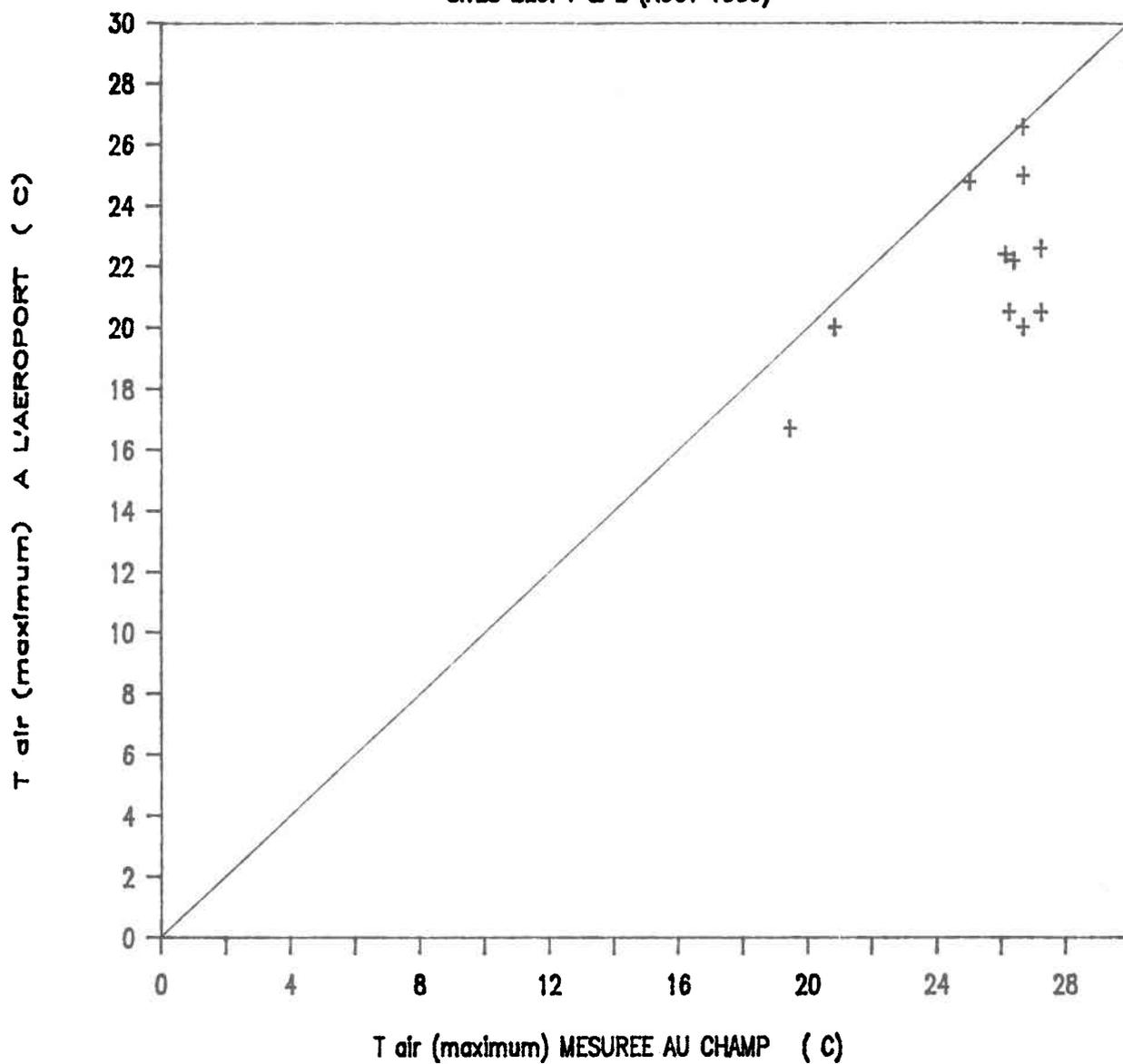


Figure 6.6 Comparaison des températures maximums journalières mesurées à l'aéroport de Québec et mesurées au champ à 1,52 m au-dessus du sol pour les sites BLOP1 et 2 en août 1986.

mi-septembre dû à la variation de l'angle solaire au cours de la saison. Le Québec étant situé à des latitudes plus nordiques, l'amplitude de cette variation sera plus forte. On peut également noter qu'aux mois de mai et juin, le sol sera découvert totalement ou en partie et que l'albédo variera suivant la couleur du sol et ses conditions d'humidité. En fin de saison, le feuillage des pommes de terre jaunit ce qui entraîne une augmentation de l'albédo qui, ajouté à l'effet de l'angle solaire, peut entraîner une diminution significative de l'ETP. Celle-ci ne sera pas détectée en considérant un albédo constant pour toute la saison. Notons également que la présence d'un paillis entre les rangs de fraises peut augmenter l'albédo et conduire à une valeur d'ETP trop élevée. Comme nous ne disposons pas de mesures d'albédos au champ, nous conserverons la valeur constante de 0,23 donnée par Burnman et al. (1981) pour les cultures commerciales, l'erreur étant faible pour les mois de juin et juillet où les besoins en irrigation se font le plus sentir.

L'évaluation du terme d'advection de la formule de Penman demande la connaissance du déficit de saturation de l'air, de la vitesse du vent à 2 mètres et de la fonction de vitesse du vent ($f(U)$). On observe à la figure 6.7 que la vitesse du vent à 2 mètres du sol a tendance à être plus élevée aux sites BLOP1 et 2 à l'île d'Orléans qu'à l'aéroport de Québec (environ 10%) pour le mois d'août 1986. Ainsi, l'utilisation des vitesses du vent mesurées à l'aéroport et ramenées à 2 mètres tendra à diminuer l'ETP pour les sites mentionnés. L'utilisation de températures plus faibles qu'au champ agira dans le même sens sur l'ETP puisque le déficit de saturation de l'air sera plus faible. Par contre, la fonction de vitesse du vent $f(U)$ utilisée dans la modélisation conduira à des valeurs d'ETP plus élevées qu'en utilisant les coefficients présentés dans le rapport de Penel (1984). Notons que les deux fonctions illustrées à la figure 6.8 sont possibles pour les conditions du Québec. Les coefficients dérivés à partir des données météorologiques de l'aéroport de Québec et à l'aide de la formule de Baier et Robertson prenant en compte la vitesse du vent (voir le rapport de Penel, 1984) doivent être considérés avec réserve pour les raisons suivantes. D'abord, l'évapotranspiration potentielle de la formule de Penman a été considérée égale à l'ETP calculée à partir de

AEROPORT DE QUEBEC – ILE D'ORLEANS

SITES BLOP1 & 2 (AOUT 1986)

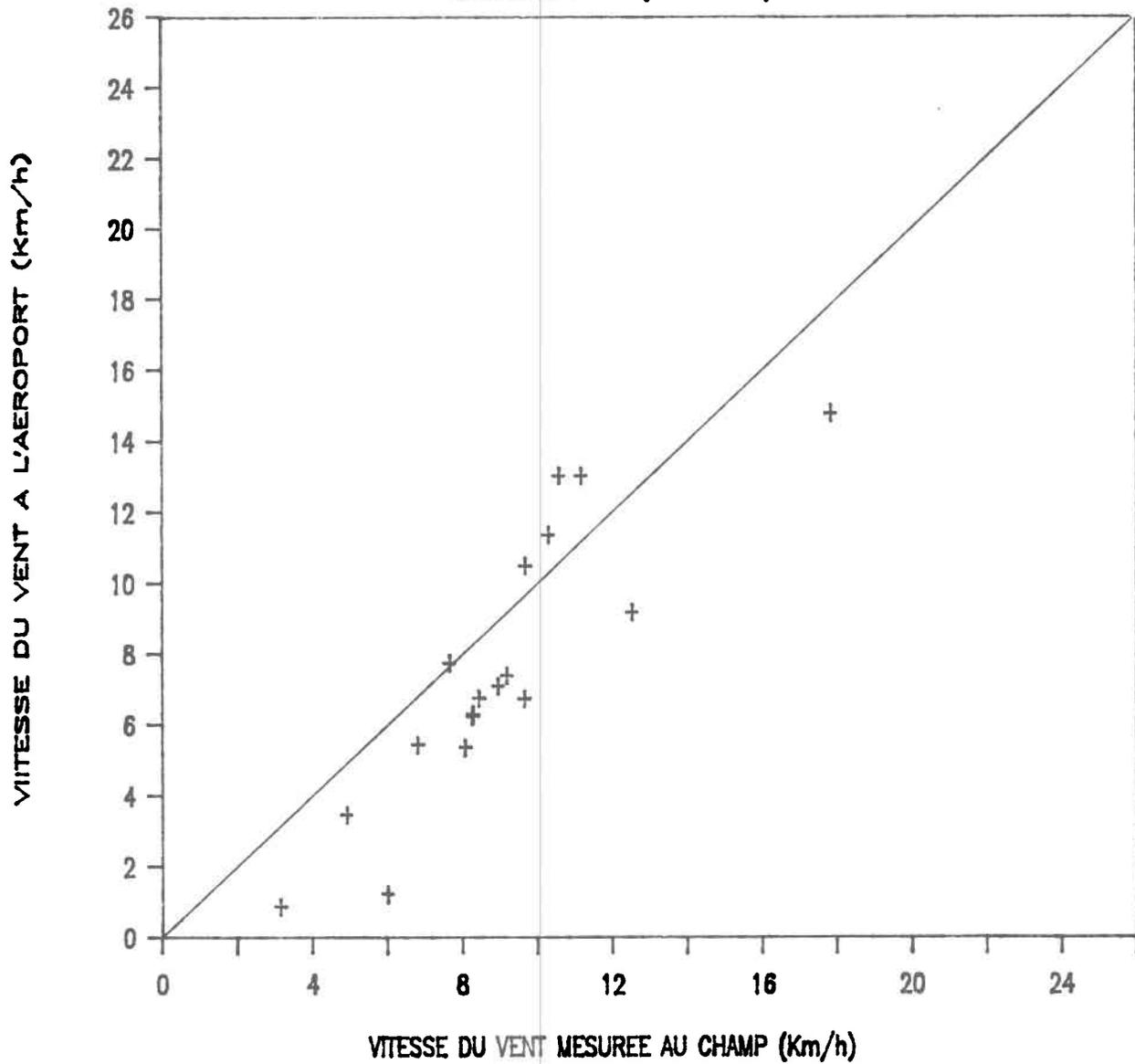


Figure 6.7 Comparaison des vitesses du vent ramenées à deux mètres de hauteur pour l'aéroport de Québec et les sites BLOP1 et 2 pour le mois d'août 1986.

la formule de Baier et Robertson (1965) elle-même établie à partir de mesures d'évaporation réalisées à l'aide d'un disque Bellani. Or, Brutsaert (1982) mentionne que les mesures d'évaporation obtenues à partir de disques Bellani sont difficiles à interpréter et que la relation entre le bilan énergétique et les propriétés aérodynamiques de cet instrument et ceux des surfaces naturelles est mal défini. De plus, les coefficients de la formule de Baier et Robertson (1965) utilisée ont été calculés par régression linéaire multiple en combinant des données d'évaporation de disques Bellani et des données de stations météorologiques provenant de six localités au Canada. Finalement, les vitesses de vent n'ont pas été ramenées à une hauteur standard et le rayonnement de courte longueur d'onde a été calculé à partir de coefficients adaptés aux conditions d'Ottawa et d'Edmonton qui diffèrent de ceux utilisés par Penel (1984) pour Québec. La fonction de vitesse de vent calculée à partir des coefficients dérivés par Penel (1984) à l'aide des données de Québec se rapproche de celle de Penman (1948) dérivée en Angleterre pour une surface d'eau libre alors que la fonction retenue par Penel (1984) pour la modélisation se rapproche de celle de Davis qui est la courbe la plus basse pour les États-Unis (figure 6.8). La fonction développée par Penman (1963) pour un gazon court se situe entre les deux courbes présentées. Pour connaître la position exacte de cette courbe pour les conditions du Québec, il faudrait disposer de mesures d'évapotranspiration sur lysimètre.

On observe que les erreurs sur les paramètres servant au calcul de l'ETP à l'aide de la formule de Penman peuvent agir dans le sens contraire. Or, il convient d'étudier l'importance relative des différents termes de rayonnement et du terme d'advection dans le calcul de l'ETP sous nos conditions pour identifier les termes ayant le plus d'importance pour le résultat.

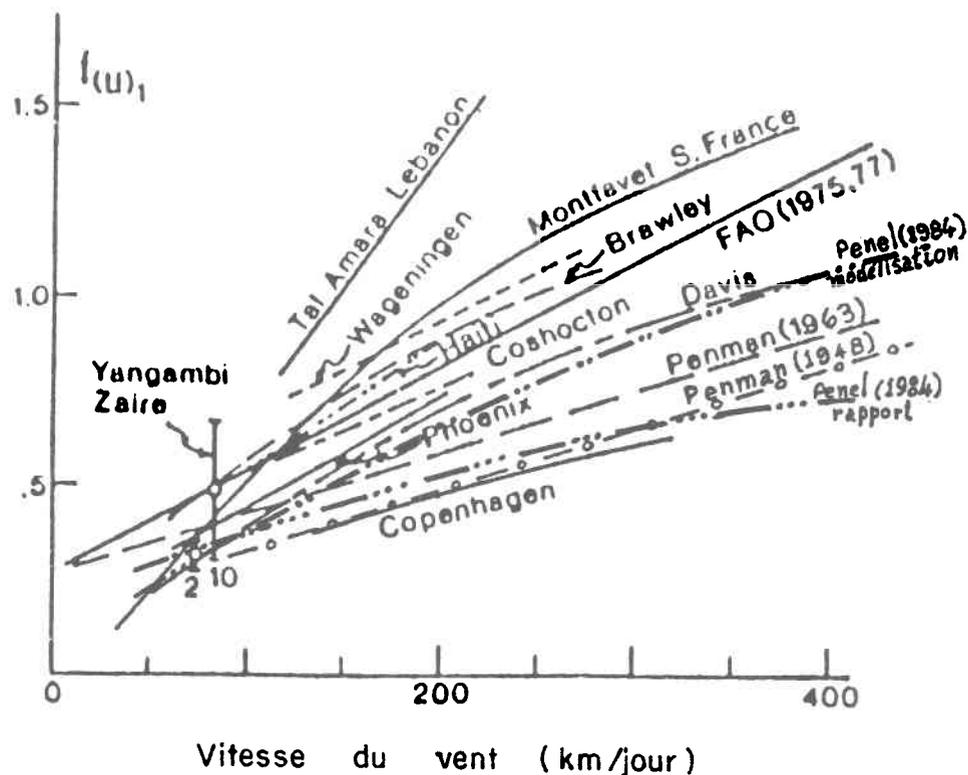


Figure 6.8 Fonctions de vitesse du vent (pour des conditions d'été) utilisées pour Québec (Penel, 1984) et tirées de la littérature pour neuf autres localités (d'après Doorembos et Pruitt, 1977).

L'évapotranspiration réelle (ETR) est calculée à l'aide de la relation 3.16 qui considère l'ETP, un coefficient cultural de base (K_{co}) évoluant avec le stade phénologique de la culture, un coefficient d'assèchement (K_a) tenant compte de la disponibilité de l'eau du sol et un terme prenant en compte le surplus d'évaporation du sol lorsqu'il est mouillé en surface. Les valeurs de K_a calculées à l'aide de la relation 3.5 (voir courbe I sur la figure 3.1) sont applicables à des conditions similaires à l'endroit où elle a été développée, soit à Kimberly en Idaho pour le type de sol concerné (non mentionné). Boisvert et Dyer (1987) mentionnent que le coefficient d'assèchement dépendra davantage de la texture du sol pour un sol en jachère tandis que l'ETP exercera une influence plus grande lorsque la végétation couvre complètement le sol. Toutefois, des recherches sont nécessaires pour préciser le lien entre K_a et ETP. Nous tenterons donc de choisir

une courbe de K_a en fonction de la classe texturale du sol. Nous avons identifié à la figure 6.9 les zones des courbes d'assèchement rencontrées dans la littérature pour des sables, des limons et des argiles. Ces zones ont été délimitées en utilisant les courbes d'assèchement tirées de Baier et al. (1979) (figure 3.1), et les courbes de rétention d'eau tirées de Skinner (1976) (voir figure A.4 a) et de Haise et Hagan (1967) en assumant dans ce dernier cas que le coefficient d'assèchement du sol est proportionnel au logarithme de la tension de l'eau du sol (Dubé, 1987) et varie entre 0 et 1 entre la teneur en eau au point de flétrissement (-1500 KPa) et la teneur en eau à la capacité au champ (-33 KPa). Nous avons ensuite ajusté le paramètre α de l'équation 6.2 tirée de Minhas et al. (1974) pour représenter les différents types de sols.

$$K_a = \frac{(1 - \exp(-\alpha \text{ RU}))}{(1 - 2 \exp(-\alpha) + \exp(-\alpha \text{ RU}))} \quad (6.2)$$

Les courbes montrant l'évolution de K_a en fonction de la réserve utile (RU) sont illustrées à la figure 6.9 pour un sable ($\alpha=10$), un loam sableux ($\alpha=6$), un loam ou un loam sablo-argileux ($\alpha=3,5$), un loam argileux ($\alpha=2$) et une argile ($\alpha=0,5$). La courbe représentant l'équation 3.5 utilisée pour les simulations précédentes est également illustrée. Nous utiliserons la relation 6.2 pour la modélisation à cause de sa plus grande flexibilité et de son adaptabilité à différents types de sol.

Une fois le mode de calcul de l'ETP choisi et les valeurs de K_a fixées, les coefficients culturaux (K_{CO}) peuvent être ajustés de façon à obtenir des valeurs d'ETR simulées voisines des valeurs mesurées entre deux séquences sans pluie. Notons que si l'ETP calculée et le K_a choisi sont surestimés, les valeurs de K_{CO} devront être plus faibles pour simuler adéquatement les déficits hydriques. Dans notre cas, comme les valeurs d'ETR sont trop élevées et que l'estimation de K_a et d'ETP ne peut être améliorée de façon significative compte tenu de l'état des connaissances actuelles, les valeurs des coefficients culturaux devront être diminués pour optimiser les résultats. L'absence de mesures indépendantes de K_{CO} à l'aide de lysimètres ou sous des conditions contrôlées (en serre) ne permet pas de valider

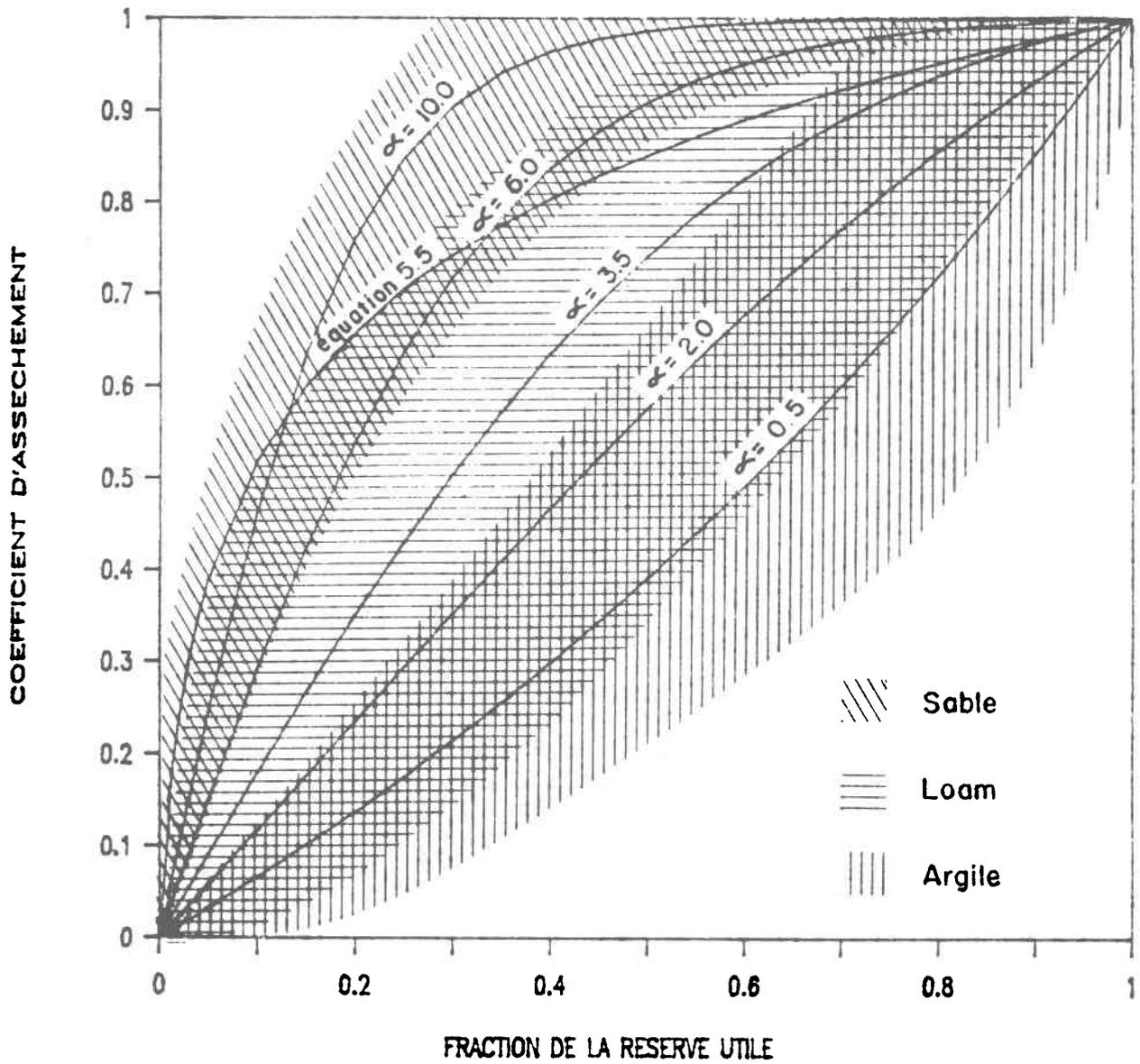


Figure 6.9 Zones des courbes d'assèchement trouvées dans la littérature pour des sables, des limons et des argiles, et courbes retenues pour représenter un sable ($\alpha=10$), un loam sableux ($\alpha=6$), un loam ou un loam sablo-argileux ($\alpha=3,5$), un loam argileux ($\alpha=2$) et une argile ($\alpha=0,5$) à l'aide de l'équation 6.1.

les coefficients choisis pour les cultures considérées. Toutefois, la forme de la courbe de Kco en fonction du stade végétatif telle que décrite par la relation 3.4 a été vérifiée pour la culture de la pomme de terre aux États-Unis et peut être conservée pour le Québec en utilisant des constantes appropriées à nos conditions.

Le coefficient E_w utilisé pour tenir compte du surplus d'évapotranspiration après une pluie (lorsque la surface du sol est mouillée) peut conduire à des valeurs d'ETR trop élevées surtout pour la culture de la fraise puisque cette culture a un coefficient cultural inférieur à 0,9 pour toute la saison et que les sites étudiés contiennent un paillis entre les rangs qui contribue à réduire l'ETR. L'algorithme décrit par la relation 3.3 a été développé en Idaho pour la culture du maïs dont le coefficient cultural évolue davantage comme celui de la pomme de terre (voir figure 2.7). Notons qu'une erreur causée par cet algorithme sera d'autant plus importante que la fréquence des précipitations est élevée. Comme nous ne disposons pas de données pour calibrer les paramètres de cet algorithme pour les deux cultures considérées, nous comparerons les résultats obtenus avec cet algorithme et sans celui-ci.

Comme nous ne disposons pas de mesures de la pluie tombée sur les sites à une fréquence inférieure à une journée, nous conserverons la méthode du SCS pour évaluer la pluie infiltrée en déterminant les valeurs d'abstraction initial (I_a) donnant les meilleurs résultats moyens pour chaque site. Le cas limite où il n'y a jamais de ruissellement pourra être considéré.

Dans la section suivante, nous étudierons dans un premier temps la sensibilité du modèle aux principaux paramètres entrant dans le calcul du déficit journalier. Puis nous ajusterons les valeurs des paramètres et des variables critiques du modèle pour obtenir un résultat acceptable.

CHAPITRE 7

ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE ET AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES

7. ÉTUDES DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE ET AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES

Dans le présent chapitre, nous présenterons d'abord les principaux résultats de l'étude de la sensibilité de la réponse du modèle à ses différentes composantes ce qui sera utile pour l'ajustement du modèle. Dans un second temps, nous présenterons les modifications apportées au modèle ainsi que les résultats obtenus suite à l'ajustement de ses paramètres.

L'étude de sensibilité détaillée ainsi que les résultats intermédiaires ayant conduit à l'ajustement du modèle sont présentés à l'annexe F.

7.1 Sensibilité de la réponse du modèle à ses composantes

Les composantes du modèle ayant fait l'objet d'une étude de sensibilité sont les caractéristiques de rétention en eau du sol, la profondeur d'enracinement, le déficit initial, le paramètre contrôlant l'infiltration (I_a) ainsi que les termes entrant dans le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) dont l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée à l'aide de la formule de Penman.

La sensibilité de la réponse du modèle à ses composantes a été évaluée sur une base graphique à l'aide des sites BLOP1 (été 1986) pour la culture de la pomme de terre et GOSF1 (été 1985) pour la culture de la fraise en utilisant les simulations présentées au chapitre précédent comme référence (figures F.1 à F.5, pages 255, 257 à 259, et 261). La sensibilité de l'équation de Penman a été évaluée à l'aide d'un critère numérique, soit la sensibilité relative (équation F.1, page 253), en utilisant les données météorologiques de l'aéroport de Québec pour le mois de juin 1986 (tableau F.1, page 264).

L'étude montre qu'une erreur sur les caractéristiques de rétention en eau du sol ou sur la profondeur d'enracinement de la culture influence beaucoup le déficit exprimé en pourcentage de la réserve utile qui indique quand irriguer, mais influence peu le déficit exprimé en millimètres qui indique la hauteur d'eau à appliquer. Par contre, un

biais dans l'évaluation de l'ETR, de I_a ou du déficit initial n'a une influence que sur le déficit exprimé en millimètres.

On observe de plus que le modèle est moins sensible à une erreur sur la profondeur d'enracinement qu'à une erreur sur la réserve en eau utile du sol. Il est également important de noter qu'une erreur d'évaluation de la teneur en eau à la capacité au champ a deux fois plus d'influence sur les déficits mesurés que sur les déficits calculés par le modèle. Ceci rend plus difficile la calibration du modèle à cause de la difficulté d'évaluer ce paramètre (voir chapitre 4).

Pour le site étudié, la réponse du modèle n'a pas été affectée par une variation du déficit initial en eau du sol. Il est à noter toutefois que pour ce site, une pluie importante s'est produite le lendemain de la date du déficit initial. Ce résultat présente un intérêt pour la mise en marche du modèle.

Le modèle est peu sensible à une variation de l'indice contrôlant l'infiltration (I_a) dans la zone des valeurs choisies pour les sites à partir du tableau 3.1, ces valeurs provoquant peu de ruissellement. Par contre, lorsque des valeurs provoquant davantage de ruissellement sont choisies, le modèle devient très sensible à ce paramètre en particulier suite à des pluies importantes.

A cause de l'importance de l'évapotranspiration réelle dans le calcul du déficit journalier, nous avons étudié le comportement de ses diverses composantes, soient le coefficient d'assèchement, le coefficient cultural de base (K_{co}), l'algorithme calculant le surplus d'évapotranspiration après une pluie (E_w) et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Le biais entraîné par une mauvaise évaluation du coefficient d'assèchement (calculé à l'aide de la relation 6.2) se maintient à un niveau acceptable pour les types de sol rencontrés dans notre étude.

Le modèle est sensible à une variation du coefficient cultural de base. Une valeur trop élevée pour ce paramètre peut être à l'origine de l'ETR trop élevée obtenue après la date de couverture totale pour la culture de la pomme de terre et au cours de tout l'été pour la culture de la fraise.

Des simulations réalisées en négligeant le surplus d'évapotranspiration suite à une pluie montrent que ce terme est important pour la culture de la pomme de terre uniquement avant la date de couverture totale alors qu'il est important durant toute la saison pour la culture de la fraise. Or, l'algorithme servant au calcul de E_w est relié à K_{co} et a été développé pour la culture du maïs dont le coefficient cultural suit l'évolution présentée à la figure 2.7 comme la culture de la pomme de terre. Puisque le coefficient cultural de la fraise ne suit pas cette évolution, nous avons choisi de ne pas utiliser cet algorithme pour cette culture.

On observe finalement qu'un biais sur l'évaluation de l'ETP influence davantage le déficit calculé que le même biais sur le coefficient cultural de base ce qui montre l'importance d'évaluer cette composante avec une précision adéquate. L'étude de l'équation de Penman montre que pour les sites étudiés, les erreurs sur les données météorologiques utilisées vont agir dans des sens différents ce qui fait que le biais sur l'ETP calculé se maintiendra à un niveau acceptable. Ce biais pourra être corrigé en bonne partie au niveau de l'ETR suite à l'ajustement des coefficients culturaux.

7.2 Ajustement des paramètres du modèle

L'ajustement des paramètres du modèle étudié s'est fait en trois étapes. D'abord, une série de simulations a été réalisée en tenant compte des modifications apportées au modèle. Ainsi, le coefficient d'assèchement a été calculé en considérant le type de sol de chaque site (équation 6.9), et le terme calculant le surplus d'évapotranspiration n'a pas été considéré pour la culture de la fraise. Une seconde série de simulations a visé à ajuster le coefficient cultural

de base de façon à calculer correctement l'ETR. Les valeurs de I_a choisies à partir du tableau 3.1 ont été conservées, l'ajustement de ce paramètre n'ayant pas été justifié. Finalement, à cause de la forte sensibilité des déficits mesurés à une erreur sur la teneur en eau à la capacité au champ et de l'imprécision élevée rattachée à cette mesure, nous avons ajusté cette caractéristique du sol de façon à minimiser le biais entre les déficits mesurés et calculés.

Notons que l'ajustement des paramètres du modèle est partielle dû à l'impossibilité de coupler le programme dans sa forme actuelle à un sous-programme d'optimisation.

Les résultats de la dernière série de simulations sont présentés au tableau F.4 (page 271) ainsi qu'aux figures F.6 à F.10 (pages 272 à 276) pour tous les sites étudiés. Les simulations réalisées donnent de bons résultats pour l'ensemble des sites cultivés en pommes de terre et en fraises sur l'île d'Orléans alors qu'aux deux autres localités, les résultats pour les sites cultivés en pommes de terre sont acceptables dans la moitié des cas.

CHAPITRE 8

RECOMMANDATIONS POUR L'UTILISATION DU MODÈLE AU
CHAMP EN TEMPS RÉEL POUR FINS DE GESTION DE L'IRRIGATION

8. RECOMMANDATIONS POUR L'UTILISATION DU MODÈLE AU CHAMP EN TEMPS RÉEL POUR FINS DE GESTION DE L'IRRIGATION

Dans les chapitres précédents, nous avons traité de l'ajustement du modèle à partir de données historiques pour des sites sur lesquels un certain nombre de relevés de sol ont été effectués. Pour utiliser le modèle pour fins de gestion de l'irrigation en temps réel sur des nouveaux champs, il faut d'abord déterminer les caractéristiques de rétention en eau du sol considéré ainsi que ses caractéristiques d'infiltration. Les coefficients culturaux ainsi que les dates approximatives des différents stades de développement doivent être connus. Le choix des caractéristiques du sol et des cultures devra être effectué en tenant compte de la variabilité spatiale à l'intérieur d'un champ. Il faut en effet être conscient que le modèle a été ajusté pour des sites de faible dimension et qu'il devra prévoir les besoins en irrigation pour un champ complet. Finalement, des données météorologiques journalières ainsi que des mesures des précipitations sur le champ et des hauteurs d'eau appliquées par irrigation devront être obtenues. Une fois le modèle démarré pour un champ donné, une vérification périodique du déficit calculé devra être effectuée. De plus, il faudra préciser à partir de quel pourcentage d'épuisement de la réserve en eau utile du sol il faudra irriguer pour une culture rendue à un stade de développement donné en tenant compte de la précision du modèle.

Mise en marche du modèle

Le champ considéré devra dans un premier temps être divisé en zones homogènes au niveau des caractéristiques de rétention en eau du sol s'il contient plusieurs type de sols, et au niveau de la culture considérée et de son stade de développement si le semis est effectué à des dates différentes. Si le champ est parfaitement homogène au niveau du sol, de la culture et de l'application d'eau par irrigation, les besoins en eau de la culture seront les mêmes partout et une seule prédiction pourra s'appliquer à toute l'étendue.

Les caractéristiques de rétention en eau du sol d'une zone homogène devront être évaluées au moins sur la profondeur d'enracinement

maximale de la culture à irriguer. Le cas idéal consistera à creuser une fosse à un endroit représentatif d'une zone homogène et à prélever des échantillons le long du profil qui serviront à déterminer en laboratoire la granulométrie du sol, son contenu en matière organique, sa densité apparente et sa teneur en eau à la capacité au champ (-10 à -33 kPa) et au point de flétrissement (-1500 kPa). Comme l'évaluation en laboratoire des teneurs en eau caractéristiques peut être erronée surtout lorsque le nombre d'échantillons est faible, il est recommandé d'évaluer également ces teneurs en eau à partir de la littérature (figure 2.1) en connaissant la classe texturale et le taux de matière organique des différents horizons de sols considérés. Pour l'ajustement final du modèle, les teneurs en eau à la capacité au champ retenues sont dans l'ensemble voisines de la moyenne entre les valeurs mesurées en laboratoire à -33 kPa et celles évaluées à partir de la figure 2.1 tirée de la littérature. De plus, les teneurs en eau au point de flétrissement ont été fixés à 50% de la teneur à la capacité au champ retenue dû à la fréquence élevée des évaluations erronées en laboratoire.

Si le producteur désire utiliser le modèle sans réaliser d'échantillonnage, il devra connaître la classe texturale de son sol sur la profondeur explorée par la majorité des racines de la culture lorsqu'elle est à son développement maximal. La teneur en eau à la capacité au champ pourra être estimée à partir de la littérature en connaissant le taux de matière organique du sol considéré, celui-ci étant généralement déterminé lors de l'analyse des besoins en fertilisant du sol. La réserve utile (en mm/m) sera alors calculée en utilisant d'une part un point de flétrissement égal à 50% de la capacité au champ et d'autre part la densité apparente présentée au tableau 2.1 pour divers types de sols. Notons que pour les sites étudiés, la densité apparente mesurée pour les types de sols rencontrés correspondait davantage au seuil inférieur de la gamme présentée au tableau 2.1. Il est également bon de mentionner que les sols présentant un fort pourcentage de matière organique ont une densité apparente plus faible. Une fois le type de sol de l'horizon de surface identifié, il faudra choisir une valeur de α (figure 6.9) qui servira à détermi-

ner le coefficient d'assèchement pour le calcul de l'évapotranspiration réelle.

Les caractéristiques des cultures devant être connues au départ sont la profondeur d'enracinement minimal et maximal, les dates correspondant aux différents stades de développement de la culture ainsi que les coefficients culturaux rattachés à ces stades de croissance. Lors des simulations présentées précédemment, la profondeur d'enracinement pour la culture de la pomme de terre a varié entre 0,1 m et 0,4 m tandis que pour la culture de la fraise, elle a été considérée constante au cours de la saison et égale 0,2 m. Notons que ces profondeurs varient suivant les conditions d'humidité et de résistance mécanique du sol, et selon les variétés de plantes cultivées. Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent la gamme de variation des profondeurs maximales d'enracinement pour les cultures les plus rencontrés. Les dates correspondant aux différents stades de développement des cultures varient entre les régions. Pour une région, ces dates varient d'une année à l'autre selon les conditions climatiques et les dates de semis. Par contre, des moyennes sur plusieurs années permettront de mettre le modèle en marche. Le fonctionnement du modèle nécessite la date de semis ainsi que la date de couverture totale de la culture. Pour la pomme de terre, le recouvrement total du sol par la culture correspond à la fin de la floraison et se produit à la fin du mois de juillet pour la région de Québec. Le tableau 6.1 présente les dates retenues pour les sites étudiés. Les coefficients culturaux (K_{co}) sont calculés à l'aide de facteurs qui diffèrent avant et après la date de couverture totale pour les cultures qui suivent l'évolution présentée à la figure 2.7. Il faut connaître entre autre les valeurs minimales et maximales de K_{co} au cours d'une saison de culture et la valeur des coefficients A, B, C et D avant et après la date de couverture totale. Les valeurs retenues lors des dernières simulations sont présentées au tableau 8.1 pour les cultures de la pomme de terre et de la fraise.

L'indice contrôlant l'infiltration (I_a) sera choisi à l'aide du tableau 3.1 en tenant compte des conditions du sol et de l'arrangement cultural. Lors de la modélisation, ce paramètre a varié entre 7 et 14 pour les sites étudiés, la valeur de I_a étant plus faible lorsque les conditions favorisent le ruissellement.

Tableau 8.1 Facteurs servant à calculer le coefficient culturel de base pour la culture de la pomme de terre et de la fraise au cours d'une saison de croissance pour le Québec.

CULTURE	FACTEUR	Kco			
		avant couverture totale	après couverture totale	min.	max.
Pomme de terre	A	3	$-1,425 \cdot 10^{-6}$	0,1	1,1
	B	-2,6	$2,625 \cdot 10^{-4}$		
	C	0,85	-0,020		
	D	0,1	1,028		
Fraise	A	0	0	0,4	0,5
	B	0	0		
	C	0	0		
	D	0,5	0,5		

Le fonctionnement du modèle nécessite également l'acquisition de données météorologiques journalières. Les données nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP), soit les températures et humidités relatives minimums et maximums, la durée d'ensoleillement, et la vitesse du vent à 10 m de hauteur, peuvent être obtenues des stations météorologiques les plus rapprochées. Les mêmes paramètres entrant dans le calcul de l'ETP (constantes servant au calcul de R_n et de $f(U)$) ont été retenus pour les trois localités ayant fait l'objet de notre étude. Ces paramètres ne peuvent être modifiés par l'utilisateur du programme dans sa forme actuelle et seront utilisés pour toutes les régions agricoles du Québec. Des recherches supplémentaires seraient nécessaires pour adapter ces paramètres aux différentes régions. Les précipitations journalières, par contre, devront être mesurées à proximité de chaque champ, et le producteur devra accorder une attention particulière au relevé de ces dernières. En effet, l'utilisation de données de localités voisines pour remplacer des précipitations au champ manquantes peut être hasardeuse. Dans les cas où c'est possible, l'acquisition des précipitations horaires peut permettre une meilleure évaluation de la hauteur de pluie ruisselée. La hauteur d'eau d'irrigation appliquée sur chaque zone homogène devra être mesurée par le producteur à l'aide de jauges pluviométriques installées à différents endroits représentatifs.

Pour mettre le modèle en marche, il faut également connaître le déficit en eau du sol par rapport à la capacité au champ la journée où l'on désire mettre le programme en marche. Une méthode ne nécessitant pas d'échantillonnage de sol consiste à mettre le modèle en marche la date qui précède une pluie supérieure à la réserve en eau utile du sol sur la profondeur d'enracinement de la culture. On choisira alors une valeur de déficit initial égal à zéro. Cette méthode exige de commencer à relever les pluies journalières un peu avant la date de mise en marche du modèle. En l'absence de pluies abondantes en début de saison, environ sept échantillons par zones homogènes sur la profondeur d'enracinement devront être prélevés pour évaluer le déficit en eau initial du sol.

Mise à jour du modèle

Le modèle a été ajusté pour les sites étudiés à partir de relevés périodiques (2 à 3 fois par semaine) du niveau d'humidité du sol. Or, on observe des biais importants du déficit calculé par le modèle pour certains sites à différents moments au cours de la saison de croissance, et ceci même après l'ajustement final du modèle.

Comme une évaluation erronée du déficit d'une journée donnée se répercute sur les jours suivants, il devient nécessaire d'effectuer une vérification périodique du déficit en eau du sol. Celle-ci pourra s'effectuer durant la période correspondant au stade de croissance où la culture suivie est la plus sensible à un manque d'eau. Le relevé aura avantage à être effectué une journée après une pluie importante ce qui permettra d'obtenir une approximation de la teneur en eau à la capacité au champ du sol considéré, en plus de connaître avec plus de précision la contribution de la pluie au bilan en eau. Les échantillons devront être pris au nombre de quatre à sept par zone homogène sur la profondeur de sol explorée par les racines et sur le sommet d'un billon à proximité d'un plant (pour les cultures sur billons). De plus, l'échantillonnage devra être effectué de préférence durant la même période de la journée, soit en fin d'avant-midi ou en début d'après-midi. Pour la calibration de la sonde à neutrons, l'échantillonnage était effectué à l'aide d'un tuyau de 0,05 m de diamètre marqué à tous les dix centimètres pour indiquer la profondeur d'échantillonnage. Celui-ci était enfoncé dans le sol avec une masse. Cette technique pourrait être utilisée par un producteur à cause de sa simplicité.

Notons que la mise à jour du modèle permettra de corriger des erreurs causées par des oublis dans la lecture des précipitations journalières, par une mauvaise évaluation de la pluie ruissellée ou de l'évapotranspiration réelle, ou encore par une mauvaise évaluation de la hauteur d'eau appliquée par irrigation. Le modèle pourra être mis à jour en continuant les calculs à l'aide du nouveau déficit initial mesuré s'il diffère de celui calculé par le modèle pour la même date.

Choix du moment propice à l'irrigation et de la hauteur d'eau à appliquer

Le modèle permet de calculer pour chaque journée le déficit exprimé en pourcentage de la réserve utile ainsi que le déficit en eau du sol par rapport à sa teneur en eau à la capacité au champ exprimé en millimètres. La première valeur donne une indication du moment propice à l'irrigation tandis que la seconde indique la hauteur d'eau à appliquer. Toutefois, un certain délai doit être prévu pour l'acquisition des données météorologiques servant au calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Ce délai pourra être de plus d'une journée lorsque la réserve en eau du sol est assez élevée.

Le modèle étudié (Penel, 1984) comprend également une composante permettant de calculer dans combien de jours la culture aura besoin d'un apport d'eau s'il ne pleut pas (équation 3.18a). L'ETP est estimée pour les jours à venir à l'aide de la relation 3.18b en utilisant des coefficients adaptés aux conditions du Québec.

La relation 3.18a tient compte, de plus, de la réserve facilement utilisable par la culture (RFU). Or ce seuil est généralement exprimé en pourcentage de la réserve utile et indique le moment propice à l'irrigation. Une RFU égale à 50% de la réserve utile est souvent utilisée pour indiquer le moment de l'irrigation, mais la proportion de la réserve utile du sol facilement utilisable par la plante varie d'une culture à l'autre et, pour une culture donnée, en fonction du stade de développement de la plante. Le tableau 2.3 indique la fraction de la réserve utile facilement utilisable par la plante pour différentes cultures. Ainsi, pour la culture de la pomme de terre, 25% de la réserve utile est facilement utilisable contre 15% pour la culture de la fraise (Doorembos et Pruitt, 1977). Ceux-ci indiquent que la pomme de terre aurait besoin d'irrigation chaque fois que le déficit dépasse 25%. Or, ceci n'est pas vrai durant toute la saison. Il faut en plus tenir compte du stade de maturité de la culture et identifier les périodes où un manque d'eau peut être le plus dommageable. Le tableau 2.4 tiré de Payen (1982) identifie les périodes critiques pour différentes cultures au point de vue de la

demande en eau. Ainsi, la culture de la pomme de terre est plus sensible à un manque d'eau après la tubérisation (de la floraison à la récolte), et la culture de la fraise est plus sensible du début du développement du fruit jusqu'à la maturation.

Ainsi, les cultures pourront être irriguées lorsqu'une faible proportion de la réserve utile est épuisée en période de forte sensibilité à un manque d'eau tandis qu'on pourra tolérer un plus fort épuisement de la réserve utile en période moins critique.

Des recherches sont encore nécessaires pour préciser le lien entre la durée, l'intensité et le moment où se produit un déficit en eau, et les diminutions de rendement et de qualité de différentes cultures attribuables à ce déficit. Une meilleure connaissance de ce lien permettra de mieux quantifier les augmentations de rendement escomptées suite à une irrigation. Ainsi, la décision d'irriguer ou non pourra être prise en considérant non seulement le pourcentage de déficit atteint, mais également le bénéfice net escompté compte tenu du prix de vente de la culture et des coûts associés à l'irrigation (coût de l'eau; coûts de l'énergie, de l'équipement et de la main d'oeuvre). Dans le cas où l'eau pour l'irrigation est limitée, il pourra être avantageux de tolérer un stress hydrique à un stade cultural moins critique pour conserver les réserves en eau pour un stade de croissance plus critique. Par contre, dans le cas des étangs de ferme où les pertes d'eau par évaporation peuvent être importantes, on pourra examiner s'il est plus avantageux d'appliquer l'eau plus tôt sur le sol. Une décision optimale d'irriguer ou non pourra également tenir compte de l'erreur possible sur les déficits calculés par le modèle, des prévisions météorologiques au point de vue des précipitations ainsi que des maladies et insectes associés aux déficits hydriques ou aux surplus d'eau du sol.

La décision du moment du début de l'irrigation devra nécessairement tenir compte des superficies totales à irriguer et de la capacité du système d'irrigation qui détermine le temps requis pour irriguer un champ. Le producteur devra tenir compte du déficit du sol atteint pour les parcelles irriguées en dernier.

CHAPITRE 9

CONCLUSION

9. CONCLUSION

Ce dernier chapitre présente une synthèse des principales conclusions consécutives à la mise au point du modèle de gestion de l'irrigation étudié et formule des recommandations pour des travaux ultérieurs.

Dans un premier temps, nous avons dressé un bilan de la situation de l'irrigation au Québec qui a fait ressortir l'importance des superficies potentiellement irrigables et les besoins d'un outil de gestion approprié pour les superficies actuellement irriguées. Le modèle de gestion de l'irrigation sur micro-ordinateur développé par le Service du génie du MAPAQ offre un potentiel intéressant.

Une revue de la littérature sur les propriétés physiques et hydrauliques des sols et sur les besoins en eau des cultures a servi de base aux décisions rattachées à l'utilisation du modèle de gestion de l'irrigation.

Les composantes du modèle étudié ont été décrites et comparées à celles d'autres modèles existants. On a pu observer une forte similitude entre les divers modèles dans le mode de calcul de l'évapotranspiration réelle. De plus, la formule de Penman est la plus couramment utilisée pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle journalière. Par contre, le mode d'évaluation de la hauteur de pluie ruisselée diffère entre les modèles étudiés. L'utilisation de la méthode des numéros de courbes de ruissellement (RCN) peut sembler douteuse puisqu'elle a été conçue pour des petits bassins versants et non pour des parcelles. Par contre, celle-ci a été conçue pour utiliser des données de pluies journalières, et les données pluviométriques servant à l'ajustement du modèle ont été mesurées à cette fréquence.

Des sites expérimentaux ont été implantés à trois localités au Québec de façon à valider le modèle pour la culture de la fraise et de la pomme de terre. Un suivi du niveau d'humidité du sol sur chaque parcelle a été réalisé au cours de deux étés successifs à un intervalle

de 2 à 5 jours. Les arrangements cultureux ainsi que les propriétés physiques des sols ont été décrits de façon détaillée pour chaque site. Cette description a fait ressortir la difficulté d'évaluer avec précision les teneurs en eau caractéristiques pour les sols étudiés ainsi que la forte variabilité entre les méthodes utilisées pour leur évaluation. On observe également que les sols de l'Ile d'Orléans possèdent une proportion importante de matériaux ayant un diamètre supérieur à deux millimètres.

Les relevés du niveau d'humidité du sol ont été réalisés sur deux sites pour chaque champ étudié. Leur analyse révèle qu'il existe une forte variabilité entre les mesures d'un même site alors que le niveau d'humidité moyen entre deux sites sur un même champ varie très peu si la classe texturale des sols est la même aux deux endroits. Le suivi du degré d'humidité du sol a été réalisé par thermogravimétrie pour les sites de Baie-Comeau et de Notre-Dame-de-la-Paix alors qu'une sonde à neutrons a été utilisée à l'Ile d'Orléans. Suite à l'étude de l'erreur sur les mesures du niveau d'humidité du sol, on observe que l'intervalle de confiance à 95% est plus élevé pour les mesures réalisées à l'aide de la sonde à neutrons que pour celles réalisées par thermogravimétrie. Ceci est attribuable à l'erreur importante sur la courbe de calibration de la sonde à neutrons, cette erreur étant rattachée à l'hétérogénéité du sol sur l'Ile d'Orléans. L'étude montre également qu'on peut généralement regrouper deux sites d'un même champ pour une même profondeur ce qui contribue à améliorer la calibration de l'appareil.

Les simulations réalisées à l'aide du modèle de Penel (1984) dans sa formulation originale en utilisant les coefficients proposés par le même auteur ont conduit à une surévaluation de l'évapotranspiration réelle en fin de saison pour la culture de la pomme de terre et tout au long de la saison de végétation pour les sites cultivés en fraises. Ce biais peut provenir soit d'un mauvais choix de la fonction de vitesse de vent de la formule de Penman, d'une mauvaise évaluation du coefficient d'assèchement ou d'un mauvais choix des coefficients cultureux. Le modèle utilise une seule courbe d'assèchement pour tous

les types de sols ce qui peut entraîner un biais systématique de l'ETR. De plus, le choix d'un albédo constant pour toute la saison conduit à surestimer l'ETP en fin de saison pour la culture de la pomme de terre. La surestimation de l'ETR, pour la culture de la fraise peut provenir en partie de l'utilisation d'un algorithme calculant le surplus d'évapotranspiration suite à une pluie qui a été calibré en Idaho pour la culture du maïs. En effet, l'évolution du coefficient cultural de la fraise diffère de celui du maïs, et un paillis entre les rangs peut modifier l'ETR. Un biais important entre les déficits mesurés et calculés a également été observé pour plusieurs sites. De plus, l'exactitude du calcul de la pluie infiltrée est difficile à vérifier compte tenu de l'interaction des autres composantes. Comme des mesures d'évapotranspiration sur lysimètres n'étaient pas disponibles, il a été impossible de calibrer de façon indépendante les paramètres entrant dans le calcul de l'ETP et de l'ETR. De plus, l'absence de mesures d'albédo n'a pas permis de simuler l'évolution de ce paramètre au cours d'une saison pour les cultures étudiées. Suite aux observations précédentes, nous avons donc choisi de faire varier le coefficient d'assèchement en fonction du type de sol en regroupant les données de la littérature. De plus, l'algorithme de calcul du surplus d'évapotranspiration après une pluie n'a pas été utilisé pour la culture de la fraise.

Une étude de la sensibilité de la réponse du modèle à ses différentes composantes a permis d'observer l'effet des modifications apportées au modèle en plus d'étudier le comportement des variables à ajuster. On constate que l'algorithme calculant le surplus d'ET après une pluie influence la culture de la pomme de terre en début de saison uniquement alors que son effet est important en cours de toute la saison pour la culture de la fraise. On voit également que le modèle est peu sensible à une variation de l'indice d'infiltration (I_a) dans la zone des valeurs de départ choisies. Il est également intéressant de noter qu'une erreur d'évaluation de la teneur en eau à la capacité au champ a une influence deux fois plus grande sur les déficits mesurés que sur les déficits calculés par le modèle.

L'ajustement de l'évapotranspiration réelle a été réalisé en calibrant les coefficients culturaux. Il faut conserver à l'esprit que ces coefficients ont absorbé une partie des erreurs d'évaluation de l'ETP et des autres facteurs entrant dans le calcul de l'ETR. Le facteur d'infiltration (I_a) a été choisi de façon à provoquer peu de ruissellement et les valeurs de teneurs en eau à la capacité au champ ont été modifiées légèrement de façon à corriger le biais entre les valeurs mesurées et simulées. Notons que l'ajustement est partiel dû à l'impossibilité de coupler le programme dans sa forme actuelle à un sous-programme d'optimisation. Toutefois, les déficits simulés par le modèle se maintiennent pour la plupart des sites à l'intérieur des intervalles de confiance des déficits mesurés.

Le modèle de gestion de l'irrigation dans sa forme actuelle peut donc fournir une bonne indication des besoins en irrigation d'une culture pour différentes régions du Québec à l'aide de données météorologiques faciles à obtenir. Toutefois, le gestionnaire doit être conscient des dérives possibles du modèle ainsi que de l'évolution des besoins en eau de la culture au cours de la saison, une attention particulière devant être accordée aux périodes critiques au point de vue d'un stress hydrique.

Nous identifions finalement les différents points qui pourraient contribuer à améliorer la précision du modèle et faciliter la décision du producteur. Des mesures d'albédo pour différentes cultures au cours de la saison de production pourraient améliorer l'évaluation de l'ETP. La mesure des températures de l'air minimales et maximales journalières et de la vitesse du vent à proximité des champs aiderait à réduire le biais sur le calcul de l'ETP. Des mesures sur lysimètres permettraient de préciser la fonction de vitesse de vent pour les conditions du Québec. De plus, ces mesures aideraient à déterminer les coefficients servant au calcul de l'ETR (K_{co} , K_a , E_w) d'une façon plus rigoureuse. Finalement, des essais de ruissellement devraient être réalisés dans un champ cultivé à l'aide d'un simulateur de pluies, et un pluviomètre enregistreur devrait être installé à proximité d'un site expérimental. On pourrait ainsi évaluer l'intérêt de connaître la distribution horaire des pluies pour évaluer le ruissellement dans un

champ cultivé au cours d'une saison. Des recherches devraient également être entreprises pour préciser le lien entre le déficit en eau d'une culture et la baisse de rendement qui lui est associée de façon à préciser les seuils de déficits à utiliser au cours d'une saison pour l'irrigation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHUJA, L.R., NANEY, J.W. et WILLIAMS, R.D. (1985). Estimating Soil Water Characteristics from Simpler Properties or Limited Data. Soil Sci. Soc. Am. J., 49: 1100-1105.
- BAIER, W. et ROBERTSON, G.W. (1965). Estimation of latent evaporation from simple weather observations. Canadian journal of plant science, 51: 276-284.
- BAIER, W. et ROBERTSON, G.W. (1966). A new versatile soil moisture budget. Can. J. Plant Sci., 46: 299-315.
- BAIER, W. et ROBERTSON, G.W. (1968). The performance of soil moisture estimates as compared with the direct use of climatological data for estimating crop yields. Agric. Meteorol., 5: 17-31.
- BAIER, W., DYER, J.A. et SHARP, W.R. (1979). The versatile soil moisture budget. Tech. Bull. no 87, Agriculture Canada.
- BENTZ, A. (1983). Notes de référence, hydrodynamique des sols agricoles. Département des sols, Université Laval, Québec.
- BERNIER, R., GALLICHAND, J. et BROCHU, Y. (1983). Détermination de la teneur en eau des sols pour l'irrigation. Direction de l'hydraulique agricole, du machinisme et des constructions rurales, MAPAQ, Québec.
- BIDWELL, V.J. (1977). Selection and calibration of a water balance model for an irrigation trial. Information Series. New Zealand Department of Science and Industrial research, (126): 111-117.

- BOBEE, B. (1980). Méthodes statistiques appliquées aux sciences de l'eau. INRS-Eau, notes de cours, Québec.
- BOBEE, B. (1981). Relations linéaires entre deux variables. INRS-Eau, rapport interne No 78. Université du Québec.
- BOBEE, B. (1983). Méthodes statistiques appliquées aux sciences de l'eau. INRS-Eau, notes de cours, Québec.
- BOISVERT, J. et DYER, J.A. (1987). Le coefficient de sol dans les modèles empiriques de bilan hydrique. Can. Agric. Eng., 29: 7-14.
- BORG, H. et GRIMES, D.W. (1986). Depth Development of Roots with Time: An Empirical Description. Transactions of the ASAE, 29(1): 194-197.
- BRAKENSIEK, D.L. et al. (1979). Field Manual for Research Agriculture Hydrology, Agri-Handbook, USDA, Washington, (244): 505-528.
- BROCHU, Y. (1982). Zones et cultures irriguées au Québec, situation présente et perspectives. Dixième colloque de Génie Rural. Département de Génie Rural, Université Laval, Québec.
- BROCHU, Y. (1987). Communications personnelles.
- BRUTSAERT, W. (1982). Evaporation into the Atmosphere, Theory, History, and Applications. D. Reidel Publishing Company, Boston.
- BURMAN, R.D. et al. (1981). Irrigation management, water requirements and water balance. Irrigation. Challenges of the 80's, ASAE Publication 6-81: 141-153.

- CAMILLO, P.J. et GURNEY, R.J. (1984). A Sensitivity Analysis of a Numerical Model for Estimating Evapotranspiration. Water Resources Research, 20 (1): 105-112.
- CARDON, D. (1974). Analyse de la dispersion des mesures neutroniques: Application à la mesure de la variation du stock d'eau du sol sous deux graminées différentes. Dans: Isotope and Radiation techniques in soil physics and irrigation studies 1973, Vienne, pp. 71-83.
- CHANASYK, D.S. et MCKENZIE, R.H. (1986). Field calibration of a neutron probe. Can. J. Soil. Sci., 66: 173-176.
- COLLAS, P. et NORMAND, M. (1984). Résultats comparatifs obtenus avec plusieurs humidimètres à neutrons dans diverses conditions de sol. Article extrait du Bulletin du Groupe Français d'Humidimétrie Neutronique, (15): 1-22.
- COTE, D. (1982). Les façons culturales. Agdex 517 (sols), MAPAQ, CPVQ.
- COTE, D. (1987). Communications personnelles.
- DE BOODT, M. (1974). General Discussion. Dans: Isotope and Radiation techniques in soil physics and irrigation studies 1973, Vienne. pp. 85-86.
- DE JONG, R. et TUGWOOD, P.M. (1987). Comparaison of potential evapotranspiration models and some applications in soil water modeling. Can. Agric. Eng., 29:15-20.
- DOOREMBOS, J. et PRUITT, W.O. (1977). Crop water requirements. Publication no 24 FAO Irrigation et drainage. 144 p.
- DUBE, P.A. (1987). Communications personnelles.

- DUKE, H.R., BUCHLEITER, G.W. et HEERMANN, D.F. (1985). Evapotranspiration theory, The Meteorologic and Agronomic Theory Incorporated in the USDA ET Computation Program SCHED. USDA - Agricultural Research Service. CSU-Agricultural Engineering Research Center. Colorado State University.
- DYER, J.A. et MACK, A.R. (1983). The Versatile soil moisture budget (version three). Research Branch, Agriculture Canada, LRRRI Contribution no. 82-83.
- ENGLISH, M., GLENN, M. et VANSICKLE, J. (1981). Scheduling for optimum water use. Dans: Irrigation Scheduling for Water and Energy conservation in the 80's. Proceedings of the ASAE, pp. 60-71.
- FLUHLER, H., ATTINGER, W., EPELSHEIMER, H. et LEUENBERGER, J. (1973). Die Neutronensonde "Wallingford", Mod. 225. Soil-Phys. Dept., Eidg. Tech. Hochsch. (E.T.H.), Zurich.
- GALLICHAND, J. et BROCHU, Y. (1983). Irrigation, dosage et moment d'application. Direction de l'hydraulique agricole, du machinisme et des constructions rurales, MAPAQ, Québec.
- GREACEN, E.L., CORRELL, R.L., CUNNINGHAM, R.B. JOHNS, G.G. et NICOLLS, K.D. (1981). Calibration. Dans: Soil Water assessment by the neutron method, Div. of soil, CSIRO, ADELAIDE, 50-72.
- HAISE, H.R. et HAGAN, R.M. (1967). Soil, Plant and Evaporative measurement as Criteria for scheduling irrigation. Chap. 30 Dans: Irrigation of Agricultural land. R.M. Hagan et al. éditeurs, Monographie ASA no 11, Madison, Wisconsin.
- HALTINER, G.J. et MARTIN, F.L. (1957). Dynamical and physical meteorology. MAC GRA et HILL.
- HANSEN, V.E., ISRAELSEN, O.W. et STRINGHAM, G.E. (1980). Irrigation principles and practices. John Wiley and sons. New York.

HARNOIS, R. (1982). Historique de l'irrigation au Québec. Dixième colloque de Génie Rural. Département de Génie Rural, Université Laval, Québec.

HARRINGTON, G.J. (1981). Theory used by the irrigation scheduling computer program SPI, USDA. Fort Collins.

HARRINGTON, G.J. et HEERMAN, D.F. (1981). State of the art. Irrigation Scheduling computer program. Dans: Proc. ASAE conf. on irrigation scheduling: 171-178.

HATFIELD, J.L. (1981). Irrigation Scheduling with thermal infrared and spectral remote sensing. Dans: Irrigation Scheduling for Water and Energy conservation in the 80's. Proceedings of the ASAE. pp. 10-17.

HAUSER, V.L. (1984). Neutron Meter Calibration and Error Control. Transactions of the ASAE, 27 (3): 722-728.

HAVERKAMP, R., VAUCLIN, M. et VACHAUD, G. (1984). Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. Local Standpoint. Soil Sci., 137 (2): 78-90.

IRRIGATION OF AGRICULTURAL LANDS. (1967). R.M. HAGAN et al. (Eds.). Am. Soc. Agron. Monog. 11.

IRRIGATION SCHEDULING FOR WATER AND ENERGY CONSERVATION IN THE 80's. (1981). Proc. of the ASAE.

JACQUES, G. (1984). Communications personnelles, Environnement Québec.

LINSLEY, R.H., KOHLER, M.A. et PAULHUS, J.L. H. (1949). Applied hydrology. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 689 pp.

LIST, R. (1971). Smithsonian Meteorological Tables. Smithsonian institution press city of Washington, 6e edition.

- MASSIN, B. (1971). Les déficits hydriques au Québec. Ministère des Richesses Naturelles, Direction générale des eaux, service de la météorologie, gouvernement du Québec, 284 pp.
- MCCUEN, R.H. (1972). The role of sensitivity analysis in hydrologic modeling. *J. Hydrol.*, 18:37-53.
- MELANCON, E. (1982). Problèmes agronomiques liés à l'introduction de l'irrigation sur l'exploitation. Dixième colloque de génie rural. Département de Génie Rural, Université Laval, Québec.
- MERVA, G. et FERNANDEZ, A. (1985). Simplified Application of Penman's Equation for Humid Regions. *Transactions of the ASAE*, 28 (3): 819-825.
- MINHAS, B.S., PARIKH, K.S. et SRINIVAGAN, T.N. (1974). Toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. *Water Resources Research*, 10: 383-393.
- MOFFET, J. (1979). Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée. Service de l'hydrométrie, Ministère des Richesses Naturelles, Québec.
- NASH, J.E. (1969). A course of lectures on parametric or analytical hydrology. Great Lakes Institute. University of Toronto, Pr 38. Lecture no. 12.
- PAYEN, J. (1982). Climat du Québec: déficits hydriques et conduite des apports d'eau. Dixième colloque de Génie Rural. Département de Génie Rural, Université Laval, Québec.
- PENEL, M. (1984). Gestion informatisée de l'irrigation. Théorie et rapport de recherche expérimentale de première campagne. Direction de l'hydraulique agricole, du machinisme et des constructions rurales, MAPAQ.

- PENMAN, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London. A193: 120-145.
- PENMAN, H.L. (1963). Vegetation and Hydrology Tech Communication no. 53, Commonwealth Bur. of Soils, Harpenden, England, 125 pp.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L. et SAXTON, K.E. (1982). Estimation of Soil Water Properties. Trans. of the ASAE, 1316-1320, 1328.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L. et SONI, B., (1983). Agricultural management effects on soil water processes. Part I: Soil water retention and Green Ampt infiltration parameters. Trans. ASAE, 26 (6): 1747-1752.
- REMENIERAS, G. (1965). Hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles, Paris.
- SAINT-MARTIN, H. (1973). Etude journalière "in situ" du bilan hydrique au-dessus d'une nappe phréatique. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 172 p.
- SAXTON, K.E. (1975). Sensitivity analyses of the combination evapotranspiration equation. Agric. Meteorol., 15: 343-353.
- SCHUDEL, P. (1983). The accuracy of measurements of soil-water content made with a neutron-moisture meter calibrated gravimetrically in the field. Journal of hydrology, 62: 355-361.
- SHEARER, M.N. et VOMOCIL, J. (1981). Twenty five years of modern irrigation scheduling promotional efforts. Dans: Irrigation scheduling for Water and Energy conservation in the 80's. Proc. of the ASAE, pp. 208-212.
- SKAGGS, R.W., MILLER, D.E. et BROOKS, R.H. (1980). Soil water, chap. 4 Dans: Design and operation of farm irrigation systems. M.E. Jensen editeur, Monographie no 3 ASAE.

- SKINNER, R.E. (1976). Tensiometers and electrical resistance meters for scheduling Irrigation. Bull. 798. Coop. Ext. Scriv. University of Georgia Coll. of Agric.
- STOCKER, R.V. (1984). Calibration of neutron moisture meters on stony soils (note). Journal of Hydrology (N.Z.), 23 (1): 34-36.
- THERIEN, M., BERNIER, M., LAFRAMBOISE, P. et DESMARAIS, C. (1985). Potentiel d'application des données du capteur Thematic Mapper en Agriculture au Québec. MAPAQ, CCT et Centre Québécois de Coordination de la Télédétection.
- TOLINER, E.W. et MOSS, R.B. (1985). Neutron probe vs tensiometer vs moisture for monitoring soil moisture status. ASAE Paper no. 85-2513, ASAE, St-Joseph, MI 49085.
- VACHAUD, G., ROYER, J.M. et COOPER, J.D. (1977). Comparison of methodes of calibration of a neutron probe by gravimetry or neutron-capture model. Journal of Hydrology, 34: 343-356.
- VAUCLIN, M., HAVERKAMP, R. et VACHAUD, G. (1984). Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 2. Spatial stanpoind. Soil Sci., 137 (3): 141-148.

ANNEXE A

**RAPPELS SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET
HYDRAULIQUES DES SOLS**

A. RAPPELS SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET HYDRAULIQUES DES SOLS

A.1 Propriétés physiques

Un volume donné de sol agricole est formé de substances solides et d'une certaine proportion d'eau et d'air occupant les vides (figure A.1). Ces composantes permettent de définir la structure, la texture et l'expression de la teneur en eau des sols.

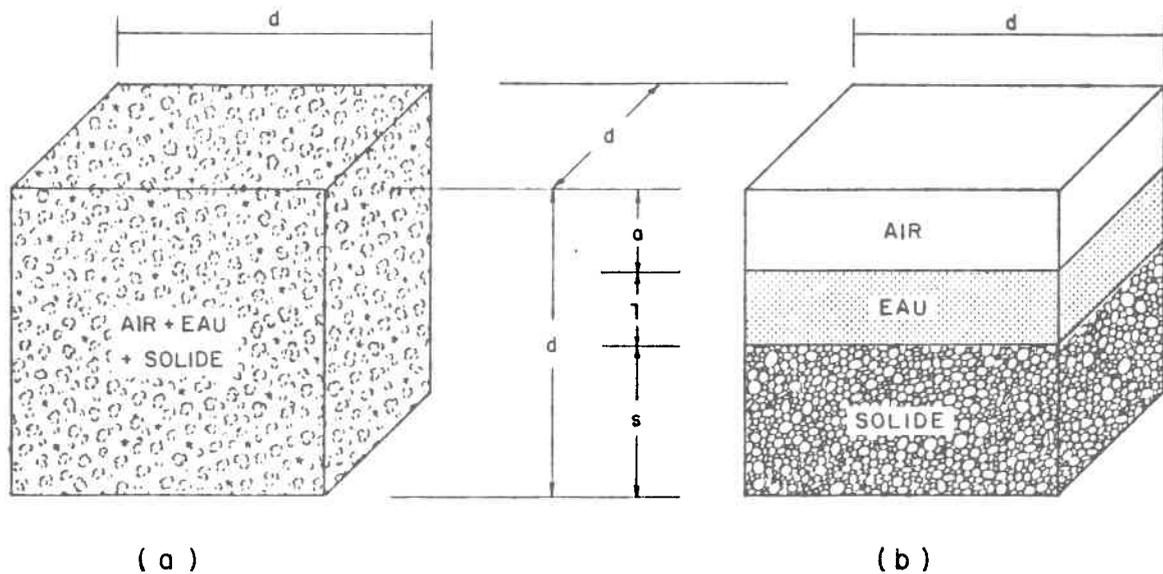


Figure A.1 Volume apparent de sol tel qu'on le voit en réalité (a) et tel qu'on le verrait si on pouvait faire la séparation de ses trois composantes (b) (tiré de Bentz, 1983)

Structure et texture du sol

L'arrangement des particules solides d'un sol constitue sa structure. Celle-ci varie avec les cycles de gel et dégel et est influencée par l'activité bactérienne se déroulant à l'intérieur du sol. Rawls et al. (1983) montrent que les pratiques culturales pour le travail du sol ont un effet important sur la porosité des sols à textures fines. Les conditions d'humidité du sol lorsque l'on fait des travaux ainsi que la pression qu'on lui applique avec la machinerie ont un effet important sur les modifications de structure du sol. La structure d'un sol est intimement liée à sa masse volumique apparente (D_a) et au taux de matière organique qu'il contient.

La masse volumique apparente d'un échantillon de sol est le rapport entre la masse sèche (M_s) et le volume apparent (V) occupé par le sol tel qu'exprimé par l'équation A.1. Pour les sols cultivés, cette caractéristique est très variable. Elle se situe généralement

$$D_a = \frac{M_s}{V} \quad (A.1)$$

près de $1,3 \text{ Mg/m}^3$ dans les sols minéraux non compactés alors qu'elle varie entre $0,065$ et $0,13 \text{ Mg/m}^3$ pour les terres organiques (Bentz, 1983). La densité apparente d'un sol vierge tend à augmenter régulièrement avec la profondeur. En sol cultivé cependant, on rencontre une couche plus dense appelée "semelle de labour" à une profondeur variant entre 30 et 45 cm (figure A.2). Cette couche se forme suite à une modification de la structure causée par les pressions exercées au sol lors des travaux culturaux principalement lorsque le taux d'humidité est élevé.

Le taux de matière organique d'un échantillon de sol est généralement évalué en mesurant le pourcentage de carbone qu'il contient. Cette matière provenant de la décomposition de débris végétaux contribue à maintenir une bonne aération du sol tout en augmentant sa capacité de rétention en eau.

La texture d'un sol est généralement reliée à sa composition. Le triangle textural de classification des sols présenté à la figure A.3 permet d'associer un sol à une classe texturale à partir du pourcentage de sable, de limon et d'argile contenu dans la fraction du sol ayant un diamètre inférieur à 2 mm.

Les particules de sol ayant un diamètre supérieur à 2 mm contiennent peu d'eau utilisable par les plantes. Les particules de sable, par contre, en contiennent davantage, mais ce sont les particules limoneuses et surtout argileuses qui permettent au sol de retenir un volume appréciable d'eau utile pour les plantes.

Les sols agricoles peuvent également contenir certaines substances comme le fer, le chlore, le bore, le manganèse et l'aluminium qui peuvent être utiles ou nuisibles aux plantes suivant leur concentration. Les sols contiennent en quantités plus importantes d'autres éléments essentiels à la croissance des plantes comme l'azote, le phosphore, le potassium et le calcium.

Expression de la teneur en eau du sol

La teneur en eau des sols agricoles est généralement exprimée soit sur une base pondérale ou sur une base volumique. En connaissant la densité apparente du sol, on passe de la base pondérale à la base volumique. Ainsi, on obtient une indication de la hauteur d'eau contenue dans le sol.

Nous préciserons les expressions utilisées pour quantifier l'eau contenue dans un volume de sol donné, d'après Bentz (1983).

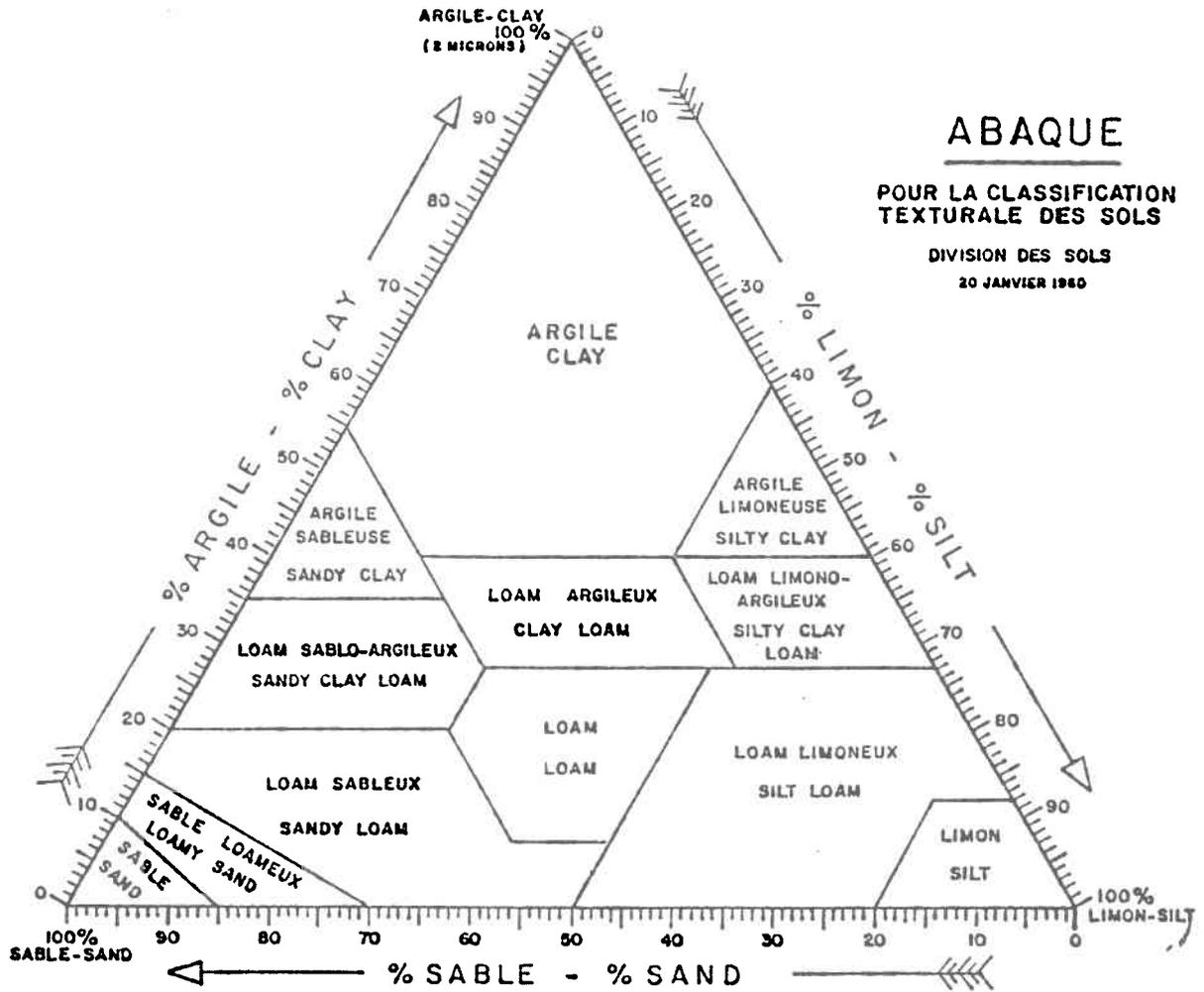


Figure A.3 Triangle textural de classification des sols (tiré de Gallichand et al., 1983).

La teneur en eau pondérale (H_p) est le rapport entre la masse d'eau contenue dans un volume apparent de sol et la masse sèche contenue dans ce même volume. Cette valeur est aisément obtenue par le

$$H_p = \frac{M_l}{M_s} = \frac{M_f - M_s}{M_s} = \frac{M_f}{M_s} - 1 \quad (\text{A.2})$$

M_l = masse d'eau

M_s = masse de sol sec

M_f = masse de sol frais

séchage d'un échantillon de sol à l'étuve (pendant 24 heures à une température de 105°C) et après l'avoir pesé avant et après séchage. Les sols minéraux ont des teneurs en eau pondérales pouvant aller jusqu'à 50% alors que les sols organiques peuvent atteindre des valeurs aussi élevées que 1200%.

La teneur en eau volumique (H_v) d'un échantillon de sol est le rapport entre le volume d'eau et le volume apparent de cet échantillon. Pour une surface donnée, H_v est également le rapport entre la hauteur d'eau (l) et la hauteur apparente de sol considérée (d), (voir figure A.1). On peut l'exprimer comme suit:

$$H_v = \frac{V_l}{V} = \frac{l \times d^2}{d^3} = \frac{l}{d} \quad (\text{A.3})$$

L'expression A.3 permet d'exprimer la hauteur d'eau (1) contenue dans une hauteur de sol donnée. Cependant, la teneur en eau volumique (Hv) d'un sol peut difficilement être mesurée directement; il faut d'abord évaluer sa masse volumique apparente et connaître sa teneur en eau pondérale. De là, on trouve:

$$H_v = \frac{V_l}{V} = \frac{M_l/D_a}{M_s/D_l} = \frac{M_l}{M_s} \frac{D_a}{D_l} = H_p \frac{D_a}{D_l} \quad (A.4)$$

D_a = masse volumique apparente du sol (Mg/m^3)

D_l = masse volumique de l'eau ($1,0 Mg/m^3$)

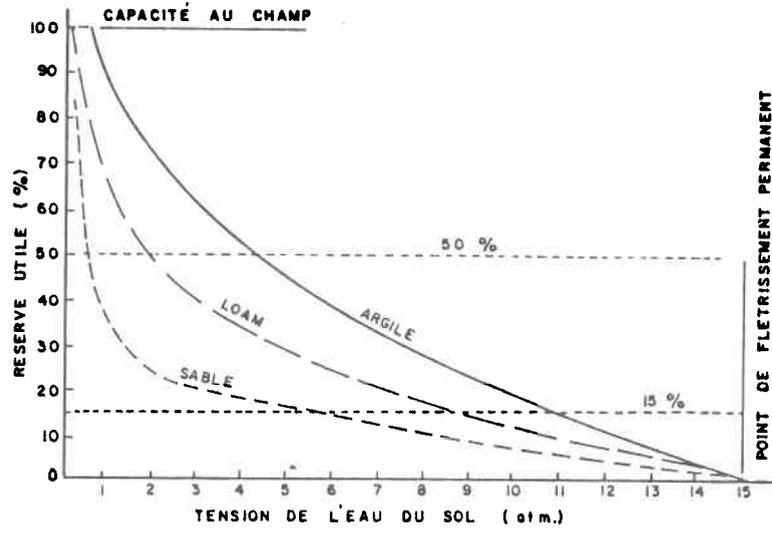
H_p = teneur en eau pondérale du sol

A.2 Teneurs en eau caractéristiques

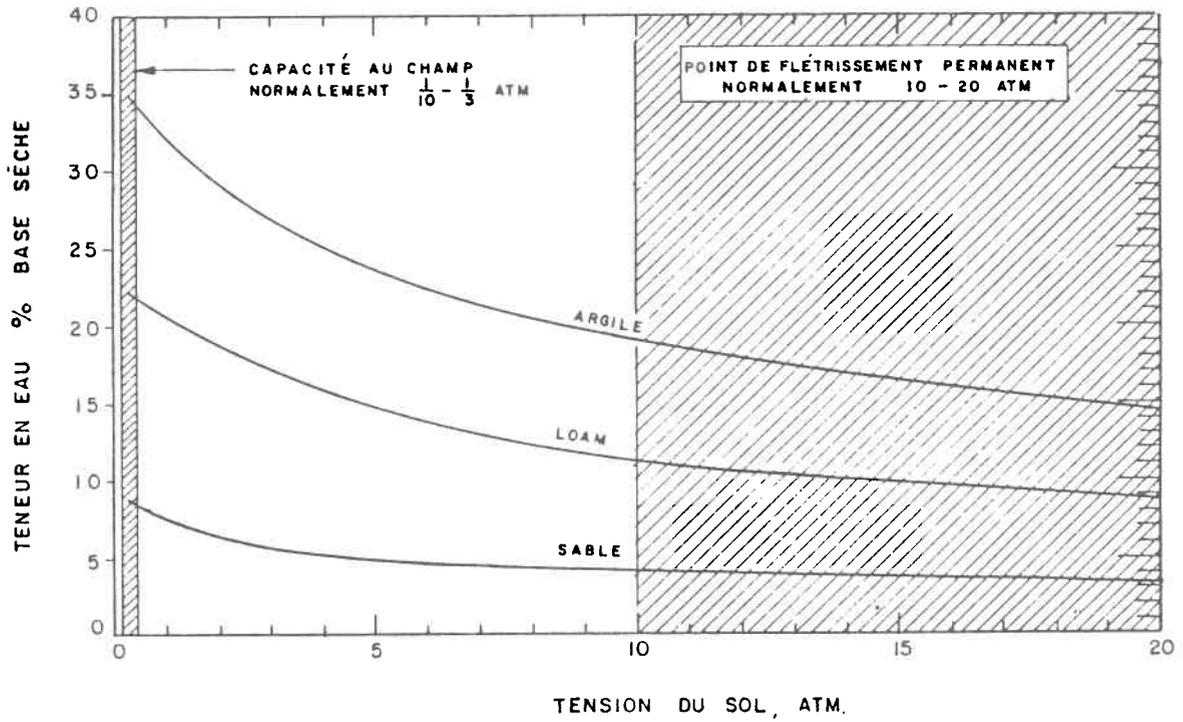
Il est possible d'identifier pour différentes classes texturales de sol des degrés d'humidité plus favorables à la croissance des plantes. On parle généralement de teneur en eau du sol à la saturation, à la capacité de rétention au champ et au point de flétrissement permanent (Bentz, 1983; Saint-Martin, 1973). Ces teneurs en eau caractéristiques sont souvent associées à des potentiels matriciels de l'eau dans le sol (succion) tel qu'indiqué à la figure A.4.

La saturation d'un sol est atteinte lorsque le volume d'air dans le sol (pores) est remplacé par l'eau. Cet état, correspondant à un potentiel matriciel nul, est rarement atteint au cours de la saison de croissance dans les sols bien drainés. Par contre, en sols mal drainés, cet état peut ralentir la croissance et même entraîner l'asphyxie des cultures si sa durée se prolonge.

La teneur en eau à la capacité au champ est l'état hydrique du sol où l'eau gravitaire uniquement a été évacuée. Ainsi, le maximum d'eau utile pour la plante demeure. Cet état est atteint, pour les sols en culture les plus rencontrés, un à deux jours après une pluie



(D'APRES SKINNER, 1976)



(D'APRES HANSEN ET AL., 1980)

Figure A.4

Courbes de succion/teneur en eau pour trois grandes catégories de sol (tiré de Penel, 1984).

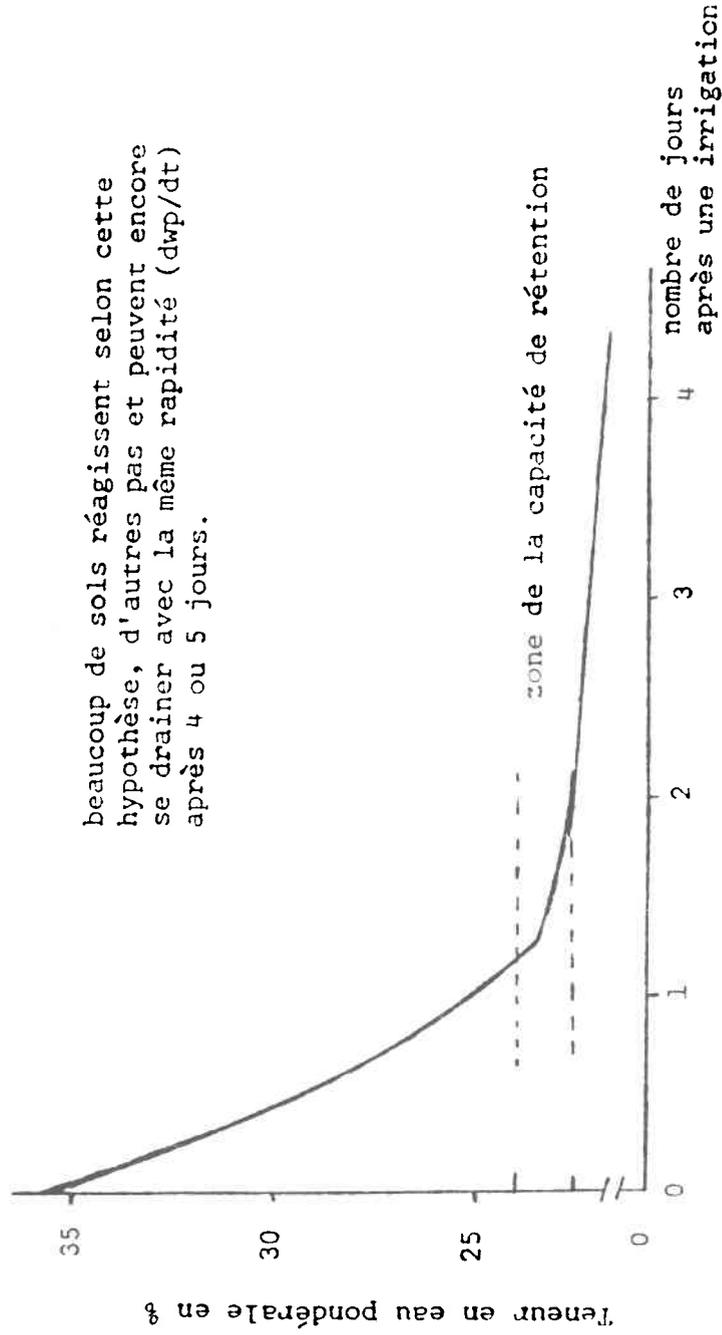
suffisante pour saturer le sol (figure A.5), soit au moment où la vitesse d'évacuation de l'eau du sol diminue fortement. Cet état d'humidité est associé par plusieurs auteurs à un potentiel de l'eau du sol voisin de 33 kPa, une valeur de 33 kPa étant souvent utilisée pour les déterminations en laboratoire. Cette teneur en eau caractéristique ne correspond pas à une valeur unique pour un sol donné, puisque les mouvements de l'eau dans le sol constituent un système dynamique. Elle varie également entre les types de sols.

Le point de flétrissement permanent correspond à une gamme de teneurs en eau pour lesquelles le flux d'eau du sol vers la plante n'est plus suffisant pour éviter le flétrissement de cette dernière. Un apport d'eau à ce stade ne permet pas à la plante de reprendre sa turgescence. Diverses expériences ont démontré que le point de flétrissement est rencontré à un potentiel voisin de -1500 kPa (figure A.4), cette valeur étant généralement utilisée lors des déterminations en laboratoire. Lorsqu'il n'est plus possible de déterminer expérimentalement cette teneur en eau caractéristique, on peut l'approximer en la considérant égale à 50% de la teneur en eau à la capacité au champ. La figure A.4 montre que la tension à laquelle sont rencontrées les teneurs en eau caractéristiques varie à l'intérieur d'une certaine gamme.

La gamme des teneurs en eau comprises entre la capacité au champ et le point de flétrissement représente la partie de la réserve en eau du sol qui pourra profiter à la plante. On l'appelle réserve en eau utile. La figure 2.1 montre la variation des teneurs en eau caractéristique en fonction de la texture des sols.

On observe que les sols limoneux et argileux ont une réserve utile pour les plantes plus importante que les sols sableux.

beaucoup de sols réagissent selon cette hypothèse, d'autres pas et peuvent encore se drainer avec la même rapidité (dwp/dt) après 4 ou 5 jours.



(adapté de Taylor et Ashcroft , 1972)

Figure A.5 Estimation de la capacité de rétention au champ (tiré de Bentz, 1983).

ANNEXE B

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES SITES
EXPÉRIMENTAUX RETENUS

B. DESCRIPTION DES SITES EXPÉRIMENTAUX RETENUS

B.1 Présentation des sites

Des sites en culture permettant d'assurer le suivi du niveau d'humidité du sol au cours des deux saisons de croissance, soit 1985 et 1986, ont été choisis pour valider le modèle de gestion de l'irrigation pour les conditions du Québec.

Trois localités ont été retenues pour le choix des parcelles expérimentales, soit Notre-Dame-de-la-Paix, Baie-Comeau et l'Ile d'Orléans. Ces trois endroits sont représentatifs des différentes zones climatiques où l'irrigation peut être pratiquée au Québec à cause de leur situation géographique respective (figure 1.1).

Deux cultures ont été retenues pour l'étude, soit la pomme de terre pour les trois localités à cause des superficies cultivées importantes, et la fraise à l'Ile d'Orléans à cause du nombre élevé de producteurs possédant un système d'irrigation pour cette culture au Québec (tableau 1.2). Les cultures de pommes de terre ont été irriguées à l'aide de canons voyageurs à boyau rigide. Ceux-ci procurent une bonne uniformité d'application d'eau pour l'ensemble du champ. Par contre, les champs cultivés en fraises ont été irrigués à l'aide de canons asperseurs stationnaires. Notons qu'à l'Ile d'Orléans, les champs ont été irrigués uniquement en 1985 dû aux pluies abondantes et régulières survenues au cours de l'été 1986.

A Baie-Comeau, des champs localisés sur la station expérimentale Les Buissons ont été retenus pour les deux étés. Deux sites de mesure par saison de culture ont été retenus. Les sites BUIP1 et BUIP2 étaient situés sur les champs voisins en 1985 et en 1986 (figure B.1), mais les sols des deux champs sont comparables. En 1986, le site BUIP1 était situé à 125 m de sa position de l'année précédente comparativement à 250 m pour le site BUIP2.

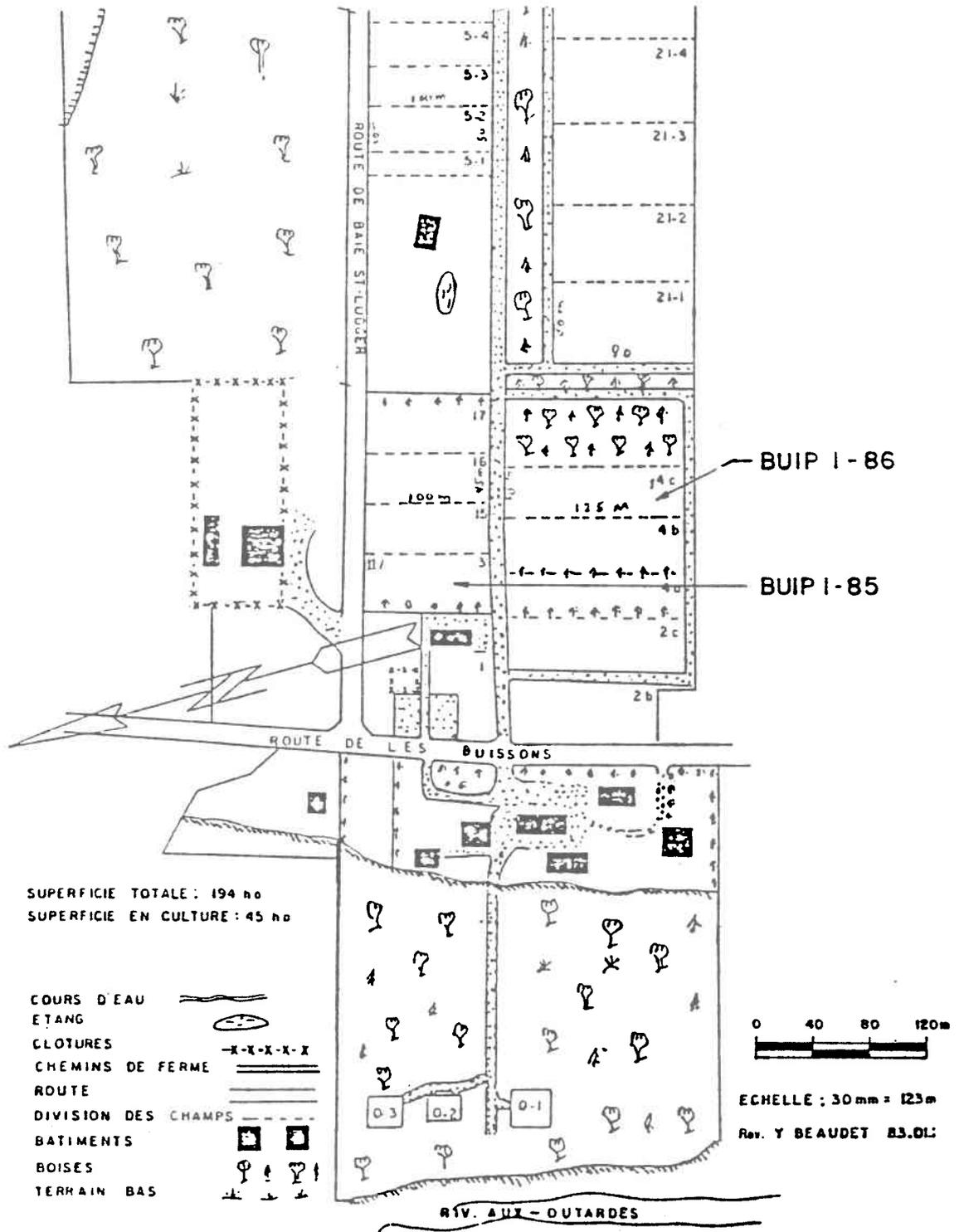


Figure B.1 Plan de localisation des parcelles expérimentales de la station les Buissons pour 1985 et 1986.

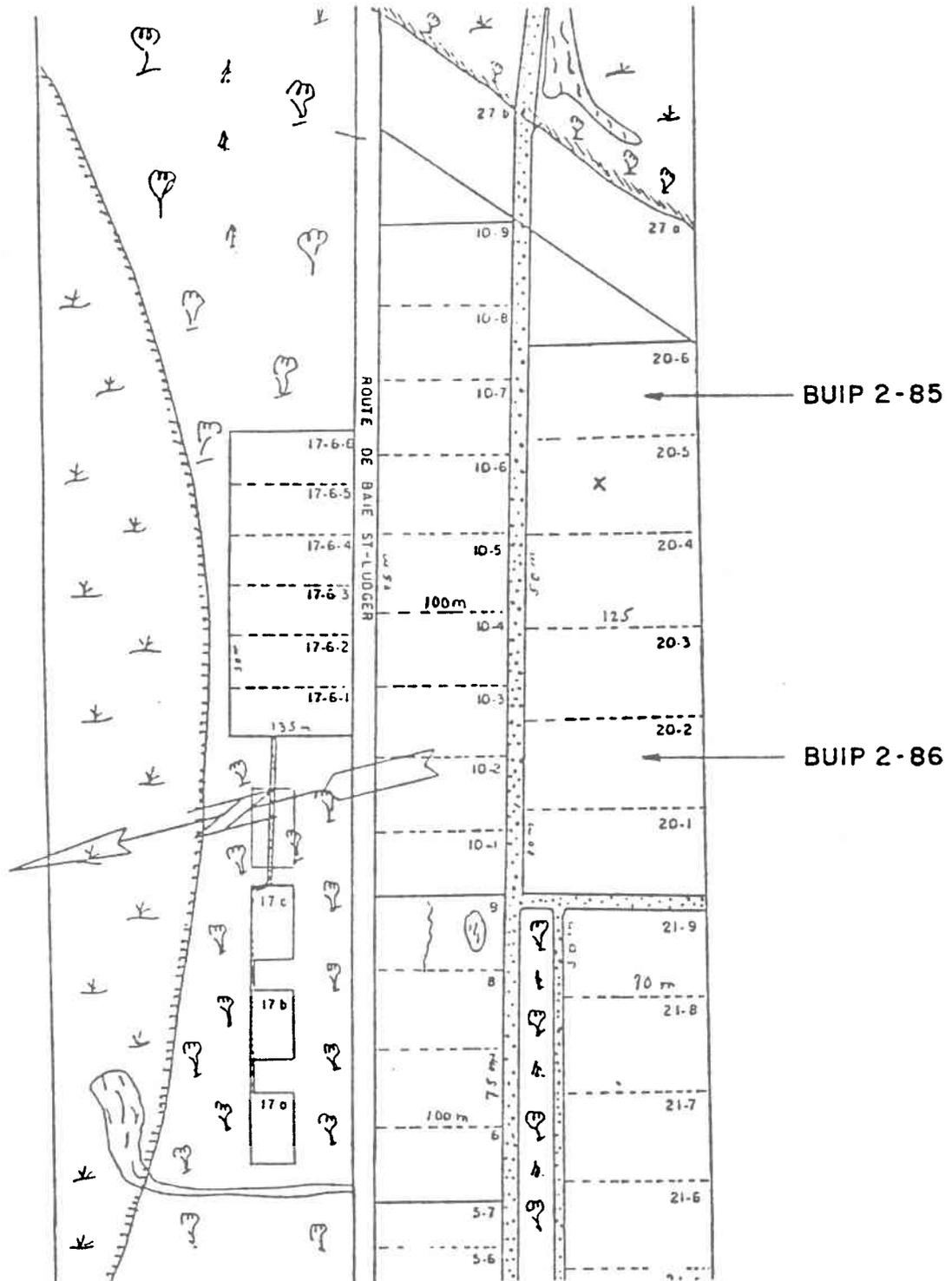
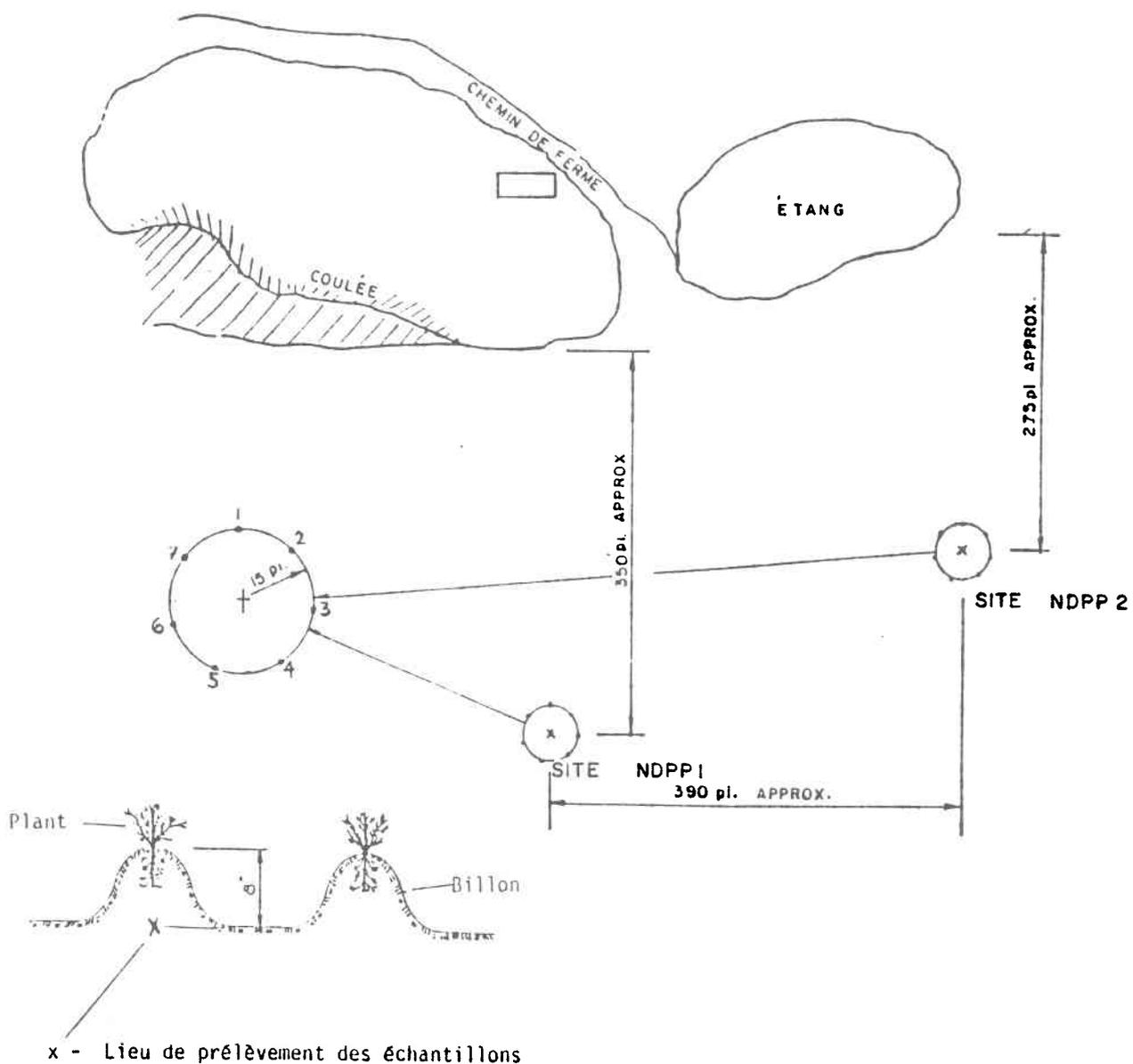


Figure B.1 Plan de localisation des parcelles expérimentales de la station les Buissons pour 1985 et 1986 (suite).

A Notre-Dame-de-la-Paix, les deux sites étudiés (NDPP1 et NDPP2) étaient situés sur le même champ et au même endroit au cours des deux étés successifs (figure B.2).

Sur l'Ile d'Orléans, quatre champs ont été retenus en 1985 et deux au cours de l'été 1986, et ceci à différents endroits (figure B.3). Chaque champ contenait deux sites de mesure (figure B.4 à B.8) et le nombre de champs cultivés en pommes de terre et en fraises a été réparti de façon égale à chacune des deux années. Seuls les sites BLOP1 et BLOP2 ont été cultivés au même endroit en pommes de terre au cours des deux étés successifs. Les sites GOSF1 et GOSF2 étaient situés sur des champs différents en 1985 et en 1986. Notons également que les sites PREP1 et PREP2 étaient situés sur des champs voisins. Le tableau B.1 présente le nom, la localisation et la culture de chaque site retenu pour les deux étés de l'étude.



x - Lieu de prélèvement des échantillons

La profondeur de prise des échantillons sera entre 8 et 10 pouces, et variera selon la profondeur des racines. Au début de la saison la profondeur serait de l'ordre de 8 pouces.

Figure B.2 Plan de localisation des parcelles expérimentales à Notre-Dame-de-la-Paix pour 1985 et 1986.

SITES : BLOP 1 et 2

ST - JEAN I. O.

echelle: hor 1cm: 25m
vert 1cm: 5m

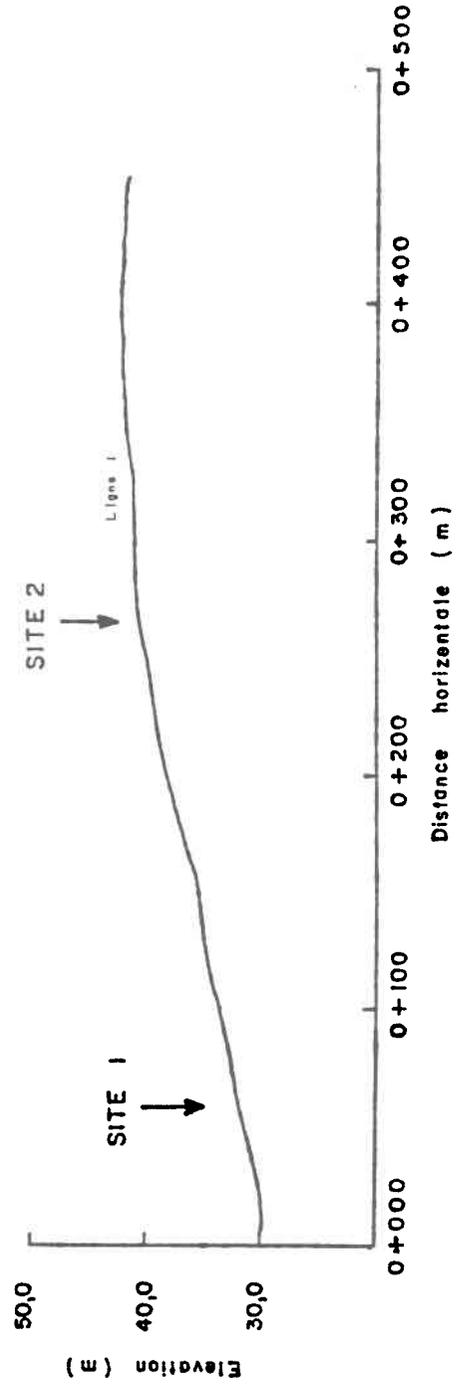


Figure B.4 Plan de localisation et profil topographique des sites BLOP1 et BLOP2 en 1985 et 1986.

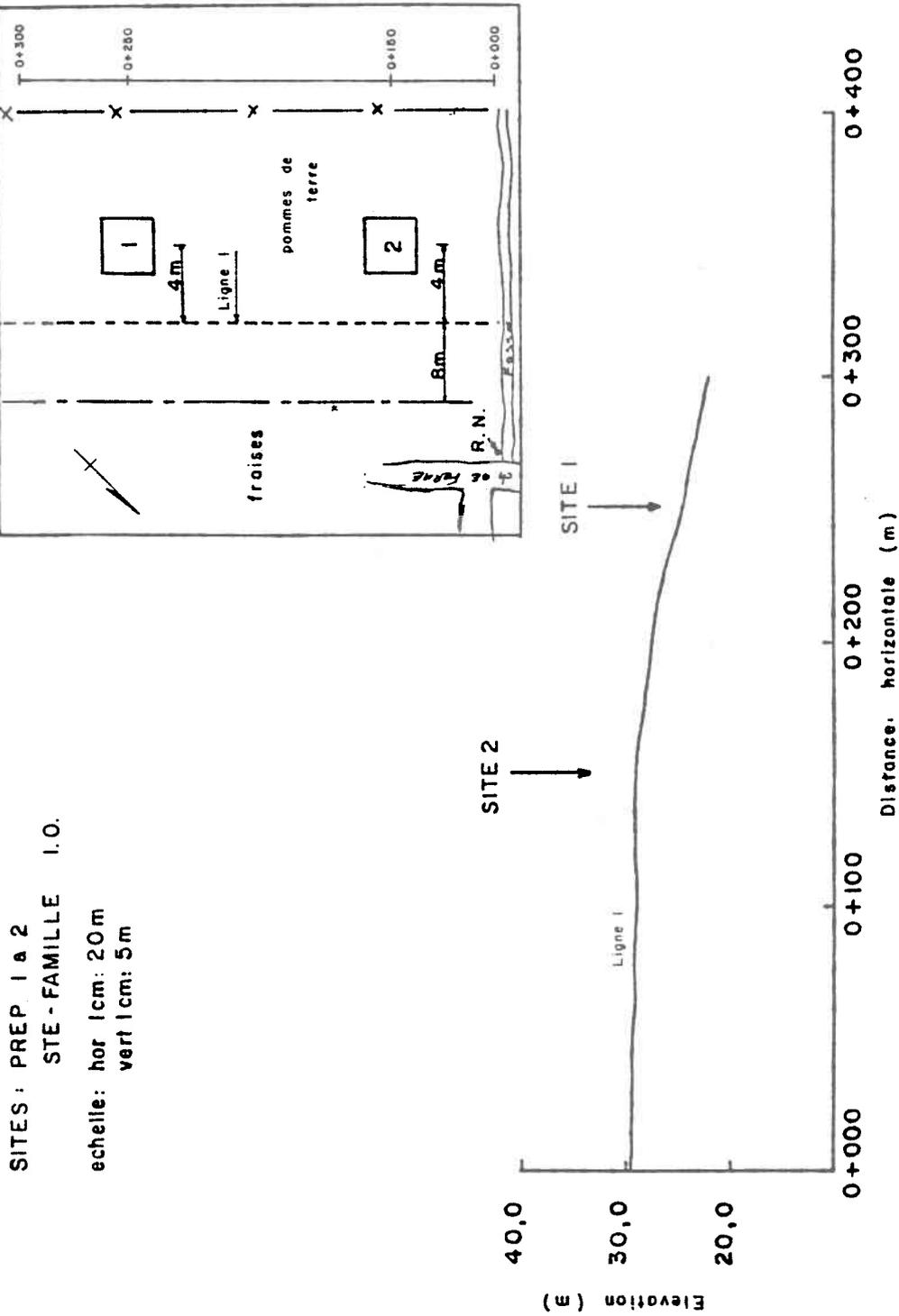


Figure B.5 Plan de localisation et profil topographique des sites PREP1 et PREP2 en 1985.

SITES: GOSF 1 & 2
ST-LAURENT I.O.

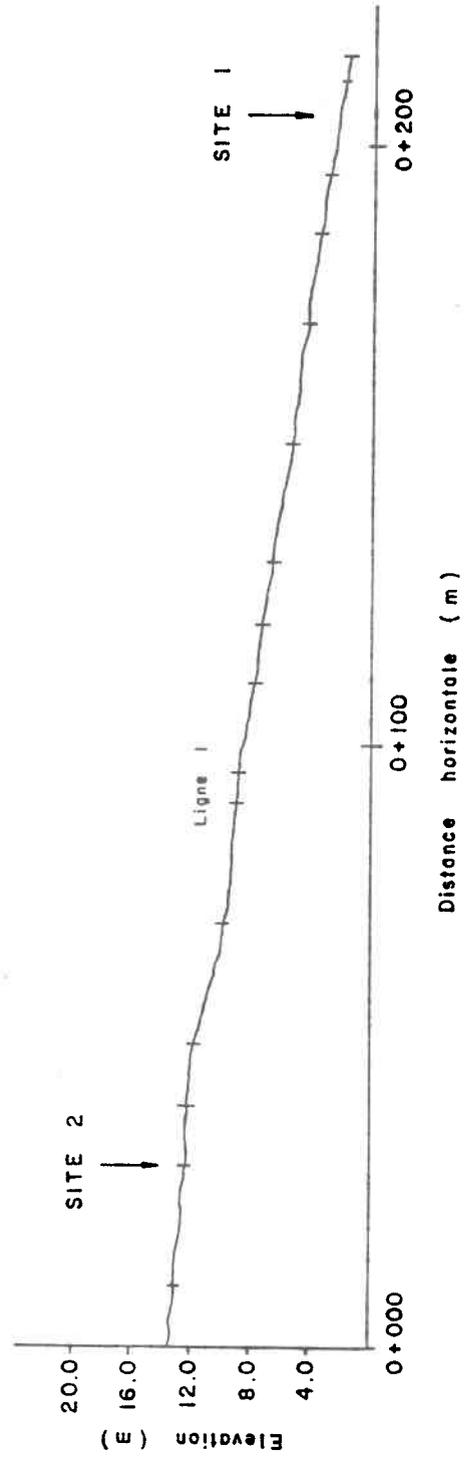
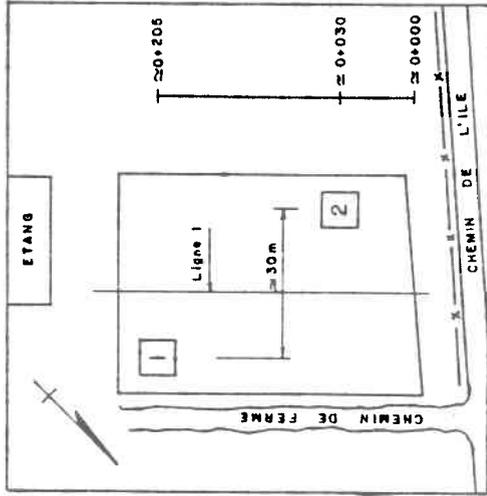
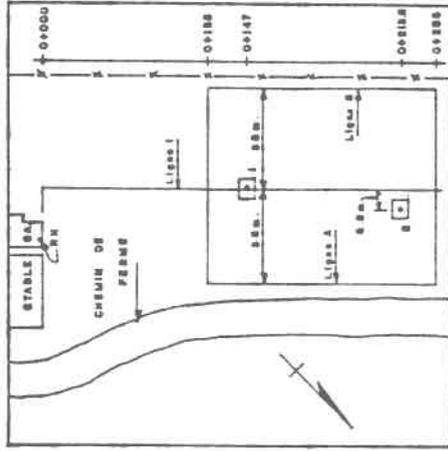


Figure B.6 Schéma de localisation et profil topographique des sites GOSF1 et GOSF2 en 1985.



SITES : GOSF 1 & 2
ST-LAURENT I.O.

echelle : hor. 1cm = 5 m
vert. 1cm = 0.5 m

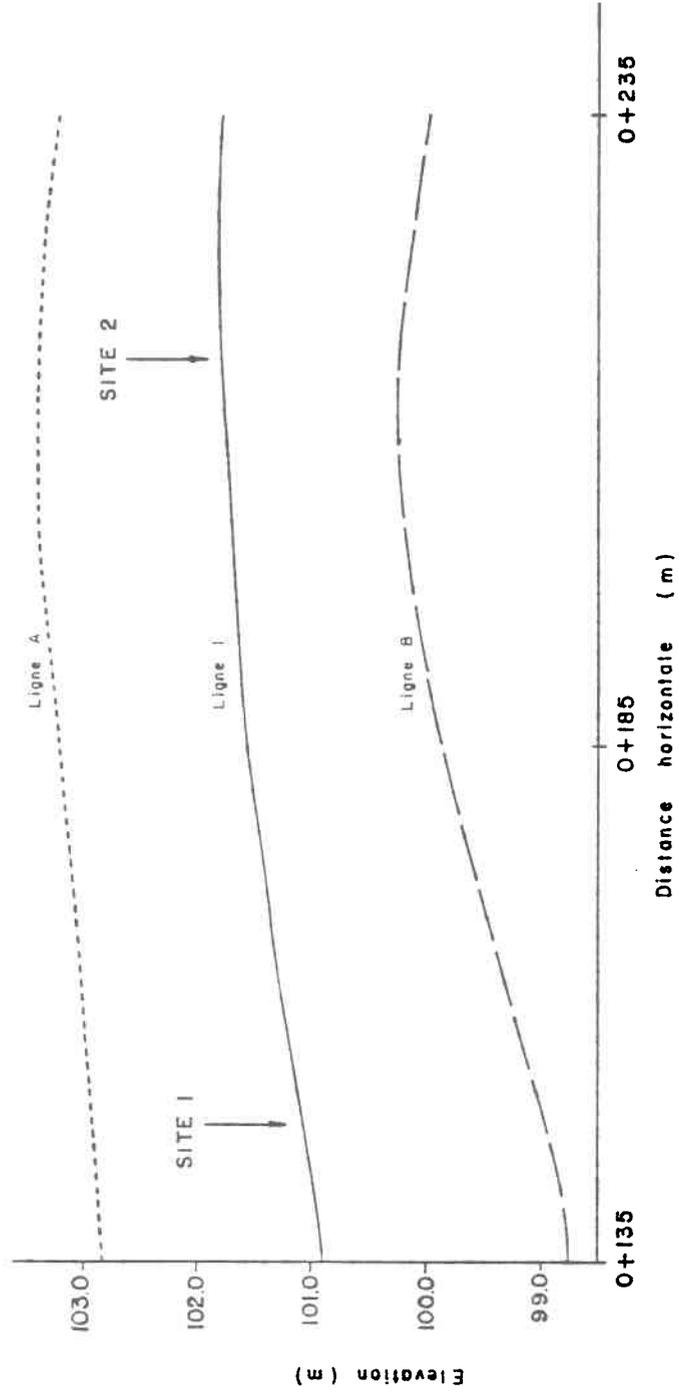


Figure B.7 Plan de localisation et profil topographique des sites GOSF1 et GOSF2 en 1986.

SITES : PREF 1 & 2

STE - FAMILLE I.O.

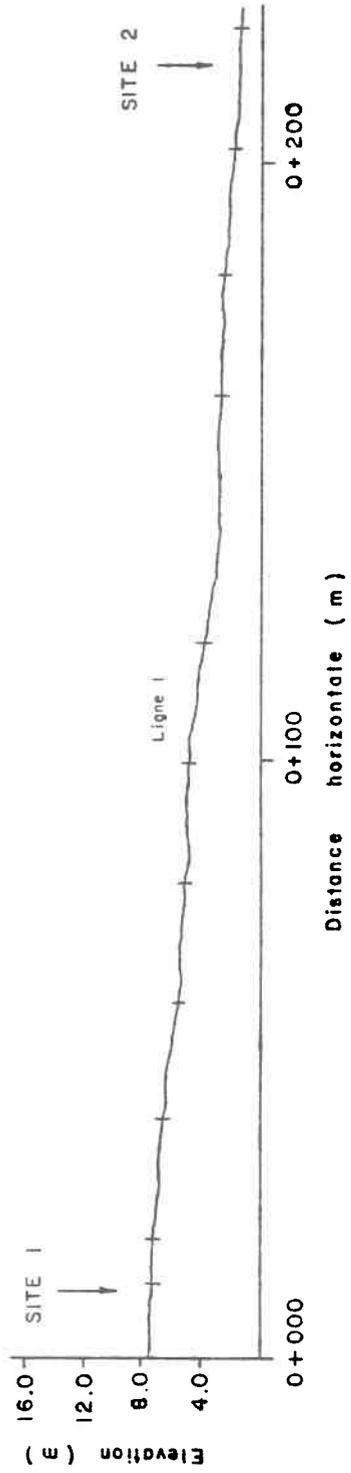
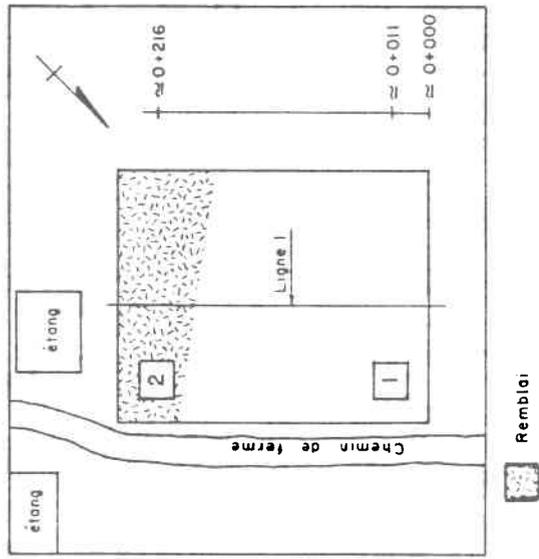


Figure B.8 Schéma de localisation et profil topographique des sites PREF1 et PREF2 en 1985.

Tableau B.1 Parcelles et sites expérimentaux retenus pour la validation du modèle de gestion de l'irrigation

Localité	Culture	Localisation des parcelles	Nom du site	
			été 1985	été 1986
Baie-Comeau (Station les Buissons)	Pommes de terre	Champs voisins	BUIP 1	BUIP 1
			BUIP 2	BUIP 2
Notre-Dame- de-la-Paix	Pommes de terre	Même champ	NDPP1	NDPP1
			NDPP2	NDPP2
Ile d'Orléans	Pommes de terre	Même champ	BLOP1	BLOP1
			BLOP1	BLOP2
Ile d'Orléans	Pommes de terre		PREP1	
			PREP2	
Ile d'Orléans	Fraises		GOSF1	
			GOSF2	
Ile d'Orléans	Fraises		PREF1	
			PREF2	
Ile d'Orléans	Fraises			GOSF1
				GOSF2

B.2 Localisation des stations de mesures climatiques

Les données météorologiques journalières nécessaires au calcul de l'évapotranspiration potentielle à l'aide de la formule de Penman modifiée (température minimale et maximale du bulbe sec, humidité relative minimale et maximale, nombre d'heures d'ensoleillement et vitesse du vent) ont été obtenues à partir des stations météorologiques d'Environnement Canada les plus rapprochées des sites.

Pour Notre-Dame-de-la-Paix, la station météorologique d'Ottawa a été retenue. Notons que la station de Montréal est située presque à la même distance des sites que la station d'Ottawa.

Pour les sites situés à Baie-Comeau, la station météorologique de Baie Comeau a été retenue.

Finalement, les valeurs d'ETP pour l'île d'Orléans ont été calculées à partir des données météorologiques provenant de la station de l'aéroport de Québec.

Les données de précipitations journalières ont été mesurées à proximité de chaque champ contenant des sites expérimentaux. Penel (1984) indique qu'il existe un gradient de la pluviométrie estivale entre l'est et l'ouest de l'île d'Orléans ce qui justifie la mesure de la pluie à proximité de chaque site.

Les hauteurs d'eau d'irrigation appliquées sur les champs contenant les sites expérimentaux ont été mesurées à l'aide de sept jauges pluviométriques disposées à différents endroits sur le champ irrigué et à proximité des sites.

Les apports d'eau sur chaque site par pluviométrie ou par irrigation mesurés sur chaque site sont disponibles au service du génie (MAPAQ) pour les deux années de l'étude.

B.3 Description physique des sites

Environnement, culture et topographie

Les cultures étudiées, soit la pomme de terre et la fraise, sont effectuées en rang sur billons espacés de 0,90 m environ. De plus, les champs de fraises contiennent un paillis entre les rangs.

Pour tous les sites étudiés, la culture est effectuée dans le sens de la pente. Les pentes à proximité des sites sont plus élevées à l'Ile d'Orléans (2 à 6%) qu'aux deux autres localités (0 à 2%). De plus, pour tous les sites étudiés, on observe une certaine pente vers le sud ce qui favorise l'absorption de rayonnement solaire.

Les champs contenant les sites sont bordés d'un chemin de ferme et contiennent un étang d'irrigation à une extrémité. Les boisés sont généralement à une distance suffisante des champs pour ne pas créer de microclimat. Les champs contenant les sites PREF1 et 2, et PREP1 et 2 représentent une exception puisqu'ils sont complètement entourés d'un boisé. Ceci peut avoir une influence sur l'évapotranspiration potentielle.

La position des sites de mesure de la teneur en eau du sol à l'intérieur de chaque champ ainsi que le profil topographique du champ (Ile d'Orléans) sont représentés sur les figures B.1 à B.8. De plus, le tableau B.2 synthétise l'information sur la topographie des parcelles et sur les cultures propres à chaque site.

Mesure de la teneur en eau du sol

Pour les sites localisés à Baie-Comeau et à Notre-Dame-de-la-Paix, la teneur en eau pondérale du sol au cours des étés 1985 et 1986 a été mesurée par thermogravimétrie en prélevant des échantillons de sol dans les vingt premiers centimètres de sol à partir du dessus du billon (figure B.2).

Tableau B.2 Description topographique des parcelles et principaux stades de développement des cultures.

SITE	NATURE DE LA CULTURE	OBSERVATION	PENTE (%)	CROISSANCE ET TRAVAUX CULTURAUX	
BUIP1 - 2 (1985)	pommes de terre	culture dans le sens de la pente	moy : 1,0 site 1: 0,0 site 2: 2,0	03/06/85	semis BUIP1
				28/05/85	semis BUIP2
				03/09/85	défanant (site 1)
				26/08/85	défanant (site 2)
				02/10/85	récolte (site 1)
				19/10/85	récolte (site 2)
BUIP1 - 2 (1986)	pommes de terre	culture dans le sens de la pente	moy : 1,0 site 1: 0,0 site 2: 2,0	02/06/86	semis (site 1)
				26/05/86	semis (site 2)
				28/08/86	défanant
				11/09/86	récolte (site 1)
				15/08/86	récolte (site 2)
				NDPP1 - 2 (1985 et 1986)	pommes de terre
31/05/85	début d'enracinement				
15/07/85	couverture totale				
15/09/85	récolte				
01/05/86	semis				
20/05/86	début d'enracinement				
14/07/86	couverture totale				
25/09/86	récolte				

Tableau B.2 Description topographique des parcelles et principaux stades de développement des cultures (suite).

SITE	NATURE DE LA CULTURE	OBSERVATION	PENTE (%)	CROISSANCE ET TRAVAUX CULTURAUX				
BLOP1 - 2 (1985 et 1986)	pommes de terre	culture dans le sens de la pente	moy : 3,8 site 1: 4,5 site 2: 2,5	28/05/85 semis				
				10/06/85 début d'émergence				
				27/06/85 buttage				
				02/07/85 formation des tubercules				
				20/07/85 floraison				
				09/09/85 défanant				
				23/09/85 récolte				
				08/06/86 semis				
				16/06/86 début d'enracinement				
				31/07/86 couverture totale				
				10/10/86 récolte				
				PREP1 - 2 (1985)	pommes de terre	culture dans le sens de la pente	moy : 2,5 site 1: 5,6 site 2: 0,8	22/05/85 semis
								10/06/85 début d'enracinement
27/06/85 sarclage								
02/07/85 formation des tubercules								
05/07/85 buttage								
20/07/85 floraison								
03/09/85 défanant								
18/09/85 récolte								

Tableau B.2 Description topographique des parcelles et principaux stades de développement des cultures (suite).

SITE	NATURE DE LA CULTURE	OBSERVATION	PENTE (%)	CROISSANCE ET TRAVAUX CULTURAUX
PREF1 - 2 (1985)	fraise 2 ^e année de pro- duction	culture dans le sens de la pente	moy : 3,0 site 1: 2,4 site 2: 3,5	01/05/85 début de la crois- sance végétative 20/05/85 formation des boutons 10/06/85 floraison 15/06/85 formation des premiers fruits et développement des stolons 05/07/85 récolte 20/10/85 labour

Tableau B.2 Description topographique des parcelles et principaux stades de développement des cultures (suite).

SITE	NATURE DE LA CULTURE	OBSERVATION	PENTE (%)	CROISSANCE ET TRAVAUX CULTURAUX	
GOSF1 - 2 (1985)	fraise 2 ^e année de pro- duction	culture dans le sens de la pente	moy : 5,6 site 1: 6,0 site 2: 3,0	01/05/85	début de la croissance végé- tative
				20/05/85	formation des boutons
				10/06/85	floraison
				15/06/85	formation des premiers fruits et développement des stolons
				02/07/85	récolte
				07/08/85	hersage et semis d'un paillis
				01/05/86	début de la croissance végé- tative
GOSF1 - 2 (1986)	fraise 1 ^e année de pro- duction	culture dans le sens de la pente	moy : 1,0 site 1: 1,4 site 2: 0,7	25/05/86	formation des boutons
				10/06/86	floraison
				20/06/86	formation des premiers fruits et développement des stolons
				09/07/86	récolte
				02/08/86	hersage

A Baie-Comeau, huit échantillons pour chaque site ont été prélevés sur un rayon de cinq mètres tandis qu'à Notre-Dame-de-la-Paix, sept échantillons par site ont été recueillis sur le même rayon. La fréquence d'échantillonnage a varié entre 2 et 3 fois par semaine pour chaque site.

Pour les sites localisés à l'île d'Orléans, la teneur en eau du sol au cours des étés 1985 et 1986 a été mesurée à l'aide d'une sonde à neutrons en réalisant des comptes neutroniques à deux profondeurs variant selon les cultures. Pour la pomme de terre, la profondeur de mesure des comptes neutroniques a été différente en 1985 et en 1986. Au cours du premier été, la profondeur de lecture est demeurée à 20 cm et 40 cm au-dessous du sommet du billon. Donc, les crans de mesure ont dû être rajustés après le renchaussage des plants de pommes de terre. En 1986, par contre, la lecture a été effectuée à 15 cm et 35 cm au-dessous du sommet du billon et les crans de mesure ont également été rajustés après le renchaussage de façon à demeurer à la même position par rapport au sommet du billon. Pour les fraises, comme il n'y a pas de renchaussage, les lectures ont toujours été effectuées à la même profondeur au cours des deux étés, soit 15 cm et 30 cm par rapport au dessus du rang.

Pour la majorité des sites, sept tuyaux de mesures des comptes neutroniques ont été installés. Cependant, les sites en fraises ne comportent que quatre tuyaux au début de la campagne de mesure de l'été 1985. La fréquence de mesure a varié de 2 à 3 fois par semaine.

Des échantillons de sol ont également été prélevés autour de chaque tuyau aux deux profondeurs de lecture de la sonde, à un intervalle d'une semaine au cours des deux étés. Ces échantillons vont servir à établir une courbe d'étalonnage permettant de transformer les comptes neutroniques en teneur en eau volumique.

Au cours de l'été 1985, trois échantillons autour d'un des tubes d'accès (tuyaux) ont été prélevés en changeant de tube à chaque semaine. Ainsi, deux points de calibration par tuyau ont été obtenus en

moyenne. Le tuyau d'échantillonnage avait 0,051 m de diamètre, et une hauteur de 0,1 m de sol a été prélevée à chaque profondeur moyenne de lecture de la sonde. Chaque échantillon avait un volume voisin de 200 cm³. Au cours de l'été 1986, quatre échantillons de sol, soit un de plus qu'en 1985, ont été prélevés autour d'un tuyau aux deux profondeurs de lecture de la sonde.

La figure B.9 montre la disposition des tuyaux au-dessus des billons pour les deux cultures étudiées ainsi que la position de l'échantillonnage du sol pour la calibration.

Propriétés physiques du sol

Une fosse d'identification du profil du sol a été creusée à proximité de tous les sites étudiés à l'exception des sites BUIP1-86 et BUIP2-86 pour lesquels on assume que les propriétés physiques sont semblables à celles des sites BUIP1-85 et BUIP2-85 qui sont situés sur des champs voisins.

A l'intérieur de chaque fosse, une série de trois échantillons de 6 cm de diamètre et de 6 cm de hauteur (193 cm³) a été prélevée à chaque niveau dans le profil de 0 à 65 cm (figure B.10). Nous disposons ainsi de 5 à 7 séries de trois échantillons à différentes profondeurs pour chaque fosse. La profondeur des échantillons a été établie par rapport au niveau du sol avant semis, les fosses ayant été creusées au printemps.

Pour la majorité des fosses étudiées, deux des trois échantillons de chaque niveau ont servi à établir 1) la densité apparente sèche de l'échantillon non remanié; 2) la teneur en eau à la capacité au champ de l'échantillon non remanié (-33 à -20 kPa); 3) le pourcentage de sable, limon et argile sur la fraction inférieure à 2 mm; 4) le pourcentage de sol ayant une granulométrie supérieure à 2 mm; 5) et le pourcentage de matière organique. Le troisième échantillon a été séparé en deux parties et a servi à déterminer la teneur en eau au point de flétrissement (-1500 kPa).

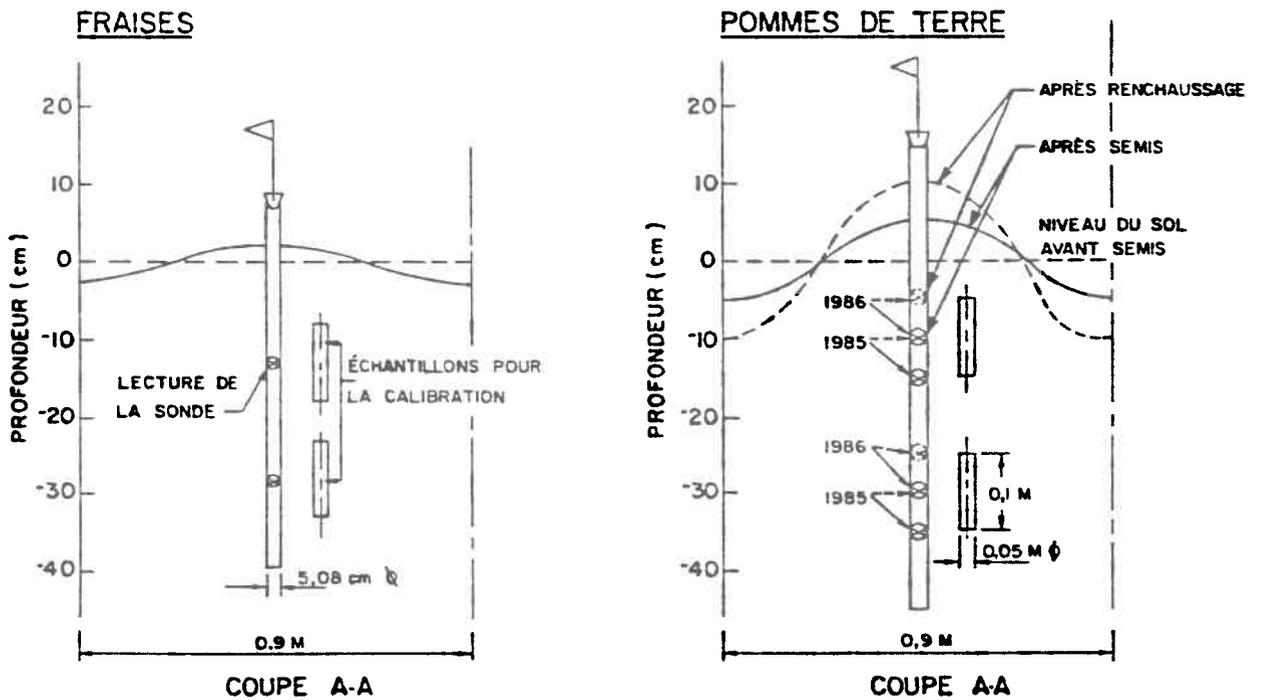
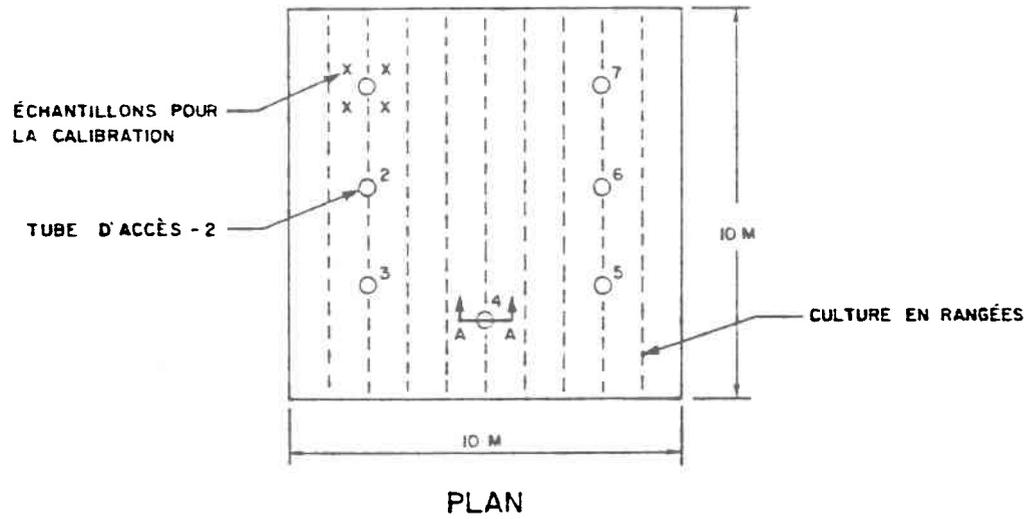


Figure B.9

Disposition des tuyaux d'accès pour la sonde à neutrons à l'intérieur d'un site, position de l'échantillonnage pour la calibration et profondeur de lecture pour chacune des deux cultures étudiées.

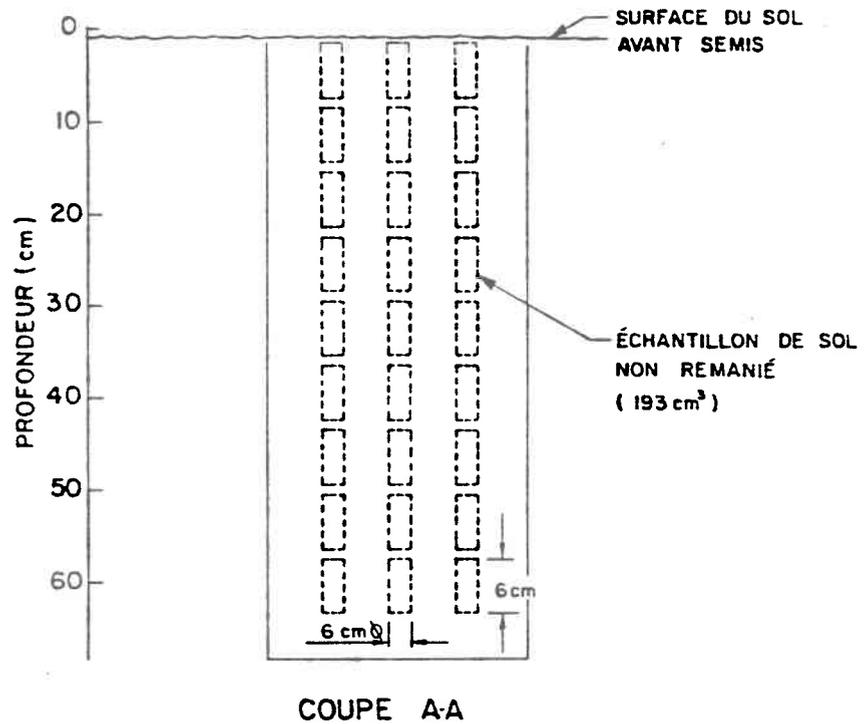
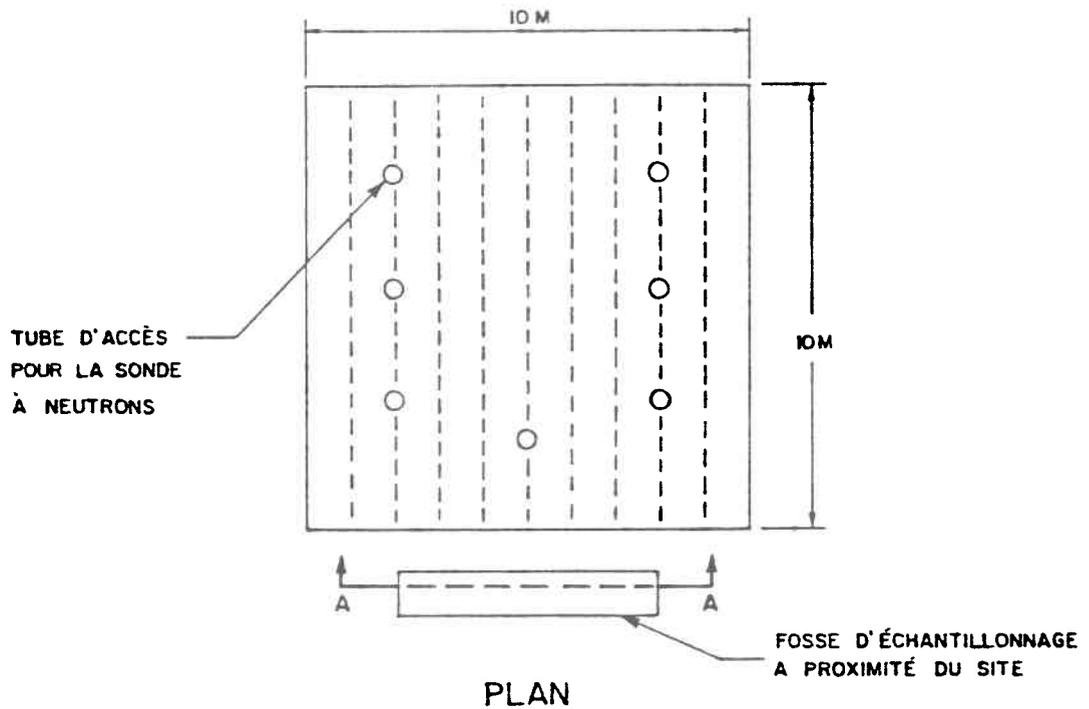


Figure B.10

Schéma de l'échantillonnage réalisé à proximité des sites pour déterminer les propriétés physiques du sol.

Notons que pour les sites GOSF1-85, GOS2F-85 et PREF1-85, les déterminations de la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement en laboratoire n'ont pas été effectuées.

Les caractéristiques physiques des sols de tous les sites étudiés (granulométrie, classe texturale, densité apparente, % matière organique) sont présentées au tableau B.3. La classe texturale des sols a été déterminée à partir de l'analyse granulométrique et du triangle textural de classification des sols (figure A.3). La profondeur des couches considérées a été établie en regroupant les horizons homogènes. Les valeurs moyennes des propriétés physiques sont données pour chaque couche.

On observe (tableau B.3) que le taux de matière organique diminue avec la profondeur pour l'ensemble des sites sauf pour le site PREF2-85. Le sol de ce site a déjà été remanié pour combler une dépression du terrain ce qui explique le pourcentage plus élevé de matière organique en profondeur. De plus, la masse volumique apparente, la fraction du sol ayant un diamètre supérieur à 2 mm ainsi que le pourcentage de sable augmentent avec la profondeur sauf pour les deux sites précédents. Les masses volumiques présentées précédemment suivent de façon générale la même évolution avec la profondeur que le profil présenté à la figure A.2 pour les sols cultivés. Le tableau B.5 montre pour le site BLOP1 (1985) l'évolution de la densité du sol verticalement et horizontalement.

Pour l'ensemble des sites étudiés, le taux de matière organique du sol de la couche de surface varie entre 2 et 5%. De plus, la fraction du sol ayant un diamètre supérieur à 2 mm représente entre 15 et 40% du poids total et semble plus élevée à l'île d'Orléans, et la densité apparente varie entre 1,05 et 1,38 g/cm³ selon les sols rencontrés.

Les teneurs en eau caractéristiques du sol sont présentées au tableau B.4 pour les différents horizons délimités sur chaque site.

Tableau B.3 Description des caractéristiques du sol des différents horizons identifiés sur chaque site.

SITE	PROFONDEUR (cm)	DENSITE (g/cm ³)	MATIERE ORGANIQUE (%)	DETRIQUES (%) > 2 mm	SABLE (%)	LIMON (%)	ARGILE (%)	TEXTURE
BUIP1	0-25	1,21	3,7	—	68	20	12	LS
	20-30	1,48	0,7	—	84	9	7	SL
	30 et +	1,47	0,3	—	95	2	3	S
BUIP2	0-30	1,05	3,8	—	38	42	20	L
	30-45	1,23	1,8	—	60	24	16	LS
	45 et +	1,47	0,3	—	76	11	13	LS
NDPP1	0-20	1,30	2,9	15	74	13	13	LS
	20-30	1,48	1,5	31	86	8	6	SL
	30-40	1,44	1,2	—	75	15	10	LS
	40 et +	1,52	0,8	—	85	10	5	LS
NDPP2	0-25	1,31	3,5	0 24	74	13	13	LS
	25-55	1,58	1,3	45	84	6	10	SL

S : SABLE
 L : LOAM
 A : ARGILE
 SL : SABLE LOAMEUX
 LS : LOAM SABLEUX
 LA : LOAM ARGILEUX
 LSA : LOAM SABLO-ARGILEUX

Tableau B.3 Description des caractéristiques du sol des différents horizons identifiés sur chaque site (suite).

SITE	PROFONDEUR (cm)	DENSITE (g/cm ³)	MATIERE ORGANIQUE (%)	DETRIQUEES (%) > 2 mm	SABLE (%)	LIMON (%)	ARGILE (%)	TEXTURE
BLOP1	0-30	1,22	2,1	30	62	21	17	LS
	30-40	1,38	1,4	72	77	10	13	LS
	40-80	1,40	0,9	74	84	6	10	SL
BLOP2	0-30	1,17	2,2	33	63	19	18	LS
	30-40	1,31	0,9	65	78	9	13	LS
	40-80	1,43	0,7	76	74	12	14	LS
PREP1	0-30	1,29	3,2	26	57	26	17	LS
	30-65	1,29	2,4	35	58	26	16	LS
	65-90	—	—	—	—	—	—	—
PREP2	0-30	1,21	3,8	25	58	24	18	LS
	30-50	1,18	2,7	19	72	15	13	LS

S : SABLE
 L : LOAM
 A : ARGILE
 SL : SABLE LOAMEUX
 LS : LOAM SABLEUX
 LA : LOAM ARGILEUX
 LSA : LOAM SABLO-ARGILEUX

Tableau B.3 Description des caractéristiques du sol des différents horizons identifiés sur chaque site (suite).

SITE	PROFONDEUR (cm)	DENSITE (g/cm ³)	MATIERE ORGANIQUE (%)	DETRIQUES (%) > 2 mm	SABLE (%)	LIMON (%)	ARGILE (%)	TEXTURE
GOSF1 (1985)	0-20	1,26	4,5	35	55	22	23	LSA
	20-35	1,38	—	37	85	5	10	SL
	35-70	1,46	—	45 et +	86	4	10	SL
GOSF2 (1985)	0-25	1,16	2,5	30	32	36	32	LA
	25-35	1,13	—	45	40	31	27	L
	35-60	1,30	—	65	65	20	15	LS
GOSF1 (1986)	0-25	1,38	2,6	34	52	29	19	L
	25-30	1,36	2,0	87	64	18	18	LS
	30-60	1,46	0,6	55	85	7	8	SL
GOSF2 (1986)	0-25	1,37	3,0	41	44	33	23	L
	25-30	1,55	1,4	83	62	20	18	LS
	30-60	1,47	0,7	85	79	12	9	LS
PREF1	0-25	1,30	4,0	20	50	26	24	LSA
	25-50	1,39	1,8	35 et +	70	14	16	LS
	50 et +	1,42	1,0	50 et +	69	15	16	LS
PREF2	0-25	1,28	4,6	23	31	42	27	LA
	25-30	0,92	10,0	12	17	46	37	LLA
	30-55	1,21	3,1	55	60	22	18	LS

S : SABLE
 L : LOAM
 A : ARGILE
 SL : SABLE LOAMEUX
 LS : LOAM SABLEUX
 LA : LOAM ARGILEUX
 LSA : LOAM SABLO-ARGILEUX

Tableau B.4 Caractéristiques de rétention en eau du sol pour les différents horizons de chaque site
(teneur en eau pondérale exprimée en % base sèche).

SITE	PROFON- DEUR (cm)	TENEUR EN EAU A LA CAPACITE AU CHAMP		TEE, OBSERVÉE AU CHAMP	POINT DE FLETRISSEMENT		RU (mm/m)				
		laboratoire -0,20 (kPa)	essai au champ fig. 2.1 éq. 2.2		Labo. -1500 (kPa)	littérature 50% CC fig. 2.1 éq. 2.1					
BUIP1	0 - 25	22,5	18,7	22,2	22,7 ¹	20,6 ²	17,4	11,3	9,0	11,1	136
	25 - 30	10,6	10,8	8,9			4,7	5,3	6,0	4,3	72
	30 et +	5,3	6,5	6,0			1,8	2,7	4,0	2,6	39
BUIP2	0 - 30	30,2	23,0	35,0	27,7 ¹	24,5 ²	28,0*	13,9	11,0	17,7	145
	30 - 45	19,4	16,0	20,6			29,0	9,7	9,0	10,7	119
	45 et +	9,7	14,0	10,9			4,8	4,9	8,0	6,2	71
NDPP1	0 - 20	12,3	17,0	18,1	15,2 ¹	16,7 ²	12,2*	8,4	9,0	9,6	109
	20 - 30	8,2	11,0	9,6			5,6	4,1	6,0	4,7	61
	30 - 40	14,2	14,0	12,1			5,5	7,1	8,0	6,1	102
	40 et +	8,4	—	8,0			1,9	4,2	—	3,7	64
NDPP2	0 - 25	13,4	18,0	19,0	18,0 ¹	15,9 ²	8,3	9,0	9,0	10,1	118
	25 - 55	5,7	11,0	9,5			4,2	4,2	6,5	5,3	66

* : Valeurs incohérentes

1 : Plus grande teneur en eau observée au champ en 1985

2 : Plus grande teneur en eau observée au champ en 1986

22,5 : Valeur de teneur en eau retenue pour la modélisation

Tableau B.4 Caractéristiques de rétention en eau du sol pour les différents horizons de chaque site
(teneur en eau pondérale exprimée en % base sèche) (suite).

SITE	PROFON- DEUR (cm)	TENEUR EN EAU A LA CAPACITE AU CHAMP		> TEE, OBSERVEE AU CHAMP	POINT DE FLETRISSEMENT		RU (mm/m)			
		laboratoire	essai au		labo.	littérature				
		-0,20 (kPa)	-0,33 champ		fig. 2.1 champ	50% CC fig. 2.1 littérature				
BLOP1	0 - 30	14,0	19,5	14,9 ¹	18,4 ²	7,7	9,2	10,0	11,4	112
	30 - 40	8,1	13,5	11,1	13,4 ²	6,7	6,7	8,0	7,5	92
	40 - 80	6,9	—	11,0	—	4,8	4,8	6,5	5,8	67
BLOP2	0 - 30	17,1	17,0	15,7 ¹	17,1 ²	8,9	8,6	10,0	12,4	100
	30 - 40	11,5	11,5	11,2	11,7 ²	6,0*	5,8	8,0	7,5	75
	40 - 80	9,1	—	12,6	—	10,4	4,6	9,0	7,0	65
PREP1	0 - 30	20,3	24,5	21,7 ¹	22,5	8,3	10,9	10,0	11,9	140
	30 - 65	17,6	24,0	20,0	20,6	6,5	10,0	9,0	10,7	129
	65 - 90	—	—	—	—	—	—	—	—	—
PREP2	0 - 30	22,8	—	23,6 ¹	25,8	9,6	11,8	11,0	13,7	143
	30 - 50	17,9	—	19,9	20,7	6,8	10,0	10,0	10,6	117

* : Valeurs incohérentes

1 : Plus grande teneur en eau observée au champ en 1985

2 : Plus grande teneur en eau observée au champ en 1986

22,5 : Valeur de teneur en eau retenue pour la modélisation

Tableau B.4 Caractéristiques de rétention en eau du sol pour les différents horizons de chaque site
(teneur en eau pondérale exprimée en % base sèche) (suite).

SITE	PROFON- DEUR (cm)	TENEUR EN EAU A LA CAPACITE AU CHAMP		POINT DE FLETRISSEMENT		RU (mm/m)				
		Laboratoire	essai au	Labo.	littérature					
		-0,20 (kPa)	-0,33 champ	-1500 (kPa)	50% CC fig. 2.1					
GOSF1 (1985)	0 - 20	—	—	21,0	27,7	18,9	9,5	11,0	15,6	119
	20 - 35	—	—	15,0	—	<u>14,1</u>	7,1	5,0	—	97
	35 - 70	—	—	—	—	—	—	—	—	—
GOSF2 (1985)	0 - 25	—	—	32,0	33,4	22,8	11,4	14,0	19,2	132
	25 - 35	—	—	21,0	—	<u>18,5</u>	9,3	11,0	—	105
	35 - 60	—	—	—	—	—	—	—	—	—
GOSF1 (1986)	0 - 25	—	18,6	21,0	20,8	21,4	8,8	11,0	11,2	148
	25 - 30	—	10,4	17,0	18,3	<u>17,1</u>	5,4	10,0	10,2	116
	30 - 60	—	<u>7,8</u>	11,0	9,1	—	4,4	6,0	4,6	57
GOSF2 (1986)	0 - 25	—	18,8	21,0	23,8	21,6	—	11,0	13,2	148
	25 - 30	—	9,3	17,0	14,5	<u>15,6</u>	—	10,0	8,3	121
	30 - 60	—	<u>8,2</u>	11,0	10,1	—	—	6,0	5,1	60
PREF1 (1985)	0 - 25	—	—	28,0	26,7	23,8	—	13,0	15,1	155
	25 - 50	—	—	15,0	16,1	<u>22,7</u>	—	9,0	9,0	158
	50 et +	—	—	—	14,4	—	—	—	8,1	—
PREF2 (1985)	0 - 25	26,2	24,6	31,0	31,9	17,7	35,0*	13,0	17,6	157
	25 - 30	42,6	<u>41,1</u>	38,0	67,7	16,6	40,0*	14,0	37,7	189
	30 - 55	19,8	<u>18,4</u>	17,0	24,2	—	11,3	9,0	12,9	111

* ; Valeurs incohérentes
22,5 ; Valeur de teneur en eau retenue pour la modélisation

Tableau B.5 Evolution de la densité du sol mesurée dans le profil de sol pour le site BLOP1 en 1985.

Profondeur (cm)	Densité apparente sèche (Mg/m ³)	
2 à 8	1,31	1,27
9 à 15	1,25	1,18
16 à 22	1,31	1,05
23 à 29	1,20	1,40
29 à 35	1,41	1,40
35 à 41	1,37	1,32
41 à 47	1,42	1,37

La teneur en eau du sol à la capacité au champ a été évaluée au moyen de cinq méthodes pour certains sites.

Pour tous les sites cultivés en pommes de terre, des valeurs déterminées en laboratoire sur échantillons non remaniés à un potentiel de -33 kPa sont présentées. Pour les sites cultivés en fraises, des mesures à -33 kPa sont présentées pour les sites GOSF1 et 2 en 1986 et pour le site PREF2 (1985). On a de plus pour ce site, des valeurs de teneurs en eau mesurées à un potentiel de -20 kPa.

Des essais au champ ont été effectués pour le site PREP1 en 1985 et pour les sites BLOP1 et 2 en 1986 au début de chaque saison. Des carrés de sol de superficies d'un mètre carré contenant chacun un tube d'accès en aluminium pour la sonde à neutrons ont été isolés et amenés à la saturation sur une profondeur de plus de 45 cm. Puis le degré d'humidité du sol a été mesuré à des intervalles de temps prédéterminés au moyen d'une sonde à neutrons et en prélevant un échantillon par carré, et ce à deux profondeurs. Sur le site PREP1, quatre carrés ont été saturés et un compte neutronique de 30 secondes a été effectué à 20 et 40 cm de profondeur tandis que sur les sites BLOP1 et 2, trois carrés ont été saturés et la moyenne de trois comptes de 30 secondes à 15 cm et 35 cm de profondeur a été retenue. L'évolution de la teneur en eau mesurée par thermogravimétrie et par la méthode neutronique en fonction du temps est illustrée aux figures B.11 à B.13 pour les trois sites et les deux profondeurs. La teneur en eau à la capacité au champ semble être atteinte pour les trois sites un jour après la saturation. A cause de la forte dispersion des mesures de teneur en eau réalisées par thermogravimétrie, les comptes neutroniques sont utilisés pour déterminer la teneur en eau désirée. Les échelles de comptes neutroniques ont été établies au moyen des courbes d'étalonnage de façon à correspondre à l'échelle de teneur en eau sur le graphique adjacent.

Pour tous les sites étudiés, une valeur de teneur en eau à la capacité au champ a été estimée en prenant la teneur en eau moyenne du site la plus élevée au cours des saisons étudiées. Pour les sites

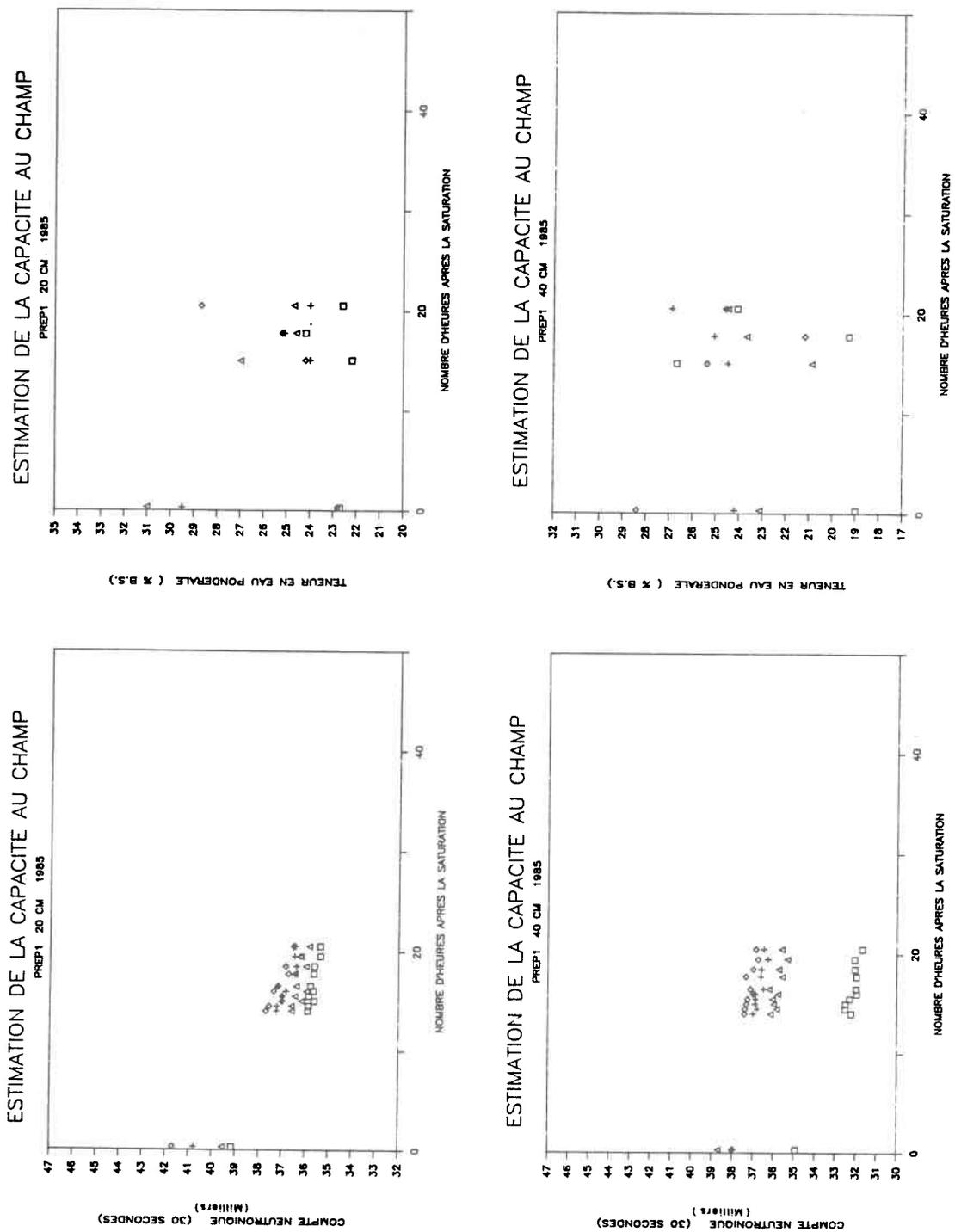


Figure B.11 Évolution de la teneur en eau mesurée par la méthode neutronique (1 compte) et par thermogravimétrie (1 échantillon) en fonction du temps depuis la saturation pour le site PREP1 à 20 et 40 cm de profondeur.

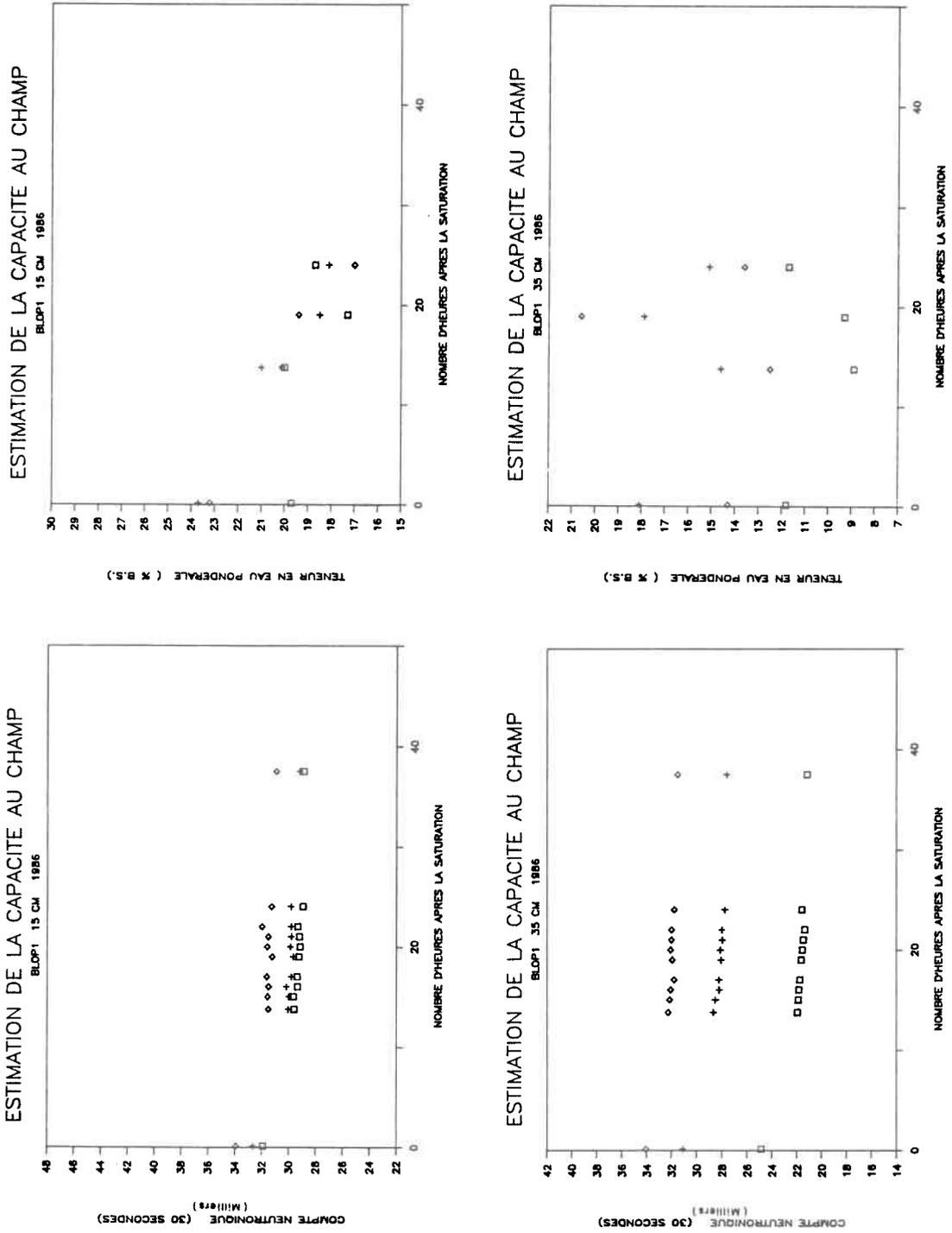


Figure B.12 Évolution de la teneur en eau mesurée par la méthode neutronique (moyenne de trois comptes) et par thermogravimétrie (un échantillon) en fonction du temps depuis la saturation pour le site BLOP1 à 15 et 35 cm de profondeur.

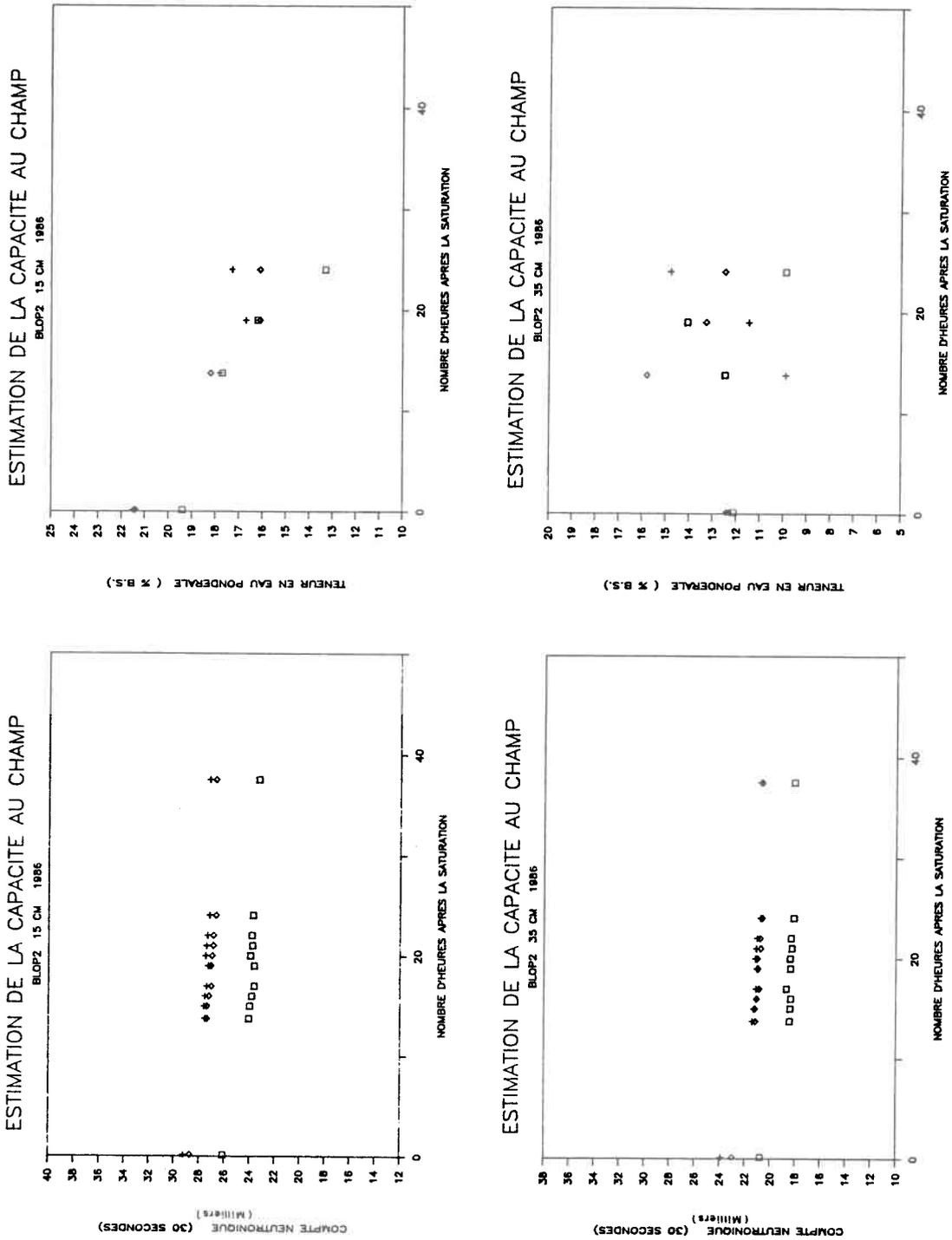


Figure B.13 Évolution de la teneur en eau mesurée par la méthode neutronique (moyenne de trois comptes) et par thermogravimétrie (un échantillon) en fonction du temps depuis la saturation pour le site BLOP2 à 15 et 35 cm de profondeur.

étudiés deux ans de suite, la valeur la plus élevée pour chacune des deux saisons est présentée.

Deux autres valeurs sont déterminées pour tous les sites à partir de la figure 2.1 et de l'équation 2.2 tirées de la littérature en connaissant les caractéristiques texturales et structurales des sols de chaque site (tableau B.3). Notons que ces valeurs ne constituent qu'une approximation grossière puisqu'elles sont établies à partir d'échantillons de sol remaniés et ne tiennent pas compte de la fraction du sol ayant un diamètre supérieur à 2 mm.

Des valeurs de teneur en eau au point de flétrissement ont été mesurées en laboratoire à un potentiel de 15 atmosphères (à partir d'un échantillon séparé en deux) pour tous les sites cultivés en pommes de terre et pour les sites GOSF1 en 1986 et PREF2 (1985). De plus, des valeurs ont été estimées pour chaque site à l'aide de la figure 2.1 et de l'équation 2.1

On observe au tableau B.4 que les valeurs de teneur en eau à la capacité au champ obtenues avec les cinq méthodes sont assez voisines dans certains cas (sites PREP1 et BLOP2). Toutefois, l'équation 2.2 et la figure 2.1 à un degré moindre ont tendance à donner des valeurs trop élevées. Ceci peut être attribué à la fraction grossière du sol qui est négligée. Les valeurs mesurées au champ et en laboratoire sur échantillons non remaniés sont plus représentatives des conditions réelles rencontrées sur les sites, même si les premières ont tendance à être plus élevées.

Les valeurs de teneur en eau au point de flétrissement mesurées en laboratoire sont dans plusieurs cas beaucoup trop élevées, et parfois incohérentes avec les valeurs mesurées à -33 kPa. On ne peut donc les utiliser de façon systématique. L'utilisation de valeurs correspondant à 50% de la teneur en eau à la capacité au champ semble plus sûre et donne des valeurs légèrement inférieures à celles obtenues à l'aide de la figure 2.1 et de l'équation 2.1.

Pour chaque horizon homogène, la réserve en eau utile (RU) du sol a été calculée en prenant comme teneur en eau à la capacité au champ la valeur la plus élevée entre celle mesurée en laboratoire et celle observée au champ et ce au cours d'une saison de croissance (sauf pour le site BUIP1) et en utilisant 50% de la valeur précédente comme teneur en eau au point de flétrissement. Dans deux cas, la teneur en eau au point de flétrissement mesurée en laboratoire a été conservée et utilisée pour calculer la réserve utile à l'aide de la relation précédente inversée. Les valeurs ayant servi au calcul de la réserve utile sont identifiées au tableau B.4 pour chaque site et chaque horizon.

ANNEXE C

ÉTUDE DÉTAILLÉE DES MESURES DE TENEUR EN EAU
DU SOL SERVANT A LA VALIDATION DU MODÈLE

C. ÉTUDE DÉTAILLÉE DES MESURES DE TENEUR EN EAU DU SOL
SERVANT A LA VALIDATION DU MODÈLE

C.1 Revue de littérature sur les différentes méthodes de mesure de
la teneur en eau du sol

Nous ferons dans la présente section un bref survol des principales méthodes de mesure de la teneur en eau des sols et une comparaison des avantages et inconvénients de celles-ci.

On peut diviser les méthodes de mesure de la teneur en eau des sols en trois catégories soient les méthodes directes, indirectes, et empiriques (Bernier et al., 1983).

Les méthodes empiriques sont basées sur l'observation des signes de manque d'eau des plantes ou sur l'observation du comportement d'un échantillon de sol. Quoique simples, leur précision est faible et dépend de l'expérience du manipulateur.

Les méthodes directes de mesure de la teneur en eau des sols comprennent les méthodes thermogravimétriques, les méthodes rapides par déplacement de l'eau à l'aide d'un produit chimique ou d'un solvant, et les méthodes sans extraction d'eau utilisant un picnomètre. On peut également inclure dans cette catégorie les lysimètres qui sont coûteux. La méthode thermogravimétrique utilisant le séchage à l'étuve (pendant 24 heures à 105°C) offre l'avantage de donner directement la teneur en eau pondérale d'un échantillon de sol avec une bonne précision et est simple d'utilisation. Toutefois, l'étuve employée pour le séchage est coûteuse et le nombre d'échantillons requis pour bien représenter un sol hétérogène est élevé. De plus, le prélèvement de plusieurs échantillons dans une petite parcelle modifie celle-ci. Donc, cette méthode présente un fort intérêt pour la calibration d'autres appareils de mesure, ou pour des vérifications périodiques du contenu en eau du sol. Bernier et al. (1983) présentent de façon plus détaillée les différentes méthodes mentionnées précédemment.

Les méthodes indirectes de mesure de la teneur en eau des sols sont basées sur certaines propriétés chimiques et physiques de l'eau et du sol. Ainsi, la densité du sol et la quantité d'eau qu'il contient ont un effet sur la diffusion de rayons gamma ou de neutrons à l'intérieur de celui-ci. Des sondes nucléaires possédant une source émettrice et un élément récepteur utilisent ces caractéristiques pour déterminer la teneur en eau du sol. D'autres appareils exploitent le principe que le potentiel matriciel de l'eau du sol évolue avec la quantité d'eau contenue dans celui-ci. Ainsi, le tensiomètre mesure directement la force de succion de l'eau dans le sol. Un autre appareil, le bloc de gypse, mesure plutôt la résistance électrique à des teneurs en eau du sol différentes. Ces trois dernières méthodes sont connues et couramment utilisées. Elles ont fait l'objet d'une évaluation axée sur les problèmes pratiques d'utilisation (Toliner et Moss, 1985). Les auteurs ont conclu de leurs essais réalisés en Georgie sur un sable argilo-limoneux que la sonde à neutron était plus fiable et nécessitait moins de points de mesure que les deux autres méthodes pour obtenir la même précision, en particulier à des profondeurs plus grandes que 20 cm. Toutefois, l'utilisation de la sonde à neutron nécessite une calibration au champ adéquate pour éviter l'introduction d'une erreur systématique.

Bernier et al. (1983) mentionnent que l'utilisation de la sonde à neutrons devrait être limitée à la recherche à cause de son coût élevé et des précautions à prendre lors de son utilisation, mais qu'elle présente l'avantage de permettre une mesure répétée et précise de la teneur en eau au même endroit sans perturber le site expérimental. Concernant les tensiomètres, leur principale limite est leur gamme de lecture qui ne couvre que les faibles succions (jusqu'à 80 kPa) alors que les blocs de gypse ont une durée de vie limitée et une moindre précision sous conditions humides.

D'autres méthodes de mesures utilisant la télédétection permettent d'obtenir une information globale à l'échelle d'un champ ou d'un territoire sur l'état d'humidité des sols près de la surface.

Les micro-ondes peuvent lire sur une profondeur de 5 à 10 cm ce qui n'est utile que pour les cultures à enracinement superficiel. De plus, le délai requis pour l'interprétation des résultats et les mises au point techniques à réaliser pour rendre ces techniques opérationnelles, limitent l'utilisation de ces méthodes actuellement (Thérien et al., 1985).

C.2 Étude de l'erreur sur les mesures de teneur en eau du sol obtenues par thermogravimétrie et à l'aide d'une sonde à neutrons

Des mesures de la teneur en eau du sol ont été effectuées périodiquement sur tous les sites étudiés au cours de deux étés afin de valider les résultats simulés par le modèle de gestion de l'irrigation.

Deux méthodes de mesure de la teneur en eau du sol ont été retenues. Pour les sites situés à Baie-Comeau et Notre-Dame-de-la-Paix, la méthode thermogravimétrique standard avec séchage à l'étuve a été retenue pour sa précision et à cause du nombre de sites plus restreints alors que la sonde à neutrons a été utilisée pour les sites sur l'île d'Orléans à cause de leur nombre plus important et de la précision et de la fiabilité de la méthode. Nous discuterons donc de l'erreur sur les mesures pour chacune des deux méthodes utilisées.

Notons qu'avec la première méthode, l'humidité est évaluée chaque fois sur un volume de sol différent alors qu'avec la sonde à neutrons, la mesure du niveau d'humidité est effectuée sensiblement sur un même volume de sol.

C.2.1 Thermogravimétrie

L'erreur reliée à la détermination de la teneur en eau pondérale d'un échantillon de sol par la méthode thermogravimétrique (séchage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures) peut provenir d'une perte d'eau

du sol entre le moment de l'échantillonnage et de la pesée humide ou de l'erreur liée à la précision de la balance utilisée. La première source d'erreur est difficile à quantifier et peut être minimisée en prenant les précautions d'usage. L'erreur liée à la précision de la balance par contre peut être évaluée. Brakensiek et al. (1979) estiment qu'une balance ayant une précision de 0,1 g entraîne une erreur de 0,5% sur la teneur en eau d'un échantillon de sol pesant environ 100 g.

L'erreur liée à l'échantillonnage peut être beaucoup plus importante en particulier dans un sol hétérogène ou graveleux puisque le volume d'un échantillon est relativement faible (195 cm³). La présence de cailloux dans un échantillon de sol devrait entraîner une teneur en eau pondérale plus faible puisque la pierre contient très peu d'eau. Par contre, la présence d'un fort pourcentage de matière organique dans un échantillon isolé conduira à une teneur en eau surestimée comparé à l'ensemble du site. La détermination de la teneur en eau moyenne d'un site hétérogène nécessitera une taille d'échantillons plus grande que dans le cas d'un site homogène pour obtenir une variance acceptable. Il sera intéressant d'étudier dans les sections suivantes la variabilité des teneurs en eau dans différents sites ainsi que la distribution statistique décrivant ces mesures.

C.2.2 Sonde à neutrons

La mesure de la teneur en eau d'un volume de sol à l'aide d'une sonde à neutrons est entachée de diverses sources d'erreurs liées à l'appareil lui-même, à la méthode d'étalonnage choisie et à l'hétérogénéité du sol à l'intérieur du site à étudier.

L'appareil de mesure est constitué d'une source radioactive Americium 241/Beryllium ayant une activité de 50 millicuries, d'un détecteur (trifluorure de bore gazeux), d'un intégrateur et d'un tube d'accès en aluminium (voir figure C.1). La source émet un flux de neutrons dans le sol étudié. Les neutrons sont ralentis par des

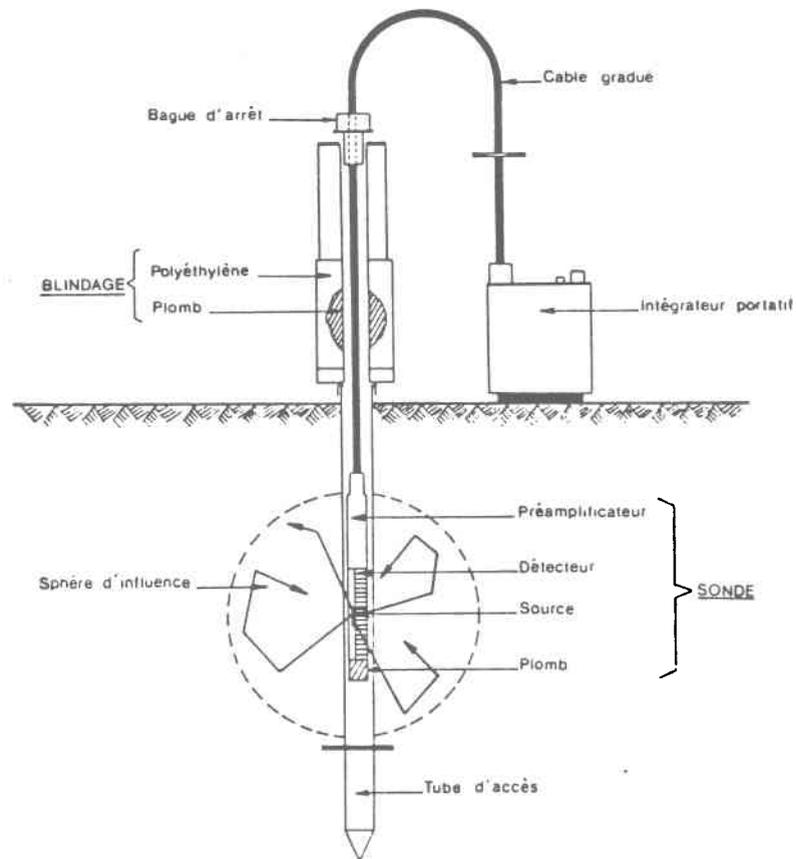


Figure C.1 Schéma de la sonde à neutrons (d'après Bernier et al., 1983).

atomes d'hydrogène présents surtout dans l'eau (H_2O) et le détecteur sert à mesurer le flux de neutrons retournés par les atomes d'hydrogène ce qui donne une mesure indirecte de la teneur en eau du sol. Collas et Normand (1984) mentionnent qu'il existe généralement une relation linéaire sur une large plage d'humidité entre les comptages et l'humidité volumique, ceci dans un même contexte de sol et d'appareillage. Saint-Martin (1973) mentionne également que la géométrie de la source et du détecteur est choisie de façon à donner une variation linéaire entre le taux de comptage et l'humidité. L'aluminium est souvent choisi comme matériau pour le tube d'accès parce qu'il offre l'avantage de ne pas absorber les neutrons (Hauser, 1984; Collas et al., 1984).

Erreurs liées à l'appareil

Les erreurs liées à l'appareil proviennent de la dérive de ses indications à court terme ou à long terme et de l'erreur statistique du comptage. La dérive à long terme provient de la décroissance de l'intensité du rayonnement émis par la source. Selon Saint-Martin (1973), la source Américium 241 possède une demie-vie de 458 ans et le nombre d'impulsions décroît d'environ 0,3 pour cent par année. Les fluctuations à court terme des taux de comptage sont dues, selon le même auteur, à l'influence de la température, de l'humidité et de la charge de la batterie sur le dispositif électronique de détection et de comptage. Cette erreur peut être réduite à moins de 1 pour cent en installant sur le site de mesure un milieu de référence connu. Hauser (1984) traite de l'influence de la température sur le compte standard d'une sonde.

La nature aléatoire des radiations entraîne une variation à court terme de l'intensité de l'émission des neutrons. Collas et Normand (1984) rapportent que la distribution des impulsions détectées N suit une Loi de Poisson pouvant être approchée par une loi de Gauss à cause des valeurs élevées des comptes. L'erreur type (ET) commise sur le nombre d'impulsions (N) détectées s'exprime comme suit:

$$ET (N) = \sqrt{N} \quad (C.1)$$

Saint-Martin (1973) présente une expression permettant de calculer l'erreur-type sur la teneur en eau volumique attribuable à l'erreur statistique du comptage. Cette relation (équation C.2) admet que les erreurs se distribuent selon une loi de probabilité gaussienne et considère de plus un seuil de confiance de 95%.

$$ET (Hv) = \frac{1,96}{d(n)/d(Hv)} \sqrt{n/t} \quad (C.2)$$

- ET (Hv) : erreur-type de l'humidité volumique (% volumique)
n : taux de comptage, ou nombre d'impulsions N par seconde
t : temps de comptage en seconde
d(n)/d(Hv) : pente de la droite d'étalonnage

Ainsi, un comptage de 28 000 réalisé en 30 secondes sur un sol ayant une masse volumique apparente de 1.5 Mg/m³ et une pente de la droite d'étalonnage égale à 50 (comptes par seconde et par pourcentage de variation de teneur en eau volumique), entraînera une erreur-type de 0,22 pour cent sur la teneur en eau volumique et de 167 (ou 0,6% en erreur relative) sur le comptage.

Erreur due à l'étalonnage

L'erreur sur l'évaluation de la teneur en eau due à l'étalonnage de la sonde à neutrons est liée à la méthode utilisée. Collas et Normand (1984) mentionnent deux grands groupes de méthodes d'étalonnage, soit l'analyse neutronique et les méthodes gravimétriques.

L'analyse neutronique tient compte dans un modèle d'étalonnage des différents facteurs ayant une influence sur la relation entre les indications de l'appareil et la teneur en eau volumique du sol. Les caractéristiques de l'appareil (source, détecteur; nature, géométrie et conditions de pose du tube d'accès) sont prises en compte. De plus, différents paramètres des sols ont une influence sur la position de la courbe de calibration et doivent être mesurés en laboratoire à partir d'un échantillon. Hauser (1984) mentionne que cette méthode est peu valable pour la majorité des sols cultivés à cause de l'ampleur des analyses chimiques et physiques qu'elle requiert pour bien décrire un site.

Décrivons les principales caractéristiques du sol pouvant influencer la calibration. La matière organique présente en grande quantité dans un sol absorbe une partie des neutrons émis. D'autres éléments comme le fer, le potassium, la manganèse, le bore et le chlore diminuent les comptes lorsque leur concentration dépasse un certain seuil. Collas et Normand (1984) rapportent que la présence de 0,003% de bore, ou de 0,25% de chlore, ou de 3,5% de fer dans un sol entraîne une diminution des comptages de l'ordre de 8% en valeur relative. La densité apparente du sol peut également avoir une influence importante sur les comptages selon les auteurs précédents. Ceux-ci mentionnent qu'une augmentation de 0,1 g/cm³ de la masse volumique sèche apparente se traduit, pour une teneur en eau volumique constante, par une augmentation de comptage correspondant à une augmentation d'humidité volumique de l'ordre de 1% à 2% en valeur absolue. Par contre, Hauser (1984) cite divers auteurs n'ayant pas trouvé d'effet significatif de la densité apparente, de la matière organique et des éléments chimiques présents dans la plupart des sols sur la droite d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons. Selon le même auteur toutefois, certains minéraux argileux peuvent retenir une proportion importante d'eau liée et déplacer la courbe de calibration.

D'autres facteurs comme la mesure d'humidité près de la surface (Stocker, 1984; Schudel, 1983; Vachaud et al., 1977; Saint-Martin, 1973; Cardon, 1974), la présence de variations brusques d'humidité dans le profil de sol (Vachaud et al., 1977; Saint-Martin, 1973) ou la présence de vides le long du tube d'accès (De Boodt, 1974) peuvent affecter la calibration de l'appareil. Stocker (1984) traite également des problèmes de calibration rencontrés dans des sols contenant un pourcentage élevé de pierres.

Les méthodes gravimétriques permettent l'étalonnage au champ ou en laboratoire d'une sonde à neutrons directement à partir des teneurs en eau pondérales des échantillons prélevés aux mêmes profondeurs que les comptes. La densité apparente du sol échantillonné doit être connue.

Les courbes de calibration obtenues à l'aide de ces méthodes sont plus fiables et plus représentatives des conditions au champ que les courbes de calibration fournies par le manufacturier pour chaque appareil (Hauser, 1984; Chanasyk et al., 1986). De plus, la calibration de l'appareil au champ est plus sûre que la calibration en laboratoire dû à la difficulté de reproduire en laboratoire les conditions rencontrées au champ et à l'absence de remontée capillaire en laboratoire (Vachaud et al., 1977).

Les difficultés rencontrées et les erreurs introduites lors de l'établissement d'une courbe de calibration au champ proviennent principalement de la variabilité des propriétés physiques et chimiques du sol entourant le tube d'accès (Collas et al., 1984), du faible volume de sol exploré par la sonde et de la faible étendue des valeurs de teneur en eau rencontrées (Vachaud et al., 1977).

Divers auteurs (Collas et al., 1984; Vachaud et al., 1977) soulèvent l'importance de considérer avec soin les hypothèses régissant la régression linéaire simple pour l'étalonnage d'une sonde à neutrons.

D'abord, les hypothèses à respecter pour l'utilisation d'une régression linéaire simple de Y en fonction de X sont présentées par Bobée (1983). Il doit exister une relation linéaire entre la variable dépendante (Y) et la variable indépendante (X). La variable dépendante (Y) est distribuée suivant une loi normale de variance constante et indépendante de X. Les observations de Y sont mutuellement indépendantes. De plus, la valeur de la variable dépendante est supposée connue sans erreur.

Selon divers auteurs (Collas et al., 1984; Vachaud et al., 1977), l'hypothèse de linéarité entre le compte neutronique (N) et la teneur en eau volumique (Hv) est respectée.

D'un point de vue théorique, Hv serait la variable indépendante supposée connue sans erreur, et N la variable dépendante de variance constante.

Or, dans la réalité, l'évaluation de la teneur en eau volumique est entachée d'une erreur liée à la méthode de mesure de la teneur en eau pondérale, à l'erreur de mesure de la densité apparente sèche et à l'hétérogénéité du sol autour du tuyau d'accès. La mesure du compte neutronique est également entaché d'une erreur due à l'appareil.

La régression de Hv par rapport au compte neutronique ne donne pas une pente équivalente à celle de la régression inverse puisqu'on ne minimise pas le carré des erreurs de la même variable (Bobée, 1983). Ainsi, Collas et al. (1984) rapportent que pour des teneurs en eau ayant une variance non nulle, la régression linéaire simple de N par rapport à Hv induit un biais systématique faible comparé à celui que l'on peut faire en utilisant la régression linéaire inverse $Hv = f(N)$. Le biais induit par la variabilité de la teneur en eau volumique (Hv) du sol autour du tube d'accès peut être corrigé (Greacen et al., 1981). Bobée (1981) présente deux modèles (l'un fonctionnel et l'autre structurel) permettant d'estimer les paramètres d'une régression linéaire lorsque les deux variables sont entachées d'une erreur dont on connaît l'importance. Si l'erreur d'une des deux variables est négligeable par rapport à l'erreur de l'autre, on peut se ramener au cas d'une régression linéaire simple de la variable connue avec le plus d'erreur en fonction de la seconde.

Haverkamp et al. (1984) traitent de l'importance de l'erreur associée aux deux variables étudiées sur la courbe de la calibration et présentent un développement statistique permettant de calculer des courbes de calibration non biaisées.

L'importance de l'erreur sur les deux variables à relier varie suivant le sol étudié et l'appareil utilisé. Flühler et al. (1973) ont trouvé que l'écart-type des teneurs en eau mesurées par thermogravimétrie sur des échantillons était dix fois plus élevé que celui des mesures neutroniques pour un sol donné. Vachaud et al. (1977) ont

également calculé une erreur relative sur le calcul de la teneur en eau volumique 2,5 fois plus élevé que l'erreur relative sur la mesure des comptes neutroniques, ce rapport étant en réalité plus élevé que 2,5 puisqu'il ne considère pas les erreurs entraînées par la présence d'hétérogénéités dans le profil du sol.

Il est donc important d'évaluer l'erreur associée aux deux mesures à corréler, Hv et N, pour justifier le type de régression fournissant l'étalonnage le plus adéquat. Vachaud et al. (1977) présentent deux relations pour évaluer l'erreur relative sur la mesure de l'humidité du sol à l'aide de la sonde et par thermogravimétrie.

L'erreur relative sur le rapport de comptage d'une sonde à neutrons peut s'exprimer comme suit:

$$\frac{Dr}{r} = \left[\left(\frac{DN}{N} \right)^2 + \left(\frac{DNs}{Ns} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C.3)$$

r = rapport de comptage (=N/Ns)
N = compte de l'appareil
Ns = compte standard de l'appareil

Comme l'émission de neutrons suit une Loi de Poisson (équation C.1), l'erreur relative sur les comptes devient:

$$DN/N = 1/\sqrt{N} \quad (C.4)$$

L'erreur relative associée à la teneur en eau volumique (Wv) du sol en considérant l'erreur sur l'évaluation de la densité apparente et de la teneur en eau pondérale s'exprime comme suit:

$$\frac{DHv}{Hv} = \left[\left(\frac{DDa}{Da} \right)^2 + \left(\frac{DHp}{Hp} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (C.5)$$

Hv = teneur en eau volumique (% B.S.)
Da = densité apparente sèche (g/cm³)

- Hp : teneur en eau pondérale (% B.S.)
DDa : erreur standard sur la détermination de la densité
apparente (g/cm³)
DHp : erreur standard sur l'évaluation de la teneur en eau pondérale

L'erreur sur l'évaluation de la teneur en eau pondérale peut provenir soit de la précision de la balance ($\pm 0,1$ g), ou de l'hétérogénéité du sol autour du tuyau d'accès. L'erreur engendrée par la précision de la balance est toutefois négligeable devant le seconde.

Erreur due à l'hétérogénéité du sol

L'erreur sur l'évaluation de la teneur en eau provenant de l'hétérogénéité du sol à l'intérieur d'un site à étudier est rattachée au faible volume de sol couvert par une lecture de la sonde. Lorsque le sol est sec, l'appareil couvre une sphère de 15 cm de diamètre comparé à 7.5 cm lorsqu'il est humide.

Vauclin et al. (1984) rapportent qu'en présence de sites homogènes, la calibration constitue la source d'erreur la plus importante. Cette erreur peut être réduite en utilisant un traitement statistique non biaisé pour l'estimation des paramètres de la courbe de calibration. Pour les sites hétérogènes par contre, l'erreur liée à la position devient la plus importante. Elle peut être réduite en augmentant le nombre de points de mesure.

C.3 Présentation et traitement des mesures de teneur en eau
recueillies sur chaque site

C.3.1 Thermogravimétrie

La méthode thermogravimétrique a été utilisée pour assurer le suivi de la teneur en eau du sol sur quatre parcelles situées à Baie-Comeau (2) et à Notre-Dame-de-la-Paix (2) au cours de deux étés successifs. Les parcelles étaient cultivées en pommes de terre.

A Baie-Comeau, huit échantillons étaient prélevés sur chaque site à intervalles de 2 à 4 jours alors que sept échantillons ont été prélevés à Notre-Dame-de-la-Paix aux mêmes intervalles.

Les valeurs des teneurs en eau pondérales du sol mesurées au cours des étés 1985 et 1986 sont présentées pour les quatre sites des deux localités aux tableaux C.1 et C.2. Les numéros des échantillons correspondent à une position prédéterminée et constante au cours de la saison.

De façon à obtenir une information condensée et représentative du degré d'humidité du sol sur chaque site à partir de l'échantillon x_j mesuré, nous avons d'abord calculé la moyenne \bar{x} et l'écart-type S (tiré de la variance non biaisée) des valeurs de teneurs en eau pondérales pour chaque jour de mesure. La moyenne et la variance non biaisée d'un échantillon sont définies à l'aide des relations C.6 et C.7 tirées de Bobée (1983).

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (C.6)$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (C.7)$$

Tableau C.1 Teneurs en eau pondérales du sol mesurées par thermogravimétrie pour les sites localisés à Baie-Comeau.

DATE (jour Julien)	POSITION DU TROU DE MESURE										MOYENNE	S ¹
	1	2	3	4	5	6	7	8				
177	23.5	20.7	33.2*	41.2*	23.9	25.9	18.8	23.4	26.3	7.36		
183	17.4	21.2	16.7	20.3	19.4	20.3	18.6	19.5	19.2	1.53		
185	16.8*	21.4	17.4	20.7	19.2	20.6	18.5	18.8	19.2	1.63		
189	8.6	23.2	19.0	23.2	22.2	21.4	22.1	21.5	20.2	4.85		
191	17.0	21.8	16.5	22.6	21.2	21.4	19.8	19.8	20.0	2.23		
193	18.6	21.5	18.0	22.7	22.7	22.3	21.6	21.5	21.1	1.81		
196	19.6	22.9	18.4	23.1	21.6	21.9	21.6	21.9	21.4	1.60		
198	19.4	22.4	18.9	22.4	22.8	22.4	22.4	21.6	21.5	1.52		
200	16.9	21.2	16.9	21.5	21.6	21.3	20.0	20.7	20.0	1.99		
203	18.9	22.1	19.2	22.4	22.3	21.5	21.6	21.5	21.2	1.37		
206	17.6	21.5	16.7	22.2	22.2	21.4	20.8	21.0	20.4	2.10		
210	17.8	22.3	17.8	21.7	23.3	22.2	21.7	21.0	21.0	2.07		
213	17.1	20.9	16.5	21.6	20.1	20.9	19.7	18.9	19.5	1.85		
217	16.1	18.5	13.7	17.4	17.9	17.6	16.4	16.8	16.8	1.48		
219	13.9	17.4	13.2	17.5	15.8	15.9	13.6	15.3	15.3	1.65		
221	18.6	21.4	15.6	20.8	20.8	20.2	20.9	19.9	19.8	1.89		
226	16.1	17.7	15.1	17.5	17.5	17.3	17.0	17.6	17.0	0.91		

8.7 : Valeur rejetée au seuil 1 % par le test de Grubbs.

* : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau C.1 Teneurs en eau pondérales du sol mesurées par thermogravimétrie pour les sites localisés à Baie-Comeau (suite).

DATE (jour julien)	POSITION DU TROU DE MESURE								MOYENNE	S ¹	
	1	2	3	4	5	6	7	8			
177	27.4	24.4	27.2	27.5	28.2	30.1	29.2	27.7	27.7	27.7	1.7
183	23.3	22.9	23.6	23.4	24.1	21.7	24.0	25.2	23.5	23.5	1.0
185	22.6	22.0	23.8	22.0	23.8	26.3	24.4	25.5	23.8	23.8	1.6
189	24.9	23.2	27.1	24.4	31.0	24.6	26.0	22.6	25.5	25.5	2.6
191	23.5	23.6	25.3	23.9	25.9	26.3	26.6	25.6	25.1	25.1	1.2
193	25.6	25.6	25.3	27.4	26.8	27.5	27.3	26.0	26.4	26.4	0.9
196	25.3	24.2	26.1	25.5	28.3	28.0	26.4	26.5	26.3	26.3	1.4
198	25.7	24.2	25.1	25.5	27.3	26.2	28.7	26.7	26.2	26.2	1.4
200	21.5	23.0	24.0	24.2	27.6	23.4	26.6	26.0	24.5	24.5	2.0
203	23.1	22.5	24.1	24.3	27.4	26.0	26.5	27.8	25.2	25.2	2.0
206	23.5	23.9	23.4	23.7	26.2	26.7	27.5	27.7	25.3	25.3	1.9
210	23.5	23.7	24.7	25.4	27.4	26.6	27.5	27.4	25.8	25.8	1.7
213	22.9	22.9	23.7	24.5	26.3	26.4	27.4	26.8	25.1	25.1	1.8
217	22.5	21.9	22.4	23.1	25.3	26.5	25.5	25.4	24.1	24.1	1.8
219	23.3	22.2	21.8	22.5	24.8	24.2	25.1	25.0	23.6	23.6	1.3
221	24.9	22.6	23.9	23.3	27.3	27.5	27.8	26.7	25.5	25.5	2.1
226	24.3	24.2	22.3	22.3	25.2	25.7	24.2	23.2	23.9	23.9	1.2

8.7 : Valeur rejetée au seuil 1 % par le test de Grubbs.

* : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau C.1 Teneurs en eau pondérales du sol mesurées par thermogravimétrie pour les sites localisés à Baie-Comeau (suite).

DATE (jour julien)	POSITION DU TROU DE MESURE								MOYENNE	S ¹
	1	2	3	4	5	6	7	8		
171	17.2	17.7	18.5	17.7	18.9	17.8	19.5	17.4	18.1	0.8
174	16.0	16.9	17.7	15.8	19.3	17.6	18.5	16.5	17.3	1.2
177	20.3	19.6	20.5	20.4	20.3	19.3	21.2	19.8	20.2	0.6
181	18.9	19.6	18.3	19.0	20.1	19.1	20.5	18.7	19.3	0.7
184	18.7	17.5	19.6	19.6	19.9	22.0	20.2	18.8	19.5	1.3
188	18.4	18.8	18.9	18.6	19.3	19.8	19.2	19.0	19.0	0.4
190	16.8	18.6	18.5	18.2	19.8	19.1	19.3	20.9	18.9	1.2
192	16.0	17.2	18.0	17.6	18.7	17.4	18.5	18.5	17.7	0.9
195	16.7	16.9	17.8	16.9	18.5	18.3	19.9	17.6	17.8	1.1
197	18.9	19.3	20.6	21.4	20.9	20.3	19.6	19.5	20.1	0.9
199	19.6	19.8	20.1	19.8	21.5	21.2	22.4	20.3	20.6	1.0
202	18.7	18.1	19.2	18.1	20.4	18.6	19.9	19.0	19.0	0.8
204	16.7	16.6	18.4	18.3	18.4	17.5	19.7	19.2	18.1	1.1
209	14.9	14.4	15.5	16.3	18.3	17.4	18.8	17.7	16.7	1.6
211	12.9	12.4	13.7	14.2	19.2	15.0	17.1	16.0	15.1	2.3
213	14.9*	13.4	17.0	18.5	21.6		22.5	19.2	18.2	3.3
216	10.2	18.8	19.4	18.5	21.9	20.3	21.4	19.3	18.7	3.6
218	<u>17.3</u>	16.1	13.7	18.7	19.5	22.3	20.5	19.2	18.4	2.7
220	16.8	15.8	17.4	16.2	20.0	17.4	20.0	18.4	17.8	1.6
223	14.0	15.8	14.1	14.8	19.8	16.2	18.5	17.9	16.4	2.1
225	14.5	15.4	14.7	14.8	18.1	16.8	18.9	18.1	16.4	1.8

8.7 : Valeur rejetée au seuil 1 % par le test de Grubbs.

* : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau C.1 Teneurs en eau pondérales du sol mesurées par thermogravimétrie pour les sites localisés à Baie-Comeau (suite).

DATE (jour julien)	POSITION DU TROU DE MESURE								MOYENNE	S ¹
	1	2	3	4	5	6	7	8		
171	20.1	20.1	20.4	20.5	20.5	21.5	22.5	22.5	21.0	1.0
174	19.6	19.9	19.2	20.8	21.3	20.5	23.4	21.3	20.8	1.3
177	22.3	22.4	23.4	23.3	26.0	24.0	25.5	26.0	24.1	1.5
181	21.6	21.5	22.5	22.2	22.6	22.5	25.8	24.3	22.9	1.5
184	20.5	21.2	21.6	21.7	21.7	22.4	22.3	24.2	22.0	1.1
188	21.2	20.1	21.2	21.1	22.7	21.6	23.3	22.8	21.8	1.1
190	20.5	20.0	20.0	23.0	21.6	23.0	23.3	23.6	21.9	1.5
192	20.9	19.7	19.5	20.0	21.1	20.6	21.2	22.4	20.7	0.9
195	21.0	20.8	22.1	20.8	24.1	20.2	22.4	23.8	21.9	1.5
199	24.4	23.2	24.1	23.4	25.2	23.8	25.5	26.1	24.5	1.0
202	22.8	22.0	23.6	21.6	23.5	22.7	24.1	23.1	22.9	0.8
204	21.3	21.2	21.5	20.9	23.4	22.3	22.7	23.9	22.2	1.1
209	20.7	20.9	21.1	20.5	22.9	23.2	23.4	23.5	22.0	1.3
211	19.5	20.1	20.9	19.6	22.9	21.9	22.4	22.3	21.2	1.4
213	23.2	19.2	23.5	22.7	26.0	22.8	24.1	23.8	23.2	1.9
216	23.8	23.6	23.3	24.0	24.6	23.7	26.6	25.1	24.3	1.1
218	25.6	22.0	21.5	20.6	20.1	23.7	21.7	24.8	22.5	2.0
220	21.9	21.5	21.0	21.0	20.8	24.6	21.3	22.8	21.9	1.3
223	21.6	21.4	20.0	19.2	18.0	23.4	21.0	23.4	21.0	1.9
225	22.7	20.9	21.4	20.3	20.3	23.5	21.0	23.4	21.7	1.3

8.7 : Valeur rejetée au seuil 1 % par le test de Grubbs.

* : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau C.2 Teneurs en eau pondérales du sol mesurées par thermogravimétrie pour les sites localisés à Notre-Dame-de-la-Paix.

Site NDPP1 (1985), pour les vingt premiers centimètres de sol

DATE (jour julien)	POSITION DU TROU DE MESURE								MOYENNE	S ¹
	1	2	3	4	5	6	7	8		
142	15.3	14.2	14.7	18.0	13.3	12.3	14.0		14.5	1.8
144	12.6	12.7	11.6	12.2	12.6	11.9	13.2		12.4	0.5
147	13.5	12.6	13.6	12.4	13.3	11.6	13.3		12.9	0.7
149	12.0	12.3	10.7	12.2	11.9	10.4*	11.8*		11.6	0.7
151	10.9	9.6	11.6	12.0	11.4	3.1*	4.8*		9.0	3.6
154	13.2	12.7*	12.5	12.6	11.7*	5.3*	13.3		11.6	2.8
156	11.1	3.8*	11.0	11.2	16.6*	11.7	11.9		11.0	3.8
158	13.0	14.5	15.0	14.9	12.0	12.5	13.9		13.7	1.2
161	12.5	13.7	12.5	14.8	12.7	12.3	11.8		12.9	1.0
165	13.6	15.1	14.3	13.9	13.3	12.9	13.8		13.8	0.7
168	11.5	12.3	11.7	11.5	11.0	10.7	12.7		11.6	0.7
170	12.8	13.8	13.6	12.8	12.8	12.3	14.2		13.2	0.7
172	11.4	11.9	10.5	21.6	11.6	10.9	12.1		12.9	3.9
176	14.0	15.3	14.7	14.3	13.6	13.4	15.4		14.4	0.8
178	13.8	13.8	13.6	13.7	13.2	13.8	15.4		13.9	0.7
185	15.6	14.8	15.9	15.4	14.0	13.8	15.7		15.0	0.8
189	13.6	13.5	12.6	12.3	11.4	11.8	13.2		12.6	0.8
192	12.5	13.3	12.6	13.2	11.9	11.3	12.6		12.5	0.7
197	13.5	13.5	13.0	15.1	13.0	11.9	14.0		13.4	1.0
199	12.1	12.7	12.3	12.4	11.5	9.9	13.3		12.0	1.1
204	9.8	10.3	8.5	6.0	8.0	7.5	7.3		8.2	1.5
206	10.9	11.2	10.9	6.9	9.4	7.2	9.1		9.4	1.8
211	12.1	12.5	10.7	11.7	10.2	9.8	9.2		10.9	1.2
213	9.5	10.8	8.5	9.6	9	6.6	7.5		8.8	1.4
217	12.4	8.7	10.8	12.7	12.7	12.5	12.8		11.8	1.5
220	13.2	13	12.4	12.2	8.5	8.3	10.7		11.2	2.1
225	7.1	8.1	9.6	8.8	7.9	6	7.8		7.9	1.2
227	8.8	8.6	6.6	7	6.4	6	7.3		7.2	1.1
232	13.3	14.1	13.4	17.9	14.31	12.7	17.3		14.7	2.0
234	12.1	12.8	13.1	11.7	10.8	9.7	12.4		11.8	1.2
240	15.2	17.3	16	14.9	14.1	13.8	15.2		15.2	1.2

8.7 : Valeur rejetée au seuil 1 % par le test de Grubbs.

* : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau C.2 Teneurs en eau pondérales du sol mesurées par thermogravimétrie pour les sites localisés à Notre-Dame-de-la-Paix (suite).

Site NDPP2 (1985), pour les vingt premiers centimètres de sol

DATE (jour julien)	POSITION DU TROU DE MESURE								MOYENNE	S ¹
	1	2	3	4	5	6	7	8		
142	14.5	18.0	16.4	14.8	15.9	17.1	16.8		16.2	1.3
144	14.2	13.6	13.0	15.1	15.5	15.6	12.4		14.2	1.3
147	14.5	13.4*	14.0	16.6	16.5	16.1	13.5*		14.9	1.4
149	13.7	4.8*	12.6	15.3	14.1	13.8	2.2*		10.9	5.2
151	11.9	4.0*	13.6	12.9	14.5	13.6	12.2		11.8	3.6
154	15.4	12.7	13.9	16.3	16.0	14.8	13.1		14.6	1.4
156	12.6	11.4	14.1	14.1	13.4	14.3	12.7		13.2	1.1
158	14.6	14.0	15.6*	15.3	15.5	16.4	14.5		15.1	0.8
161	13.6	13.3	4.5*	15.8	14.3	15.4	13.4		12.9	3.8
165	14.5	13.9	15.7	17.1	14.5	16.7	14.6		15.3	1.2
168	13.6	11.6	13.2	15.1	17.8	13.6	12.4		13.9	2.0
170	14.6	14.3	15.2	16.9	15.5	15.3	13.9		15.1	1.0
172	13.3	13.2	13.6	14.6	13.1	14.1	14.8		13.8	0.7
176	16.1	14.9	17.5	17.7	16.4	17.6	15.7		16.6	1.1
178	14.8	14.3	15.4	17.5	17.1	17.4	15.1		15.9	1.3
185	16.7	17.2	17.4	19.2	17.3	17.4	15.9		17.3	1.0
189	14.3	14.6	14.6	15.5	13.8	16.7	13.3		14.7	1.1
192	14.1	14.1*	14.9	17.0	14.4	14.2	13.2		14.6	1.2
197	14.7	26.9*	15.8	16.8	14.2	16.1	12.9		16.8	4.7
199	12.1	12.1*	14.6	15.9	13.3	12.6	10.9		13.1	1.7
204	6.9	18.3	12.4	11.8	10.1	8.9	11.0		11.3	3.6
206	11.5	10.2	13.5	11.7	10.9	10.5	10.6		11.3	1.1
211	13	9.6	12.2	14.1	12.5	15.9	12.1		12.8	1.9
213	9.8	9.2	12	11.3	8.7	8.9	7.6		9.6	1.5
217	11.3	10.7	12.1	14	12.4	10.3	10.5		11.6	1.3
220	13.3	13.6	14.9	16.8	15.1	14.8	13.4		14.6	1.2
225	7.9	7.2	9.8	12.4	13.2	9.6	7.2		9.6	2.4
227	5.8	6.6	8.4	8.8	8.5	8.3	7.6		7.7	1.1
232	16.3	14.8	15.3	19.5	14.2	11.8	15.7		15.4	2.3
234	11.3	12.1	12.8	14.9	13.3	13.6	12.6		12.9	1.2
240	18.2	17.6	17.5	21.1	18.4	16.9	16.1		18.0	1.6

8.7 : Valeur rejetée au seuil 1 % par le test de Grubbs.

* : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau C.2 Teneurs en eau pondérales du sol mesurées par thermogravimétrie pour les sites localisés à Notre-Dame-de-la-Paix (suite).

Site NDPP1 (1986), pour les vingt premiers centimètres de sol		POSITION DU TROU DE MESURE								MOYENNE	S ¹
DATE (jour julien)		1	2	3	4	5	6	7	8		
146	21.2 [*]	13.8	13.8	12.1	12.3	12.2	14.6	14.3	3.2		
149	12.5	16.0	12.2	12.8	10.2	12.2	15.1	13.0	1.9		
153	11.4	14.0	14.2	15.4	12.4	14.7	15.0	13.9	1.4		
156	12.9	13.4	13.4	14.8	11.4	10.5	15.7	13.2	1.8		
167	11.5	10.7	11.2	11.3	8.7	11.8	13.3	11.2	1.4		
170	11.7	11.5	10.6	10.6	14.5	12.0	13.4	12.0	1.4		
174	11.4	14.1	10.1	12.0	9.5	10.4	12.6	11.4	1.6		
177	12.6	14.2	15.0	12.4	10.5	13.3	15.6	13.4	1.7		
181	13.7	13.5	13.5	15.4	11.0	13.9	17.0	14.0	1.8		
184	16.5	17.1	19.0	14.5	15.3	16.0	18.4	16.7	1.6		
188	13.1	13.5	12.9	13.3	10.2	11.7	14.0	12.7	1.3		
191	11.5	8.7	12.0	8.2	6.5	8.5	9.5	9.3	1.9		
195	10.2	9.6	9.5	8.4	7.1	7.4	6.5	8.4	1.4		
198	10.9	7.6	8.2	8.1	8.1	6.6	6.3	8.0	1.5		
202	8.7	7.1	6.5	10.1	7.3	6.5	6.3	7.5	1.4		
205	9.6	7.9	6.1	9.4	7.6	6.4	6.4	7.6	1.4		
209	14.0	12.8	12.3	11.9	11.7	11.4	15.4	12.8	1.4		
212	12.4	12.2	12.0	12.3	12.0	11.5	14.6	12.4	1.0		
216	14.1	13.7	12.3	13.1	12.0	12.1	13.2	12.9	0.8		
219	12.8	12.5	12.3	12.8	10.6	11.8	12.8	12.2	0.8		
226	10.5	12.3	10.9	10.3	10.1	9.7	12.4	10.9	1.1		

8.7 : Valeur rejetée au seuil 1 % par le test de Grubbs.

* : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau C.2 Teneurs en eau pondérales du sol mesurées par thermogravimétrie pour les sites localisés à Notre-Dame-de-la-Paix (suite).

DATE (jour julien)	POSITION DU TROU DE MESURE								MOYENNE	S ¹
	1	2	3	4	5	6	7	8		
146	14.0	12.7	15.2	14.5	12.2	11.0	12.7	13.2	1.4	
149	13.0	12.6	14.2	13.9	11.5	9.5	11.7	12.3	1.6	
153	12.6	14.6	14.6	16.9	13.8	14.3	12.3	14.2	1.5	
156	12.1	13.4	14.2	15.4	14.2	15.3	15.7	14.3	1.3	
167	11.5	10.7	12.1	13.2	11.7	11.0	10.0	11.5	1.0	
170	11.6	11.3	10.5	7.7	12.5	10.9	8.9	10.5	1.6	
174	10.3	11.5	12.5	8.4	11.7	12.2	9.8	10.9	1.5	
177	12.5	12.5	14.1	13.6	13.8	12.9	11.8	13.0	0.8	
181	11.4	16.2	13.0	17.8	12.8	13.5	12.0	13.8	2.3	
184	14.4	18.1	16.5	15.7	15.7	14.6	16.0	15.9	1.2	
188	10.3	13.0	11.8	13.0	11.6	12.0	10.5	11.7	1.1	
191	9.0	9.0	10.0	6.4	7.5	9.8	9.0	8.7	1.3	
195	9.9	7.4	11.3	7.0	3.1	6.8	9.9	7.9	2.7	
198	9.2	6.8	11.0	7.3	5.4	5.6	8.7	7.7	2.0	
202	12.2	11.5	12.2	12.3	8.8	11.6	11.0	11.4	1.2	
205	7.9	8.5	7.8	6.1	5.0	6.6	4.5	6.6	1.5	
209	10.7	13.3	13.1	14.9	11.3	12.8	10.9	12.4	1.5	
212	12.2	11.4	12.8	13.8	10.3	12.8	11.6	12.1	1.1	
216	11.5	10.7	13.2	10.2	11.5	11.2	12.7	11.6	1.0	
219	10.9	12.0	12.2	14.3	11.3	12.8	11.4	12.1	1.1	
226	10.0	11.0	10.5	12.3	10.3	10.2	9.5	10.5	0.9	

8.7 : Valeur rejetée au seuil 1 % par le test de Grubbs.

* : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

On observe (tableaux C.1 et C.2) que les écart-types des échantillons de teneur en eau du sol sont généralement inférieurs à 2.5% en valeur absolue. De plus, les rapports écart-type sur la moyenne sont en général voisins de 0,1. Toutefois, la présence de certains échantillons ayant des écart-types variant de 3 à 7% en valeur absolue nous amène à vérifier la présence de valeurs non représentatives du site dans l'échantillon.

Bobée (1983) présente un test objectif de détection des valeurs aberrantes (Grubbs) permettant de déclarer une valeur douteuse aberrante avec un risque d'erreur connu à condition que les observations proviennent d'une distribution normale. De plus, les observations doivent être des événements aléatoires et indépendants.

L'hypothèse de normalité peut être vérifiée au moyen du test W décrit par Bobée (1983), ce test étant valable pour des échantillons de petite taille. Par contre, une attention particulière doit être portée à la nature aléatoire des mesures à cause du lien plus ou moins important qu'il semble exister entre la position de la mesure sur le site et la teneur en eau du sol pour des dates différentes.

Le test de Grubbs appliqué aux mesures originales de teneurs en eau conduit au rejet d'un trop grand nombre de mesures pour un risque d'erreur de 1%.

L'hypothèse de normalité étant acceptée par le test W au seuil 5% pour la majorité des séries d'échantillons, la mauvaise réponse du test de Grubbs peut être reliée à deux causes. D'abord, le lieu qu'il semble exister entre la position sur le site et l'humidité, en particulier pour le site BUIP1 85, conduit à rejeter une forte proportion des mesures réalisées à une position donnée (figure C.1a). De plus, lorsque plusieurs mesures sont très voisines, une valeur extrême peu éloignée de la moyenne peut être rejetée (site NDPP1-85) tandis qu'une valeur aberrante mesurée au cours d'une journée où les valeurs centrales sont dispersées peut être conservée par le test (site NDPP2-85).

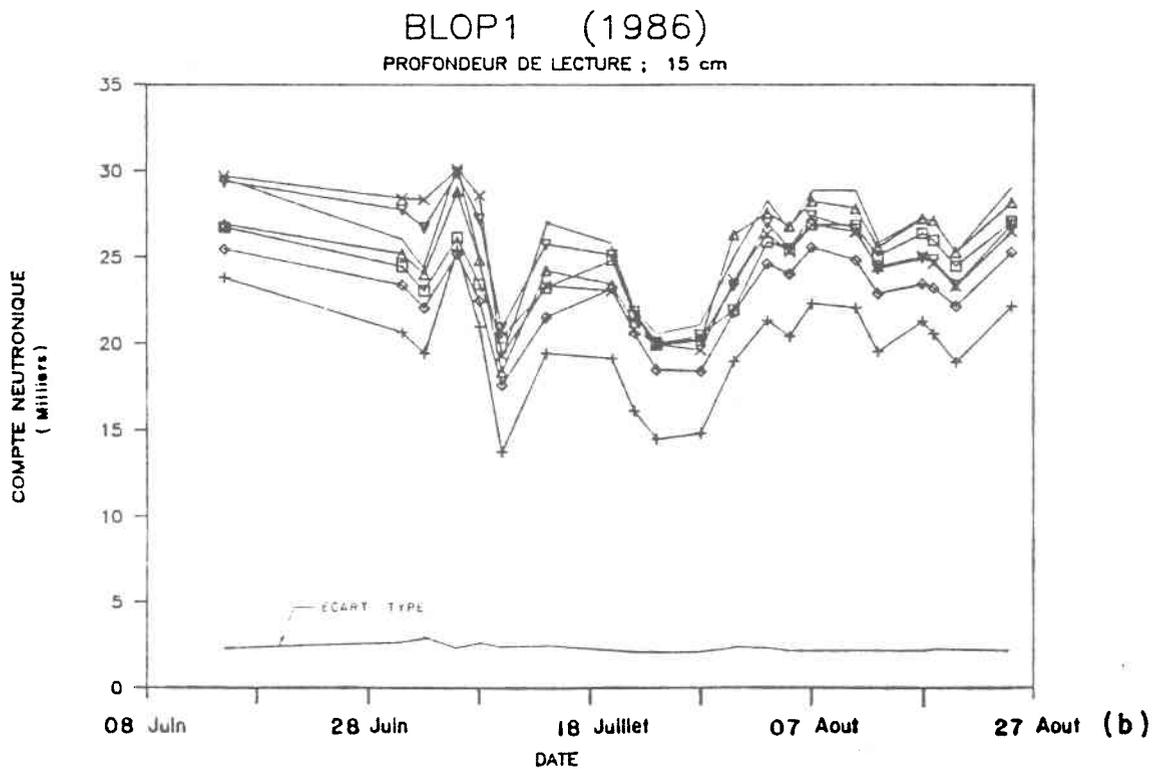
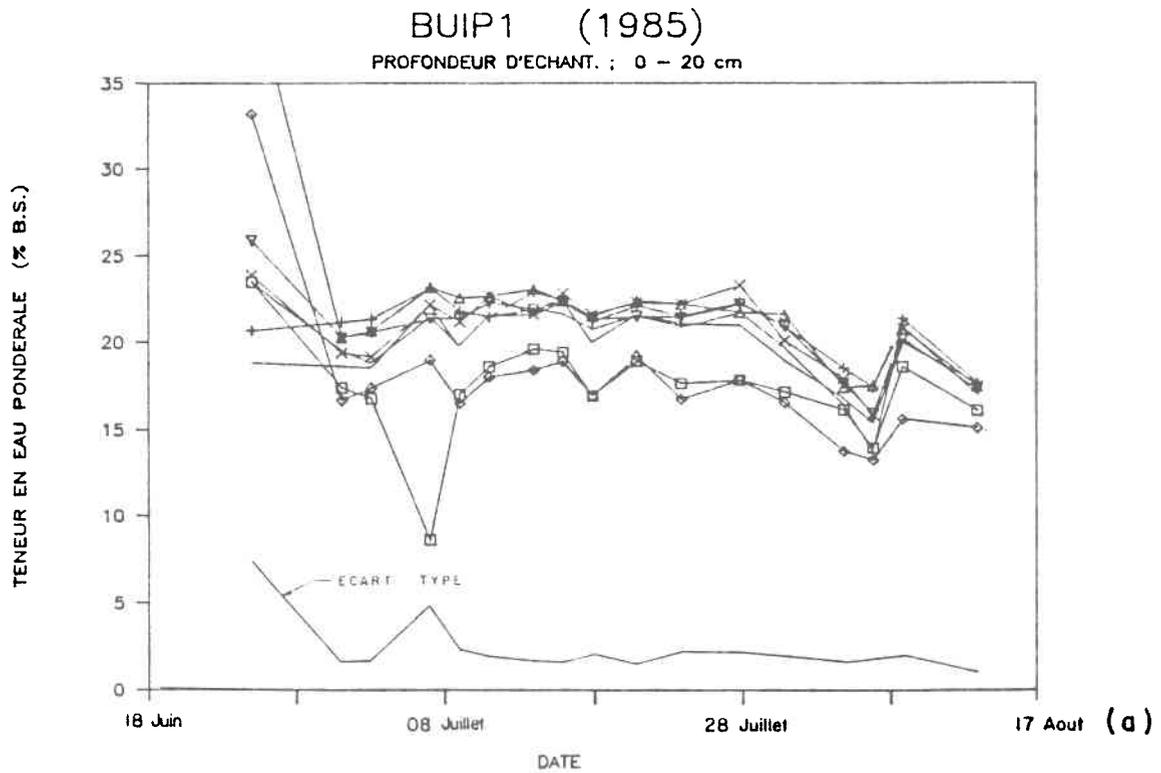


Figure C.2 Évolution de la teneur en eau pondérale pour le site BUIP1 en 1985 et des comptes neutroniques pour le site BLOP1 en 1986 au cours d'une saison de culture à différentes positions à l'intérieur d'un site cultivé en pommes de terre.

L'utilisation du test de Grubbs sur les différences de teneur en eau du sol entre deux mesures successives à une position donnée conduirait également au rejet de valeurs représentatives du site.

L'approche la plus sûre semble être l'utilisation du test visuel qui permet de comparer à la fois les valeurs absolues des teneurs en eau mesurées et les différences de teneur en eau du sol entre deux épisodes de mesures. Des graphiques représentant la teneur en eau du sol à chaque position au cours de la saison permettent d'identifier rapidement les valeurs se détachant nettement des autres en plus de visualiser le lien existant entre la position de l'échantillonnage dans un site et la teneur en eau du sol. Un exemple est présenté à la figure C.2 a pour le site BUIP 1 (1985). On observe la présence de valeurs douteuses lors du premier et du quatrième épisode de mesure. Un examen des données révèle que pour l'ensemble des sites étudiés, une valeur de l'écart-type de la teneur en eau supérieure à 2.5 donne une bonne indication sur la présence possible d'une valeur non représentative du site dans l'échantillon statistique.

Le rejet des valeurs de teneur en eau jugées non représentatives des sites a donc été effectué à l'aide d'un test visuel. Ces valeurs sont identifiées aux tableaux C.1 et C.2.

C.3.2 Sonde à neutrons

La méthode de mesure du degré d'humidité du sol à l'aide d'une sonde à neutrons a été utilisée sur l'île d'Orléans, au cours de deux étés successifs, pour assurer le suivi de la teneur en eau du sol sur 8 parcelles cultivées en pommes de terre (4) et en fraises (4) en 1985. En 1986, deux fois moins de sites serviront à l'ajustement du modèle, soit les sites BLOP1, BLOP2, GOSF1, GOSF2.

Les comptes neutroniques ont été effectués à deux profondeurs différentes pour chaque tuyau d'accès, et chaque site comprenait de 4 à 7 tuyaux d'accès. Les mesures neutroniques ont été effectuées à une fréquence de 2 à 5 jours. De plus, des échantillons de sol ont été

prélevés alternativement autour des tuyaux durant les deux étés aux profondeurs de lecture de la sonde pour permettre la calibration.

Les valeurs des comptes neutroniques mesurés à deux profondeurs sont présentées, pour les sites étudiés en 1986, aux tableaux D.1 à D.6 (en annexe). Les comptes neutroniques pour l'année 1985 ne sont pas présentés mais sont disponibles au Service du génie du MAPAQ.

On peut observer sur l'ensemble des sites un fort lien entre le compte neutronique et la position du point de mesure sur le site, ce lien étant plus marqué qu'avec la méthode thermogravimétrique.

Les tableaux D.1 à D.6 présentent également la moyenne et l'écart-type (équation C.7) des comptes neutroniques réalisés sur un site à une profondeur donnée. On observe de fortes variations d'écart-type moyen entre les différents sites, mais à l'intérieur d'un même site, l'écart-type varie très peu au cours de la saison en comparaison des variations observées par la méthode thermogravimétrique. Ceci est probablement dû au fait que la sonde à neutrons explore sensiblement le même volume de sol à chaque mesure alors que l'échantillonnage pour l'analyse du contenu en eau du sol est effectué à chaque fois sur un volume de sol différent à proximité du volume précédent.

La stabilité de l'écart-type des comptes neutroniques sur un même site au cours de la saison de croissance indique qu'il y a très peu de valeurs aberrantes. Une façon objective de les détecter serait d'utiliser le test de Grubbs sur les différences de comptes (gradients) entre deux épisodes de mesure consécutives à l'intérieur d'un site donné, l'utilisation de ce test sur les données brutes étant injustifié dû à la forte relation entre le compte et la position à l'intérieur d'un site. Un essai sur les gradients des comptes pour les sites BLOP1-85, BLOP2-85, BLOP1-86, BLOP2-86 a entraîné un rejet trop important de valeurs avec un risque de 1%. Le test visuel à l'aide de graphiques des comptes des différents sites en fonction du temps nous a permis d'identifier de façon plus sûre les valeurs mesurées susceptibles

d'être erronées. Ces valeurs sont indiquées aux tableaux D.1 à D.6 et ne seront pas conservées pour l'ajustement du modèle.

Notons que pour le site GOSF1 en 1986, les lectures à 15 cm du tuyau # 5 ont été rejetées parce que le tuyau est sorti du sol au cours de la campagne ce qui a entraîné une diminution des comptes près de la surface (voir tableau D.5). Par contre, les lectures à 30 cm ont été peu influencées par le déplacement du tuyau. Elles ont donc été conservées. Notons que les lectures à 30 cm de profondeur ne sont pas présentées en annexe pour la culture de la fraise. Par contre, elles sont disponibles au service du génie du MAPAQ.

Les comptes neutroniques présentés pour les sites situés sur l'Île d'Orléans ne donnent qu'une mesure relative du degré d'humidité du sol. Pour quantifier la réserve d'eau contenue dans le sol, il est nécessaire de transformer ces comptes neutroniques en teneurs en eau volumiques au moyen d'une courbe de calibration.

Les données représentant les points servant à la calibration de la sonde sont présentées aux tableaux E.1 à E.9. Comme nous l'avons vu à la section C.1, la relation entre le compte neutronique et la teneur en eau volumique du sol est généralement linéaire. Ainsi, une régression linéaire entre ces deux variables fournira une courbe de calibration pour l'appareil. Cependant, il a été établi que le sens dans lequel la régression est faite pourra conduire à des résultats différents pouvant être biaisés dans certains cas. Ainsi, si la teneur en eau volumique du sol était connue sans erreur, une régression linéaire simple du compte neutronique mesuré avec erreur en fonction de la teneur en eau volumique donnerait la meilleure courbe de calibration.

Dans la réalité, les deux variables à relier sont mesurées avec une certaine erreur. Nous allons tenter d'évaluer l'importance relative de l'erreur sur les deux variables à corréler de façon à choisir le type de régression qui conduira à la meilleure droite d'étalonnage pour les sites étudiés. Prenons à titre d'exemple le site BLOP1-85 pour la profondeur de lecture de la sonde de 20 cm.

Comme le compte standard de l'appareil n'a pas été pris à chaque journée de mesure, les comptes neutroniques bruts plutôt que les rapports de comptage seront utilisés. Ainsi, l'erreur relative sur les lectures de la sonde à neutrons sera décrite par l'expression C.4 plutôt que C.3 en conservant à l'esprit que les fluctuations de l'appareil dues à la température et à la charge de la batterie ne sont pas prises en compte. Pour le site considéré, le compte moyen observé N est égal à 20900 (tableau E.1) et l'erreur relative (erreur-type/moyenne) s'exprime comme suit:

$$\frac{DN}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{20900}} = 0,007$$

L'erreur relative sur la teneur en eau volumique peut être évaluée à l'aide de l'expression C.5. Comme la densité apparente n'a été mesurée que sur un profil dans une fosse d'échantillonnage, la variabilité horizontale est inconnue. Nous allons l'estimer à l'aide de l'erreur-type de huit mesures de densité apparente réalisées sur les trente premiers centimètres de sol à quatre niveaux différents. On trouve à partir des valeurs du tableau B.5 une erreur-type DDa de 0,105 et une valeur moyenne Da de 1,24. L'erreur relative sur la teneur en eau pondérale attribuable à l'hétérogénéité du sol peut être évaluée en calculant l'erreur-type et la teneur en eau moyenne sur les échantillons d'humidité présentés au tableau E.1. L'erreur-type DHp obtenue en additionnant le carré des écarts à la moyenne pour chaque jour d'échantillonnage est de 1,32% (B.S.) et la valeur Hp moyenne est de 12,5% (B.S.). On observe que l'erreur due à la précision de la balance peut être négligée, et on obtient:

$$\frac{DHv}{Hv} = \left[\left(\frac{0,105}{1,24} \right)^2 + \left(\frac{1,32}{12,5} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[(0,085)^2 + (0,106)^2 \right]^{1/2} = 0,14$$

On a donc calculé pour le site BLOP1-85 (20 cm) une erreur relative sur l'évaluation de la teneur en eau volumique environ vingt fois plus élevée que l'erreur sur le compte neutronique pour le cas où trois échantillons de sol sont prélevés pour un compte de trente secondes.

L'observation des courbes d'essais de saturation (figures B.11 à B.13) réalisées sur les sites PREP1-85, BLOP1-86 et BLOP2-86 renforce l'hypothèse que l'erreur sur l'évaluation de la teneur en eau volumique est beaucoup plus importante que l'erreur sur les comptes neutroniques. On observe en effet que la forme de la courbe d'assèchement du sol en fonction du temps mesurée avec les comptes neutroniques est semblable à la forme présentée dans la littérature (figure A.5) alors qu'on ne peut distinguer cette forme caractéristique à partir des mesures thermogravimétriques sur les échantillons de sol.

Ainsi, en assumant que l'erreur sur les comptes neutroniques est négligeable par rapport à l'erreur sur la mesure de la teneur en eau volumique, une régression linéaire simple de la teneur en eau volumique en fonction du compte neutronique $H_v = f(N)$ donnera la meilleure estimation de la droite de régression entre ces deux variables. Ceci peut être attribué au fait que la droite est ajustée en minimisant l'erreur sur la variable H_v connue avec le moins de précision.

Notons que pour une raison de commodité, nous calculerons les coefficients de régression de la teneur en eau pondérale (plutôt que volumique) en fonction du compte neutronique pour les sites sur lesquels portera notre étude. Ce choix ne modifiera pas les valeurs de teneurs en eau volumiques prédites puisque la densité apparente est supposée constante pour chaque courbe de calibration. La valeur de densité apparente retenue est évaluée à partir des échantillons prélevés au début de chaque saison dans une fosse d'échantillonnage localisée à proximité du site (voir figure B.10).

Le développement précédent a été fait en considérant des échantillons de sol prélevés autour d'un même tuyau d'accès pour établir la courbe de calibration à un endroit limité. Or, les mesures neutroniques ont été effectuées à l'île d'Orléans sur sept tuyaux d'accès à l'intérieur de sites de cent mètres carrés, et les échantillons de sol (3 ou 4) ont été prélevés autour de chaque tuyau à des dates différentes en assumant que la même courbe de calibration est

applicable à l'ensemble du site. Cette hypothèse ne peut être vérifiée directement puisqu'on ne dispose pas de mesures de teneurs en eau pondérale autour de plus qu'un tuyau à une date donnée. En réalité, quatre hypothèses peuvent être considérées;

- 1° Le degré d'humidité du sol est constant à l'intérieur du site et tous les tuyaux ont la même courbe de calibration.
- 2° Le degré d'humidité du sol varie autour de chaque tuyau et on a la même courbe de calibration sur tout le site.
- 3° Le degré d'humidité du sol est constant alors que la courbe de calibration varie à l'intérieur des sites.
- 4° Le degré d'humidité du sol et la courbe de calibration sont variables à l'intérieur des sites.

Selon Côté (1987), la différence entre les courbes de calibration à l'intérieur d'un site de 100 m² devrait être faible dans le cas d'un sol souvent labouré dû à l'homogénéisation de la couche de surface au niveau de la matière organique et des métaux, à condition qu'il n'y ait pas de fortes variations de densité du sol dans ce site. Ceci donne davantage de poids aux deux premières hypothèses.

Côté (1987) mentionne également que pour des cultures sur billons, on peut s'attendre à rencontrer des différences appréciables de teneur en eau du sol à l'intérieur d'un même site dû au prélèvement localisé de l'eau pour les racines des plants et à la variabilité du drainage local du sol en profondeur. La seconde hypothèse semble donc plus vraisemblable que la première.

Pour comparer l'ajustement des deux premières hypothèses, nous avons calculé dans un premier temps des coefficients de détermination (R^2) de la régression de la teneur en eau pondérale moyenne mesurée autour d'un tube en fonction du compte neutronique du tube considéré (hypothèse 2). Nous avons ensuite calculé R^2 pour la régression de la teneur en eau mesurée autour d'un tube en fonction

de la moyenne des comptes de tous les tubes du site (hypothèse 1). L'hypothèse 2 a donné dans l'ensemble des coefficients de détermination plus élevés. Elle sera donc retenue pour la suite de notre étude.

Présentation des courbes de calibration

Des courbes de calibration servant à transformer les comptes neutroniques en teneurs en eau pondérales ont été établies pour chaque site étudié. Ces courbes ont été déterminées en faisant une régression linéaire simple entre la teneur en eau pondérale mesurée autour d'un tuyau du site en fonction du compte neutronique du tuyau autour duquel l'échantillonnage a été effectué. Les facteurs servant au calcul de l'intervalle de prévision de la droite de régression au niveau de confiance de 95% ont également été évalués à l'aide de l'équation C.9 tirée de Bobée (1983) (voir section C.4). Les comptes neutroniques ayant servi à la calibration sont identifiés sur les tableaux D.1 à D.6 (pour l'année 1986).

Les points utilisés pour établir les droites d'étalonnage ont été vérifiés de la façon suivante. Les comptes neutroniques ont été reportés sur les graphiques montrant l'évolution de tous les comptes d'un même site au cours de la saison. Les points correspondant à des comptes douteux ont été examinés. De plus, les valeurs moyennes de teneurs en eau pondérales ayant des écart-types beaucoup plus élevés que les autres ont également été considérées avec soin. Les points ayant été rejetés suite à cet examen graphique n'ont pas été considérés dans le calcul des droites d'étalonnage.

Le tableau C.3 présente les caractéristiques de la droite de régression ainsi que les coefficients servant à calculer l'intervalle de confiance des valeurs prédites et les coefficients de détermination (R^2) de la régression pour tous les sites étudiés.

Tableau C.3 : Caractéristiques des droites de régression linéaire simple (pente, ordonnée à l'origine, coefficient de détermination, écart-type) retenus pour chaque site en pommes de terre, et coefficients servant à calculer l'intervalle de prévision.

ANNEE	SITE	PENTE (*10 ⁻⁴)	ORDONNEE (% B.S.)	R ²	S _r	N	XMOY	SS _x (*10 ³)	T _{N-2, a/2}
1985	BLOP1 20 cm	6,614	-1,364	0,53	1,391	10	20905	39850	
1985	BLOP1 40 cm	0,730	6,819	0,02	1,215	10	19042	45352	
1985	BLOP2 20 cm	5,160	1,601	0,55	1,250	10	22748	58302	
1985	BLOP2 40 cm	3,438	2,224	0,37	1,180	10	20931	54433	
1986	BLOP1 15 cm	6,152	1,451	0,48	1,804	13	24203	86579	
1986	BLOP1 35 cm	6,127	-2,603	0,75	1,504	13	23869	201165	
1986	BLOP2 15 cm	5,476	2,734	0,52	1,873	13	21831	136913	
1986	BLOP2 35 cm	6,551	-2,553	0,66	1,375	13	20809	92502	
1985	PREP1 20 cm	9,046	-9,653	0,46	1,325	10	31661	14832	
1985	PREP1 40 cm	9,237	-10,628	0,65	2,856	10	32050	144931	
1985	PREP2 20 cm	12,279	-20,257	0,95	0,580	9	33224	30664	
1985	PREP2 40 cm	8,411	-8,962	0,46	2,559	10	31002	63907	

Tableau C.3 : Caractéristiques des droites de régression linéaire simple (pente, ordonnée à l'origine, coefficient de détermination, écart-type) retenus pour chaque site cultivé en fraises, et coefficients servant à calculer l'intervalle de prévision (suite).

ANNEE	SITE	PENTE (*10 ⁻⁴)	ORDONNEE (% B.S.)	R ²	S _r	N	XMOY	SS _x (*10 ³)	T _{N-2, a/2}
1985	GOSF1 15 cm	6,234	0,742	0,57	1,711	12	23381	101296	
1985	GOSF1 30 cm	4,847	2,065	0,36	2,510	12	20993	151879	
1985	GOSF2 15 cm	6,044	3,379	0,68	1,797	12	26934	184146	
1985	GOSF2 30 cm	6,776	-0,330	0,39	3,272	12	24082	147730	
1986	GOSF1 15 cm	5,547	3,973	0,92	0,861	9	27416	190373	
1986	GOSF1 30 cm	5,304	1,791	0,36	3,509	10	25962	194433	
1986	GOSF2 15 cm	4,000	8,590	0,41	1,534	10	29351	80209	
1986	GOSF2 30 cm	-0,678	14,508	0,00	1,791	12	24370	34930	
1985	PREF1 15 cm	8,424	-6,223	0,54	2,130	12	31889	76250	
1985	PREF1 30 cm	7,375	-3,440	0,50	2,401	12	32032	108299	
1985	PREF2 15 cm	6,334	-1,646	0,82	1,000	12	24790	115386	
1985	PREF2 30 cm	6,885	-3,128	0,49	1,943	12	23498	75512	

Comparaison et regroupement des courbes

Une comparaison des propriétés physiques du sol des différents sites étudiés (classe texturale, % matière organique, densité apparente) regroupées au tableau B.3 nous permet de tirer diverses conclusions.

D'abord, les propriétés physiques des sols sont généralement similaires à une profondeur donnée entre deux sites d'un même champ. Par contre, ces propriétés varient beaucoup entre les champs, et avec la profondeur à l'intérieur d'un même champ. Ainsi, on peut croire que les courbes de calibration de deux sites d'un même champ seraient les mêmes pour une profondeur donnée.

La comparaison visuelle des points des courbes d'étalonnage en superposant les graphiques ainsi que la comparaison des deux droites au niveau 5% (Bobée, 1983) à l'aide du test F d'après Neter et Wasserman (1974) nous permet de tirer les conclusions suivantes; 1° Les points de calibration pour tous les sites cultivés en pomme de terre peuvent être regroupés pour les profondeurs de lecture de 15 cm et 20 cm à l'intérieur d'un même champ. Par contre, les courbes de calibration des sites BLOP1 et 2 à 40 cm en 1985 ont des pentes sensiblement différentes entre les deux sites alors qu'en 1986, ces mêmes courbes de calibration sont semblables à 35 cm de profondeur. De plus, la pente pour le site BLOP1 à 40 cm en 1985 est presque nulle. Il sera donc prudent d'utiliser les courbes de calibration établies en 1986 à 35 cm pour les deux sites BLOP1 et 2 et ce pour les deux campagnes de mesures à cause des raisons suivantes; a) les courbes établies pour 1986 résultent de quatre échantillons de teneurs en eau, b) la gamme de variation des valeurs de 1986 est beaucoup plus élevée due à la forte pluviométrie de l'année, et c) la majorité des points de calibration de 1985 pourraient faire partie de la population des points de 1986.

Parmi les sites cultivés en fraises, seuls les points de calibration des sites GOSF1-86 et GOSF2-86 mesurés à 15 cm de profondeur peuvent être regroupés. Les sites GOSF1-85 et GOSF2-85 et PREF1 et 2-85 à 15 cm ne sont pas regroupés parce que les points de calibration ne couvrent pas la même gamme pour les deux sites dû à une différence de leur sol respectif. De plus, les droites des deux sites pour les deux champs sont différentes au seuil = 0,05. 2° Les courbes de calibration de deux profondeurs pour un même site ne peuvent être regroupées. On observe pour tous les sites que la droite de régression donne des comptes neutroniques plus élevés en profondeur qu'en surface pour une même valeur de teneur en eau pondérale. On peut expliquer ce phénomène par l'effet combiné d'une plus faible densité du sol et d'une proportion plus importante de perte de neutrons vers l'atmosphère près de la surface qu'en profondeur. Ceci peut expliquer que les courbes de calibration soient plus vers la droite en 1985 qu'en 1986 sur les sites BLOP1 et 2 puisque les comptes ont été mesurés à 20 cm de profondeur en 1985 comparativement à 15 cm en 1986. 3° La dispersion des points autour de la droite de régression est plus élevée dans tous les cas en profondeur que près de la surface.

Ainsi, nous utiliserons la même courbe de calibration pour une profondeur donnée d'un même champ pour les sites cultivés en pommes de terre ainsi que pour les sites GOSF1-86 et GOSF2-86 à 15 cm de profondeur et des courbes individuelles dans les autres cas.

Le tableau C.4 présente les coefficients des droites de régression, les coefficients de détermination (R^2), l'écart-type sur l'estimation de la teneur en eau pondérale, ainsi que les valeurs servant à calculer l'intervalle de prévision au niveau $(1 - \alpha)$ d'une valeur de teneur en eau pondérale associée à un compte neutronique donné et ceci après regroupement des courbes. Les courbes de calibration après regroupement sont également présentées aux figures C.3 (a à f).

Tableau C.4 : Caractéristiques des droites de régression linéaire simple (pente, ordonnée à l'origine, coefficient de détermination, écart-type) retenus pour l'ensemble des sites après regroupement et coefficients servant à calculer l'intervalle de prévision.

ANNEE	SITE	PENTE (*10 ⁻⁴)	ORDONNEE (% B.S.)	R ²	S _r	N	XMOY	SS _x (*10 ³)	T _{N-2, a/2}
1985	BLOP1-2 20 cm	5,603	0,671	0,56	1,261	20	21826	115138	2,1
1986	BLOP1-2 15 cm	5,910	1,913	0,55	1,769	26	23017	260067	2,06
1986	BLOP1-2 35 cm	5,714	-1,216	0,69	1,456	26	22340	354503	2,06
1985	PREP1 2 20 cm	10,957	-15,780	0,80	1,018	19	32401	57069	2,11
1985	PREP1-2 40 cm	9,209	-10,987	0,60	2,604	20	31526	214329	2,10
1985	GOSF1 15 cm	6,234	0,742	0,57	1,711	12	23381	101296	2,23
1985	GOSF2 15 cm	6,044	3,379	0,68	1,797	12	26934	184146	2,23
1986	GOSF1-2 15 cm	5,144	5,164	0,75	1,225	19	28434	288324	2,11
1985	PREF1 15 cm	8,424	-6,223	0,54	2,130	12	31889	76250	2,23
1985	PREF2 15 cm	6,334	-1,646	0,82	1,000	12	24790	115386	2,23

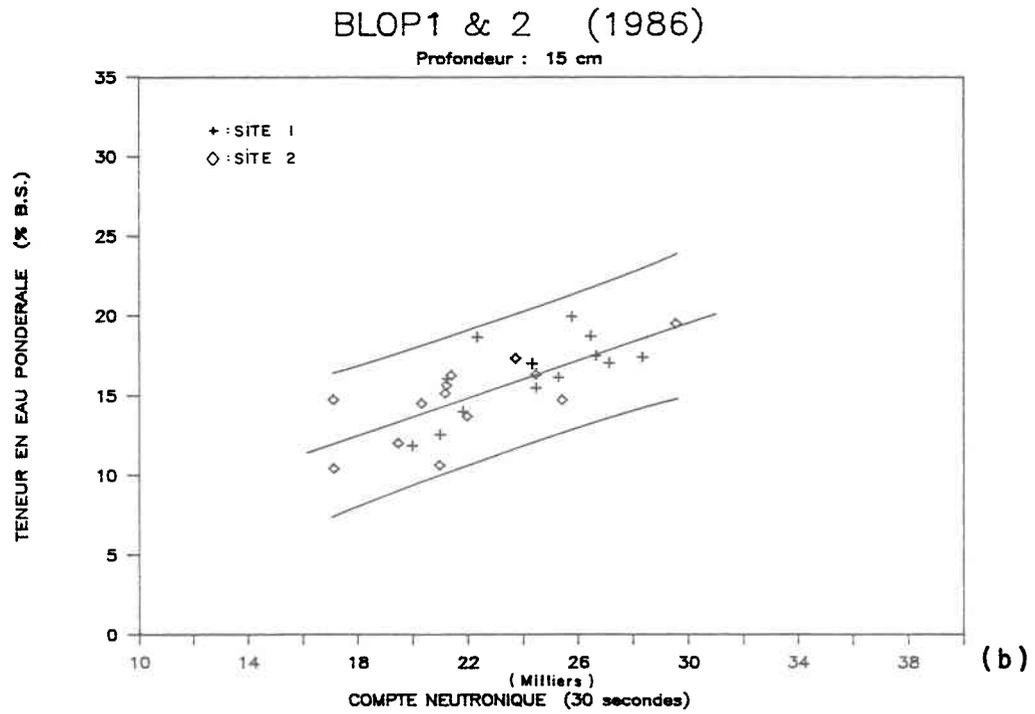
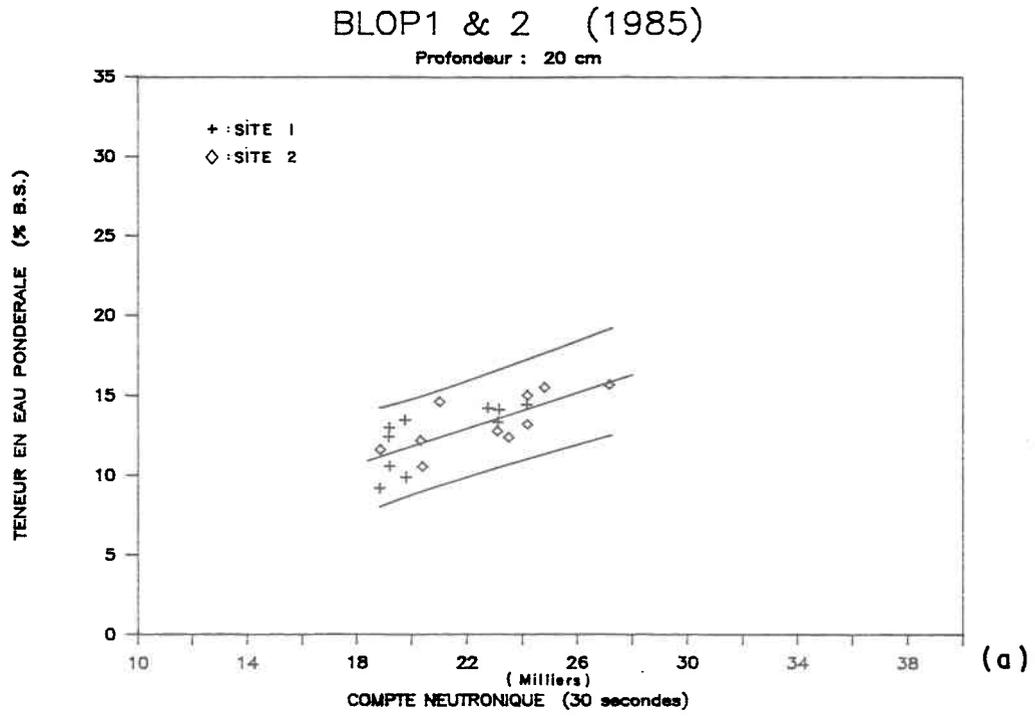
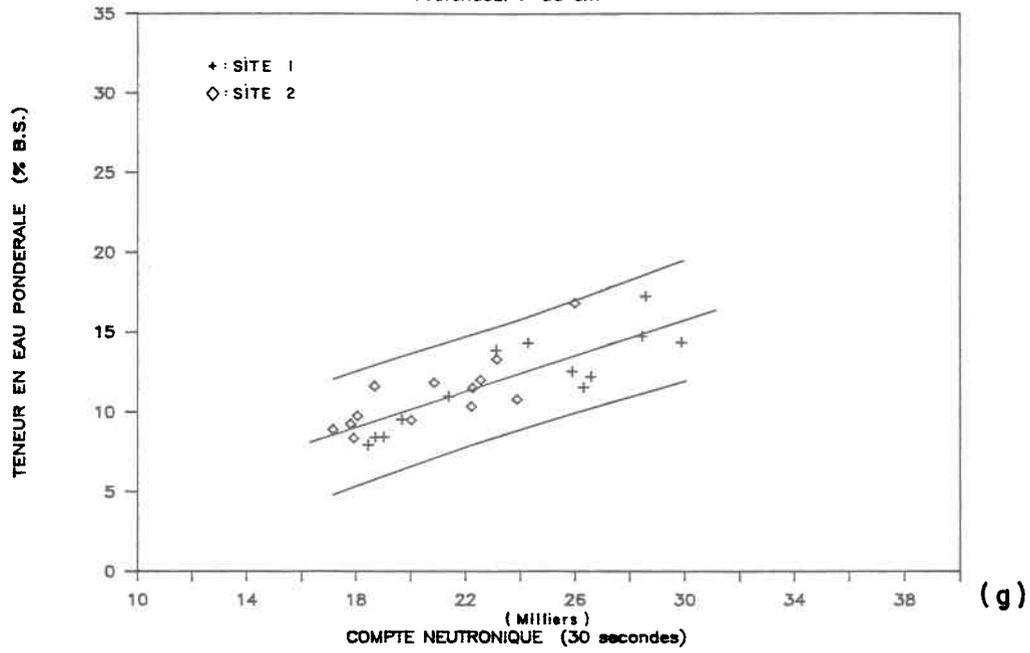


Figure C.3 Courbes de calibration de la sonde à neutrons après regroupement des sites semblables, et intervalles de confiance à 95%.

BLOP1 & 2 (1986)

Profondeur : 35 cm



PREP1 & 2 (1985)

Profondeur : 40 cm

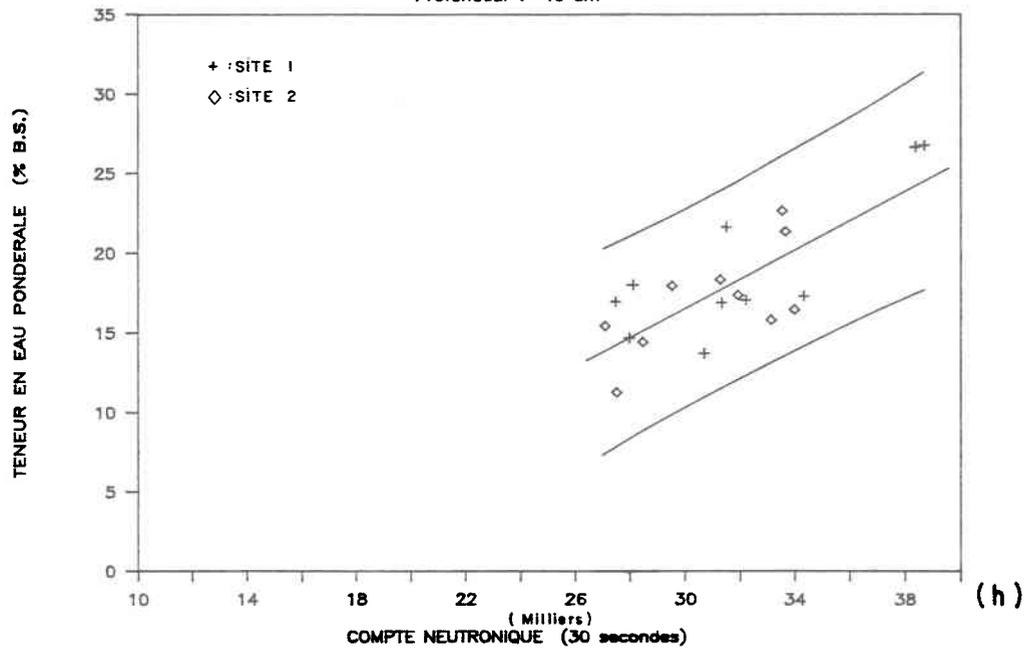


Figure C.3

Courbes de calibration de la sonde à neutrons après regroupement des sites semblables, et intervalles de confiance à 95% (suite).

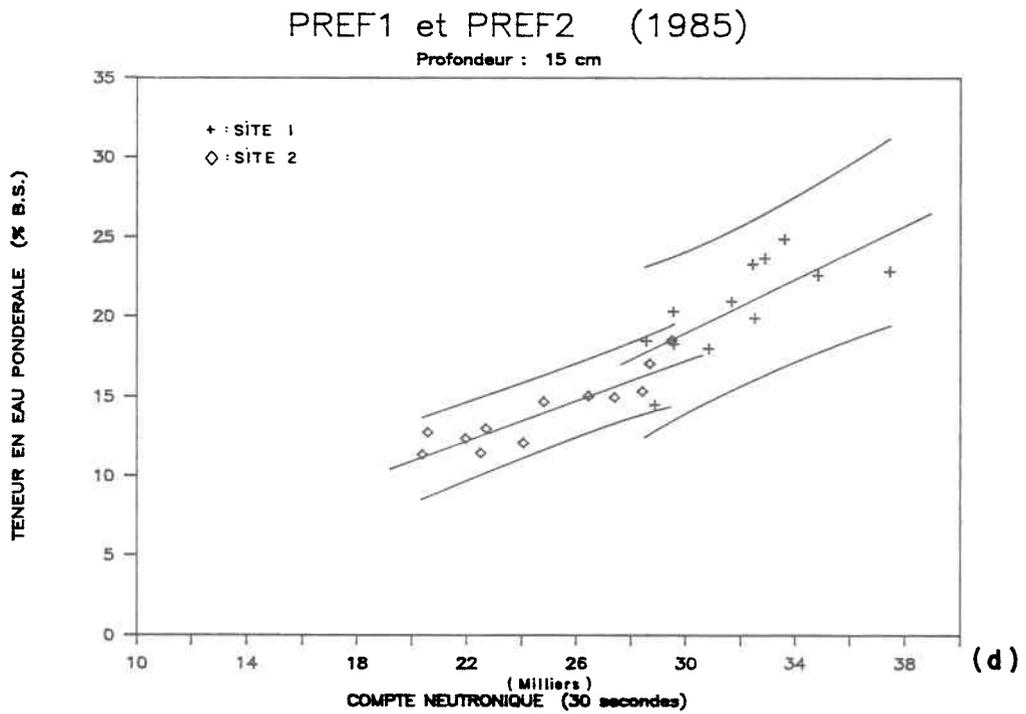
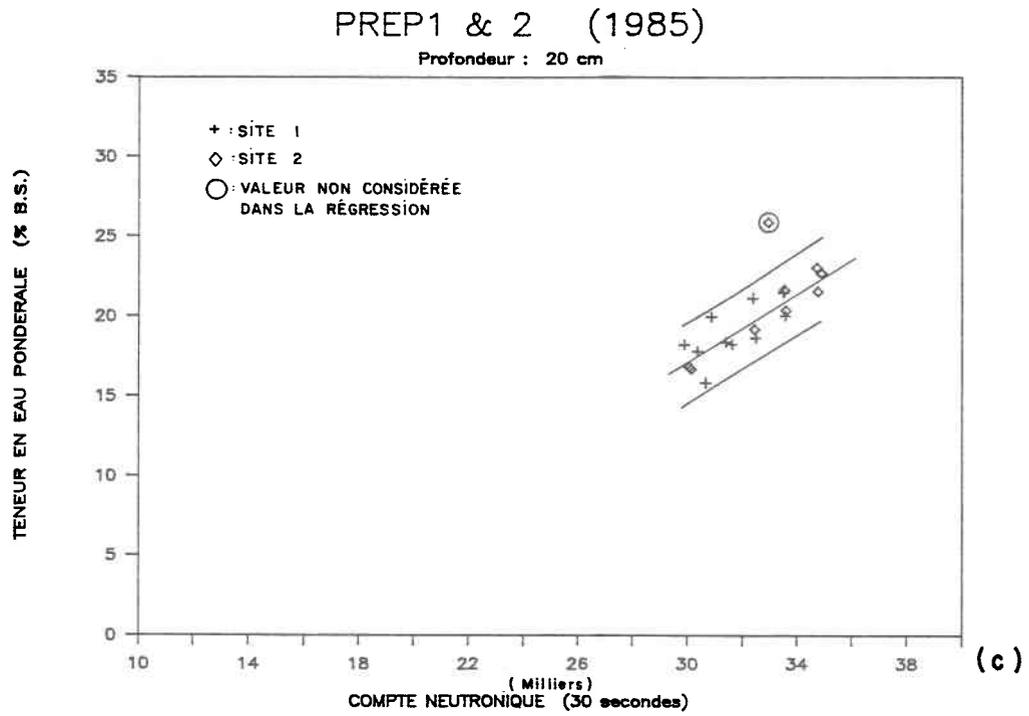
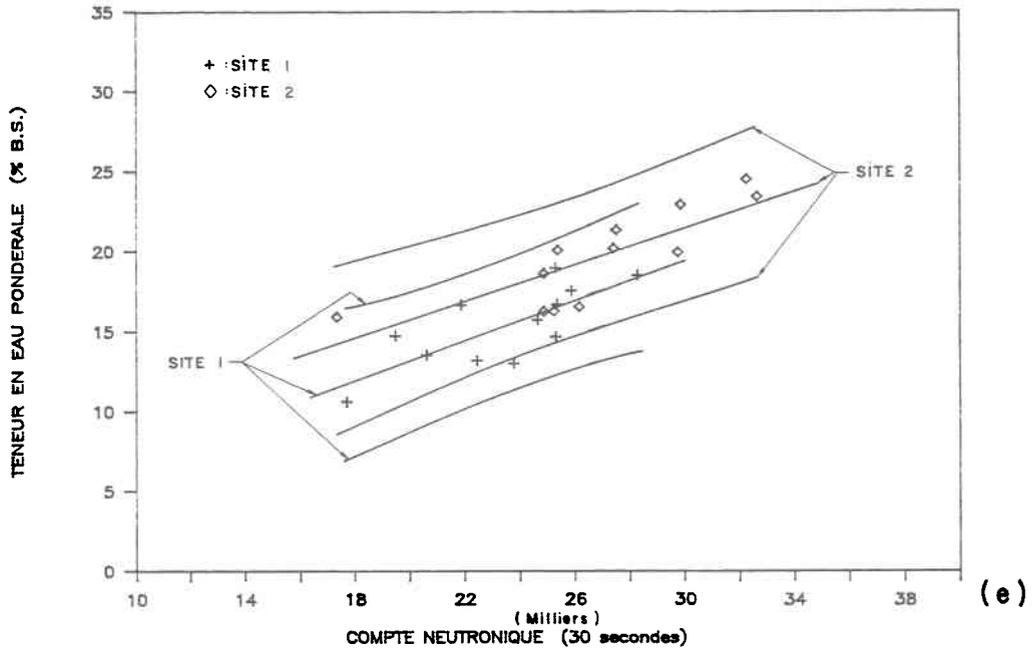


Figure C.3

Courbes de calibration de la sonde à neutrons après regroupement des sites semblables, et intervalles de confiance à 95% (suite).

GOSF1 et GOSF2 (1985)

Profondeur : 15 cm



GOSF1 & 2 (1986)

Profondeur : 15 cm

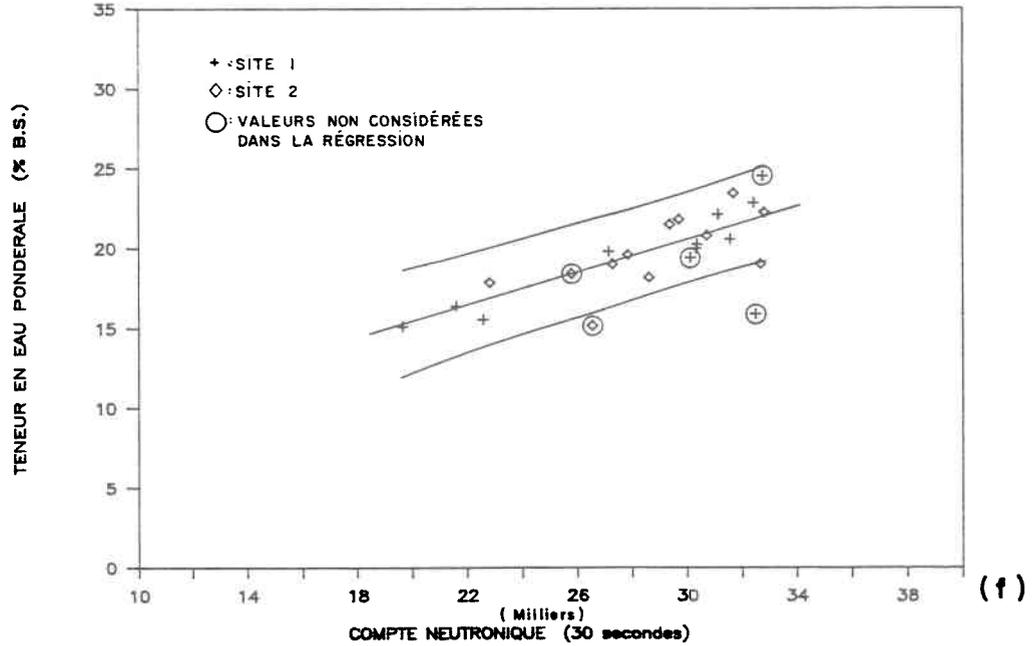


Figure C.3

Courbes de calibration de la sonde à neutrons après regroupement des sites semblables, et intervalles de confiance à 95% (suite).

C.4 Choix des valeurs décrivant le degré d'humidité du sol dans un site, à utiliser pour valider le modèle

La présente section vise à utiliser les mesures du degré d'humidité du sol de façon à représenter le plus adéquatement possible la réserve en eau du sol présente dans la zone racinaire des cultures étudiées.

Thermogravimétrie

Pour les sites de Baie-Comeau et Notre-Dame-de-la-Paix, le suivi du degré d'humidité du sol a été effectué par thermogravimétrie en échantillonnant le sol sur les vingt premiers centimètres de profondeur. Nous utiliserons donc la valeur moyenne et l'intervalle de confiance à 95% des mesures de teneurs en eau pondérales présentées aux tableaux C.1 et C.2 en ne considérant pas les valeurs rejetées lors de l'analyse précédente. Le calcul de l'intervalle de confiance (U) sera effectuée à l'aide de l'expression C.8 présentée par Bobée (1980).

$$U = \bar{Y} \pm DS \quad (C.8 a)$$

$$DS = T_s \left[(S^2/N_s) \right]^{1/2} \quad (C.8 b)$$

- où
- \bar{Y} : moyenne des valeurs mesurées sur un site
 - N_s : nombre d'échantillons pour un site
 - S : écart-type
 - T_s : valeur de la distribution de student au niveau $\alpha/2$ et N_s-2 pour un site

Nous assumons que la teneur en eau du sol mesurée sur les vingt premiers centimètres de sol est représentative de la teneur en eau du sol sur toute la profondeur des racines. Pour la culture considérée, soit la pomme de terre, l'enracinement peut atteindre 60 cm mais la plus grande densité des racines se situe dans les trente premiers centimètres.

Sonde à neutrons

Pour les sites localisés sur l'Ile d'Orléans, le suivi du degré d'humidité du sol a été effectué à l'aide de mesures neutroniques à deux profondeurs. Pour une profondeur donnée, les valeurs de teneurs en eau moyennes obtenues à partir des courbes de calibration établies sont entachées d'une certaine erreur due à la prédiction. Cette erreur peut être calculée à l'aide de l'expression C.9 présentée par Bobée (1980).

$$DRL = T Sr \left[1 + 1/N + (X_j - XMOY)^2 / SSx \right]^{1/2} \quad (C.9)$$

- où
- DRL : erreur due à la prédiction à partir de la droite de régression linéaire simple
 - N : nombre de couples de valeurs ayant servi à estimer les paramètres de la régression
 - X_j : compte neutronique moyen d'un site dont on veut prédire la teneur en eau
 - XMOY : moyenne des comptes neutroniques ayant servi au calcul de la régression
 - SSx : somme des différences au carré entre les valeurs de la variable indépendante et sa moyenne (XMOY)
 - T : valeur de la distribution de student au niveau $\alpha/2$ et N-2
 - Sr : écart-type de la régression linéaire

A l'intérieur de chaque site, on observe également une variabilité des comptes neutroniques qui peut être évaluée à l'aide de l'expression C.8.

Pour l'ajustement du modèle, nous présenterons donc la valeur moyenne (A) de teneur en eau estimée, l'intervalle de confiance à 95% attribuable à l'hétérogénéité des mesures à l'intérieur d'un site (B, C) ainsi que l'intervalle de confiance à 95% attribuable à l'effet combiné de l'hétérogénéité du site et de l'erreur associée à la prédiction à partir de la droite de régression (D,E) tels qu'indiqués à la figure C.4.

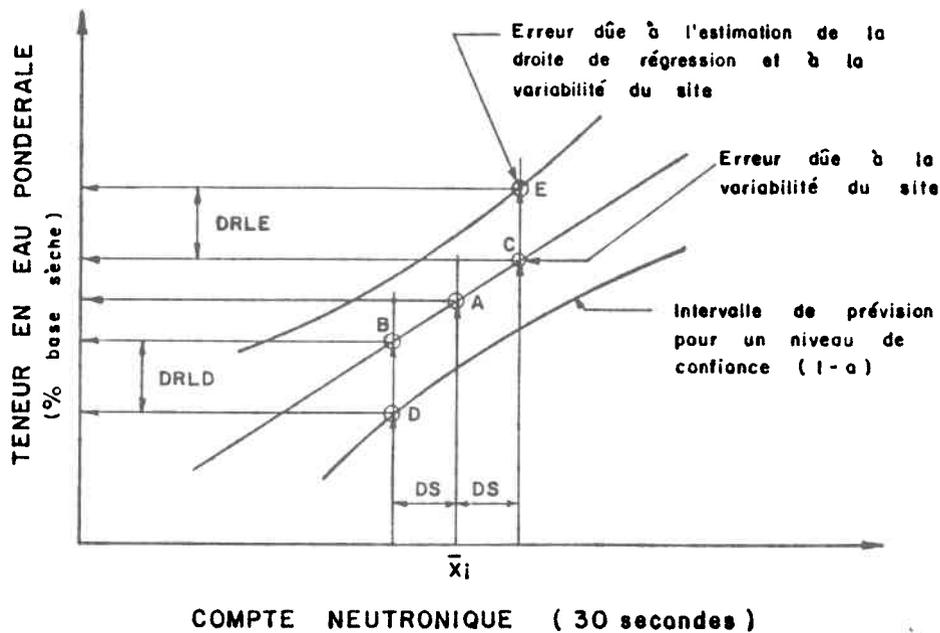


Figure C.4 Erreur sur l'estimation de la teneur en eau pondérale moyenne à partir de mesures neutroniques, attribuable à l'hétérogénéité du site et à l'erreur associée à la prévision à partir de la droite de régression.

Pour les sites cultivés en fraises, le suivi du degré d'humidité du sol a été réalisé au moyen d'une sonde à neutrons en prenant des mesures à 15 cm et 30 cm de profondeur. Comme la majorité des racines des plants de fraises sont situées dans les 20 premiers centimètres de sol et compte tenu des difficultés rencontrées pour la calibration en profondeur, nous ne considérons que les mesures effectuées à 15 cm de profondeur. Nous assumons que l'humidité mesurée à 15 cm de profondeur sur une sphère de diamètre variant entre 7,5 cm et 15 cm est représentative de l'humidité du sol sur la profondeur des racines (couche 0-20 cm).

Dans le cas des sites cultivés en pommes de terres qui sont situés sur l'Ile d'Orléans, les mesures ont été effectuées à des profondeurs de 20 cm et 40 cm en 1985 et de 15 cm et 35 cm en 1986 à l'aide de la sonde à neutrons.

Comme la profondeur d'enracinement des plants de pommes de terre à maturité varie de 40 à 60 cm suivant divers facteurs dont les conditions climatiques et les propriétés du sol, nous devons prendre en compte les mesures neutroniques effectuées aux deux profondeurs. Nous devons toutefois tenir compte du fait que la densité des racines pour la pomme de terre est plus forte dans les 30 premiers centimètres qu'en profondeur, et que la profondeur d'enracinement peut varier d'un champ à l'autre avec la densité du sous-sol et d'une année à l'autre dans un même champ avec la pluviométrie.

Trois schémas de distribution des gradients d'humidité peuvent être envisagés (figure C.5). Le cas a) suppose un gradient d'humidité constant sur tout le profil. Il ne tient pas compte des cycles de mouillage-ressuyage et peut entraîner une erreur importante. Le cas b) considère que la teneur en eau du sol mesurée à 15 cm ou 20 cm sur un diamètre de 7,5 à 15 cm est représentative de la teneur en eau de la zone de sol située entre 0 et 30 cm et que la teneur en eau mesurée à 35 ou 40 cm est représentative de la couche plus profonde que 30 cm. Le cas c) est semblable au cas b) à l'exception qu'il pondère l'évolution de la teneur en eau sur la zone de sol comprise entre les deux points de mesure non couverte par la sonde.

Nous retiendrons le cas b) dû à sa simplicité de programmation et à la possibilité de faire varier la profondeur d'influence d'une des deux mesures en fonction des propriétés physiques des différentes horizons de sol (Voir figure C.6).

La présentation des valeurs d'humidité du sol servant à valider le modèle pour les pommes de terre sera identique au cas des fraises à l'exception que nous devons calculer l'erreur combinée des deux profondeurs pour la partie attribuable à l'hétérogénéité du site et la partie due à l'erreur sur l'estimation de la droite de régression. La valeur de PZ1 déterminera le poids accordé à la mesure de chaque profondeur (voir figure C.6). De plus, nous prévoierons la possibilité d'accorder un poids préférentiel aux mesures à 15 ou 20 cm dû à la plus grande densité de racines dans cette zone.

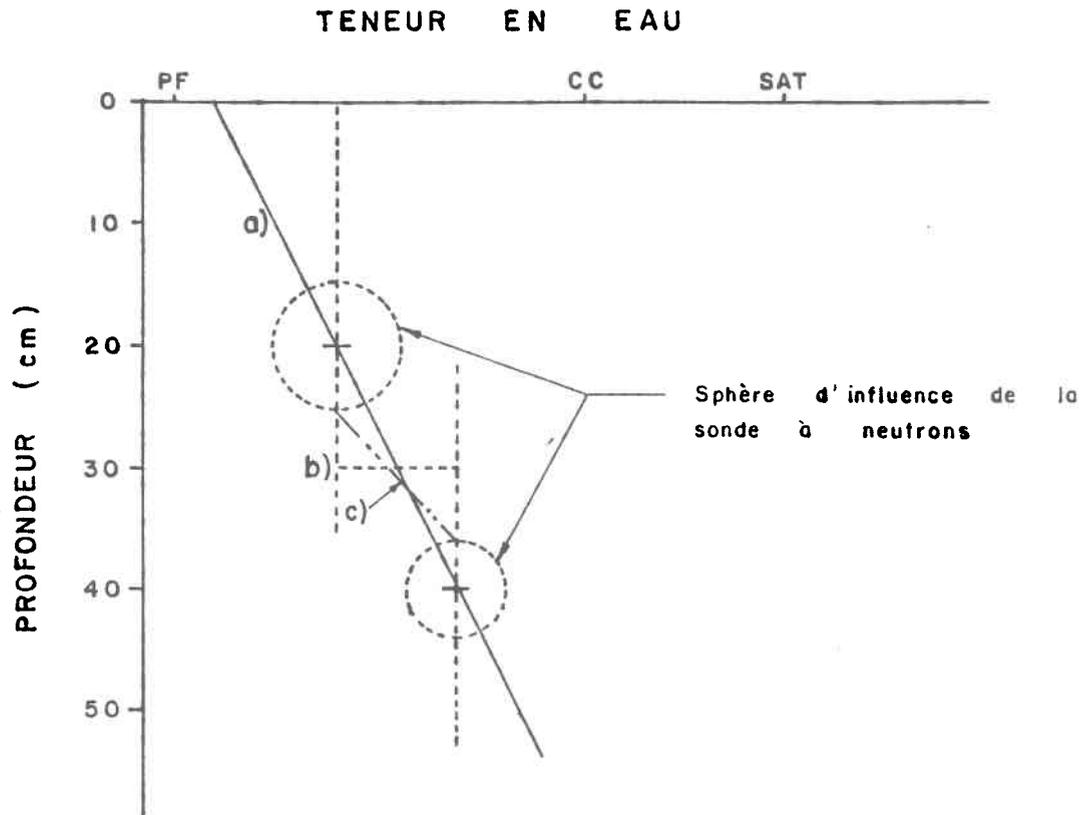


Figure C.5

Hypothèse concernant la distribution des gradients de teneurs en eau sur le profil de sol à partir de mesures à deux profondeurs.

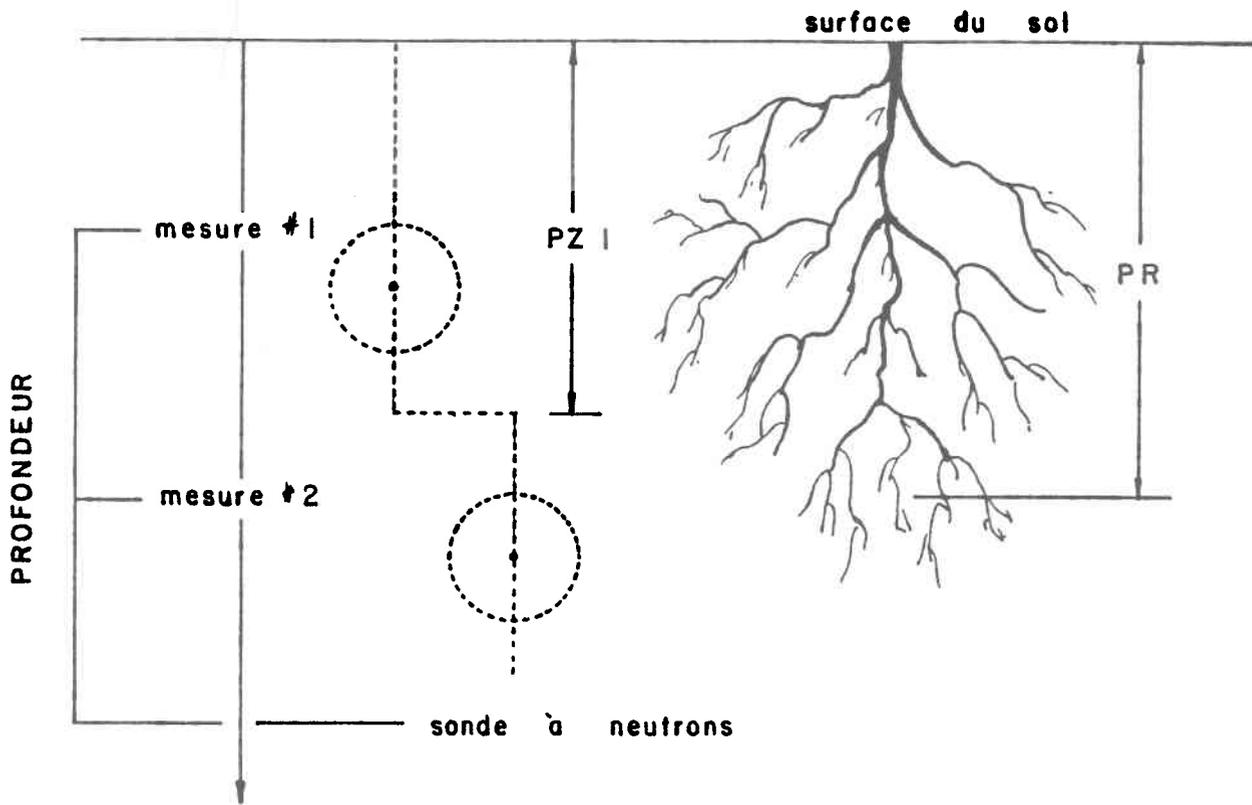


Figure C.6 Détermination de la hauteur d'eau dans le sol sur la profondeur des racines à partir de mesures à deux profondeurs à l'aide de la sonde à neutrons.

Le calcul du déficit en eau du sol par rapport à la capacité au champ (DF) s'effectuera à l'aide de l'expression C.10. Celle-ci prend en compte les mesures neutroniques aux deux profondeurs lorsque la profondeur des racines (PR) est supérieure à la profondeur PZ1 choisie.

Si $PR < PZ1$

$$DF = (TEECC1 - TEEA1) (Da1) (PR) (10) \quad (C.10 a)$$

Si $PR > PZ1$

$$DF = DF1 + DF2 \quad (C.10 b)$$

$$DF1 = (TEECC1 - TEEA1) (Da1) (10) \quad (C.10 c)$$

$$DF2 = (TEECC2 - TEEA2) (Da2) (PR - PZ1) (10) \quad (C.10 d)$$

- Où:
- DF : Déficit en eau par rapport à la capacité au champ pour toute la profondeur des racines (mm)
 - TEEC : Teneur en eau pondérale à la capacité au champ pour la zone supérieure (1) ou inférieure (2) en % base sèche.
 - TEEA : Teneur en eau pondérale moyenne à l'intérieur d'un site (point A sur la figure 4.4) pour la zone supérieure (1) ou inférieure (2).
 - Da : Masse volumique sèche apparente pour la zone supérieure (1) ou inférieure (2) exprimée en g/cm³ (ou Mg/m³)

Les intervalles de confiance associés à l'hétérogénéité du site et à la prévision à partir de la droite de régression seront calculés à l'aide de l'équation C.10 en remplaçant la teneur en eau au point A (figure C.4) par celle aux points B, C, D et E. Pour les valeurs moyennes de comptes neutroniques (X_i), la teneur en eau pondérale est calculée à l'aide des expressions C.11 (a à e) où:

$$TEEA = A X_i + B \quad (C.11 a)$$

$$TEEB = A (X_i - DS) + B \quad (C.11 b)$$

$$TEEC = A (X_i + DS) + B \quad (C.11 c)$$

$$TEED = TEEB - DRLD \quad (C.11 d)$$

$$TEEE = TEEC + DRLE \quad (C.11 e)$$

Les termes A et B représentent respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite de régression de la teneur en eau pondérale (% base sèche) en fonction du compte neutronique (30 secondes) et DS et DRL sont calculés à l'aide des équations C.8 et C.9. Ces expressions sont valables pour les deux profondeurs considérées.

Pour les sites échantillonnés par thermogravimétrie, seules les expressions C.10 (a) et C.8 (a et b) seront utilisées. Pour les sites cultivés en fraises, les expressions C.8 à C.11 seront utilisées seulement pour le cas $PR < PZ1$ (zone supérieure) alors que pour les pommes de terre à l'Ile d'Orléans, on pourra combiner les zones supérieures (1) et inférieures (2).

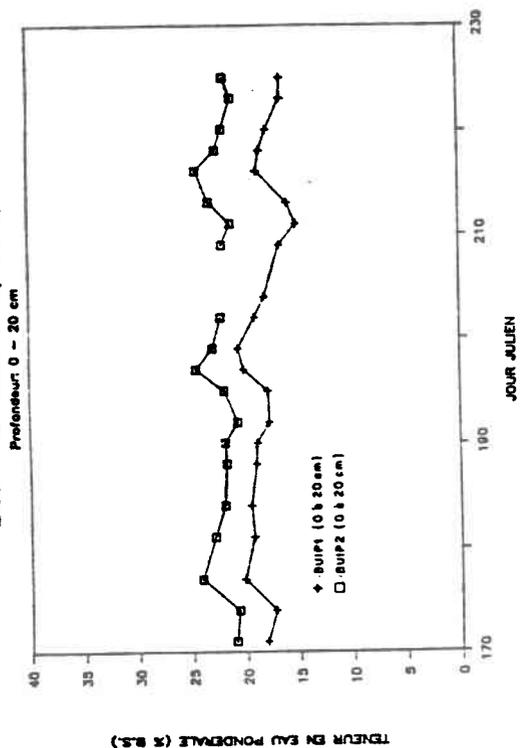
C.5 Discussion de la variabilité spatiale du degré d'humidité du sol à l'intérieur d'un site et d'un site à un autre à l'intérieur d'un même champ

La variabilité spatiale des teneurs en eau mesurées à l'intérieur d'un site peut être observée en examinant la constance de l'écart-type au cours de la saison.

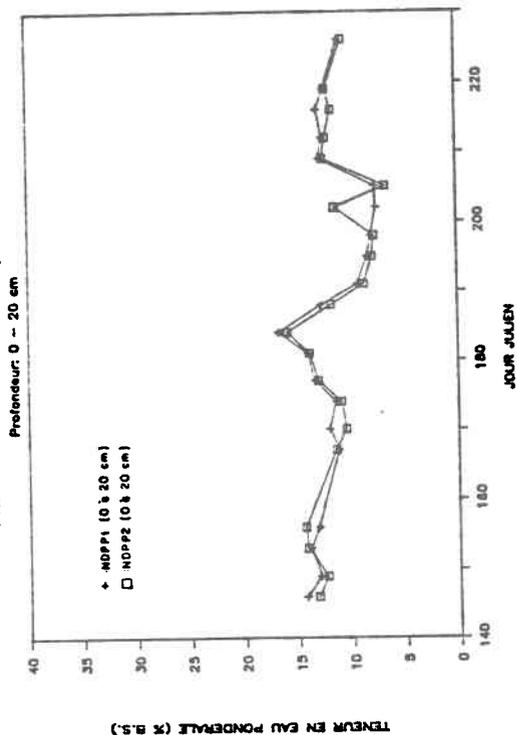
Pour les sites de Baie-Comeau et Notre-Dame-de-la-Paix, le suivi du niveau d'humidité du sol a été effectué par thermogravimétrie en échantillonnant les 20 premiers cm de sol. La majorité des valeurs d'écart-type de la teneur en eau du sol ne comportant pas de valeurs douteuses varient entre 0,7 et 2,0 (% base sèche, pondérale). Toutefois, les sites BUIP1-85 et BUIP2-85 semblent avoir une plus grande variabilité (écart-type) des mesures de teneur en eau du sol que les autres sites. Ceci est attribuable au fait qu'à certaines positions sur ces sites, la teneur en eau du sol est nettement plus faible (BUIP1-85) ou un peu plus élevée (BUIP2-85) que pour l'ensemble des autres positions. On observe de plus que la variabilité des mesures de teneur en eau est constante pour divers sites d'un même champ.

Pour les deux localités précédentes, une comparaison de l'évolution de la teneur en eau moyenne de deux sites à l'intérieur d'un même champ pour une saison donnée (voir figure C.7) permet de tirer les conclusions suivantes. D'abord, la différence de teneur en eau moyenne du sol entre deux sites d'un même champ est constante aux cours de la saison pour tous champs étudiés. La seule discontinuité observée s'est présentée le 21 juillet entre les sites NDPP1-86 et NDPP2-86. De plus, si on compare

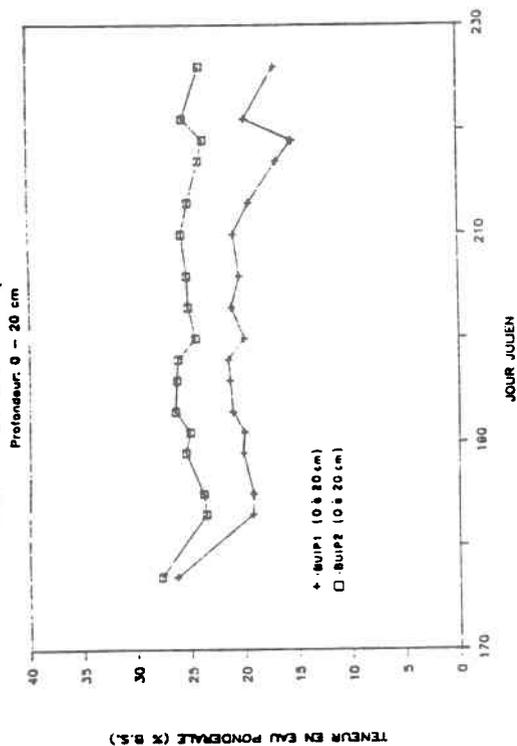
BUJP1 et BUJP2 (1986)



NDPP1 et NDPP2 (1986)



BUJP1 et BUJP2 (1985)



NDPP1 et NDPP2 (1985)

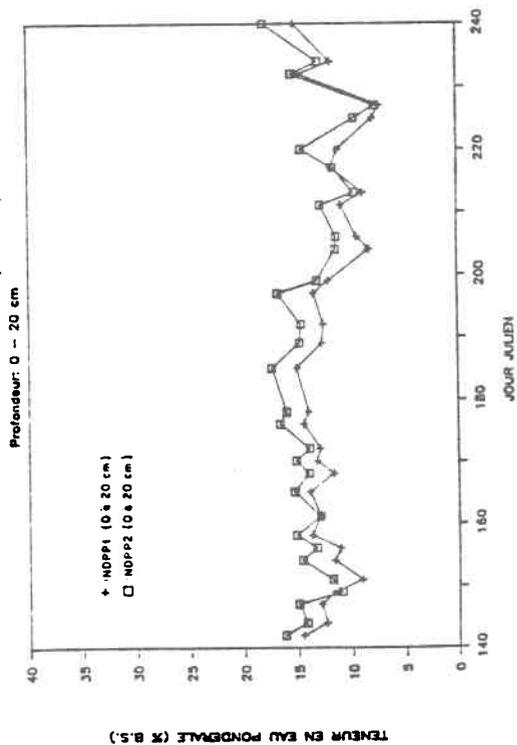


Figure C.7 Comparaison de l'évolution de la teneur en eau (ou du compte neutronique) moyen au cours d'une saison entre sites (et entre profondeurs) d'un même champ.

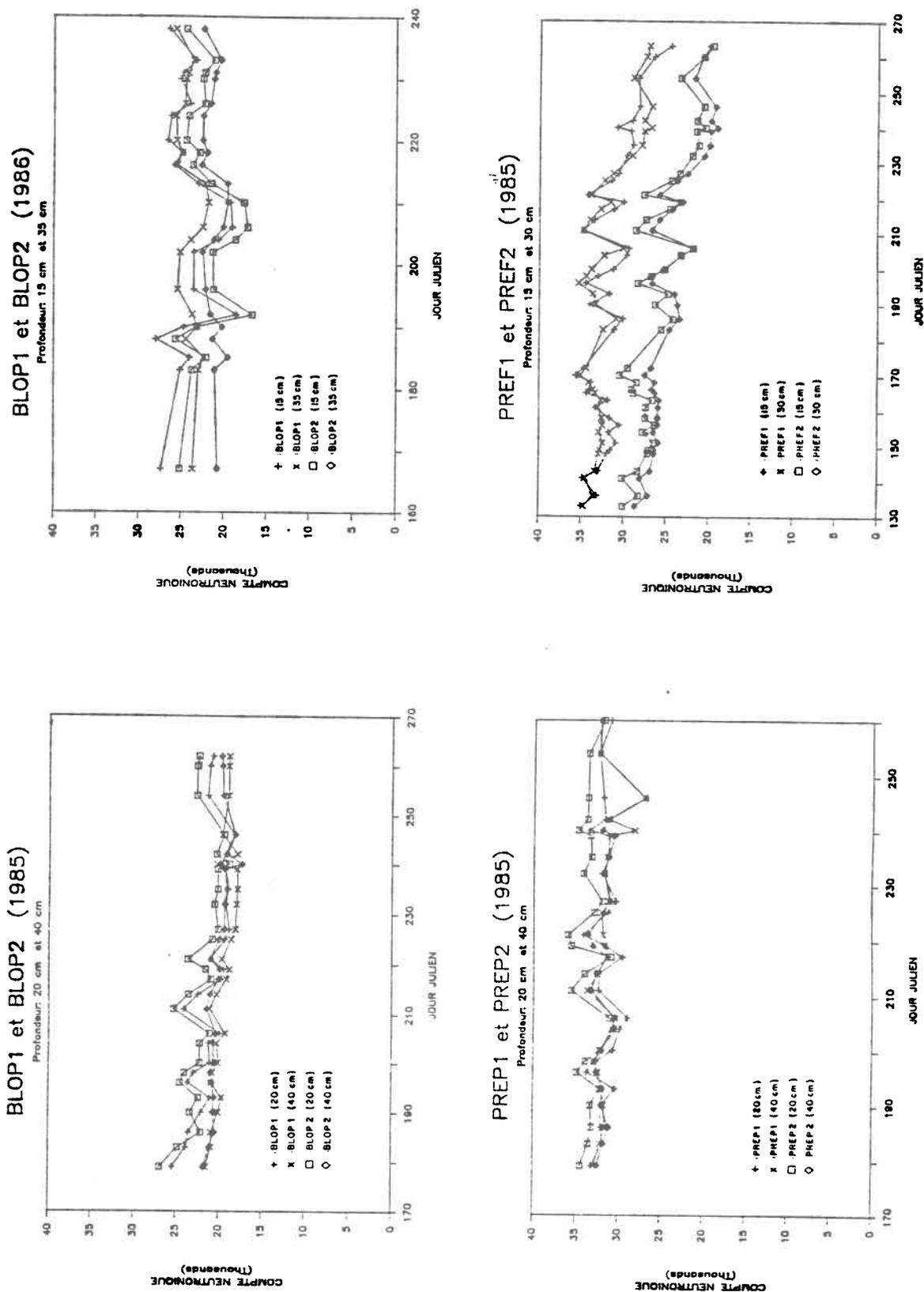


Figure C.7 Comparaison de l'évolution de la teneur en eau (ou du compte neutronique) moyen au cours d'une saison entre sites (et entre profondeurs) d'un même champ (suite).

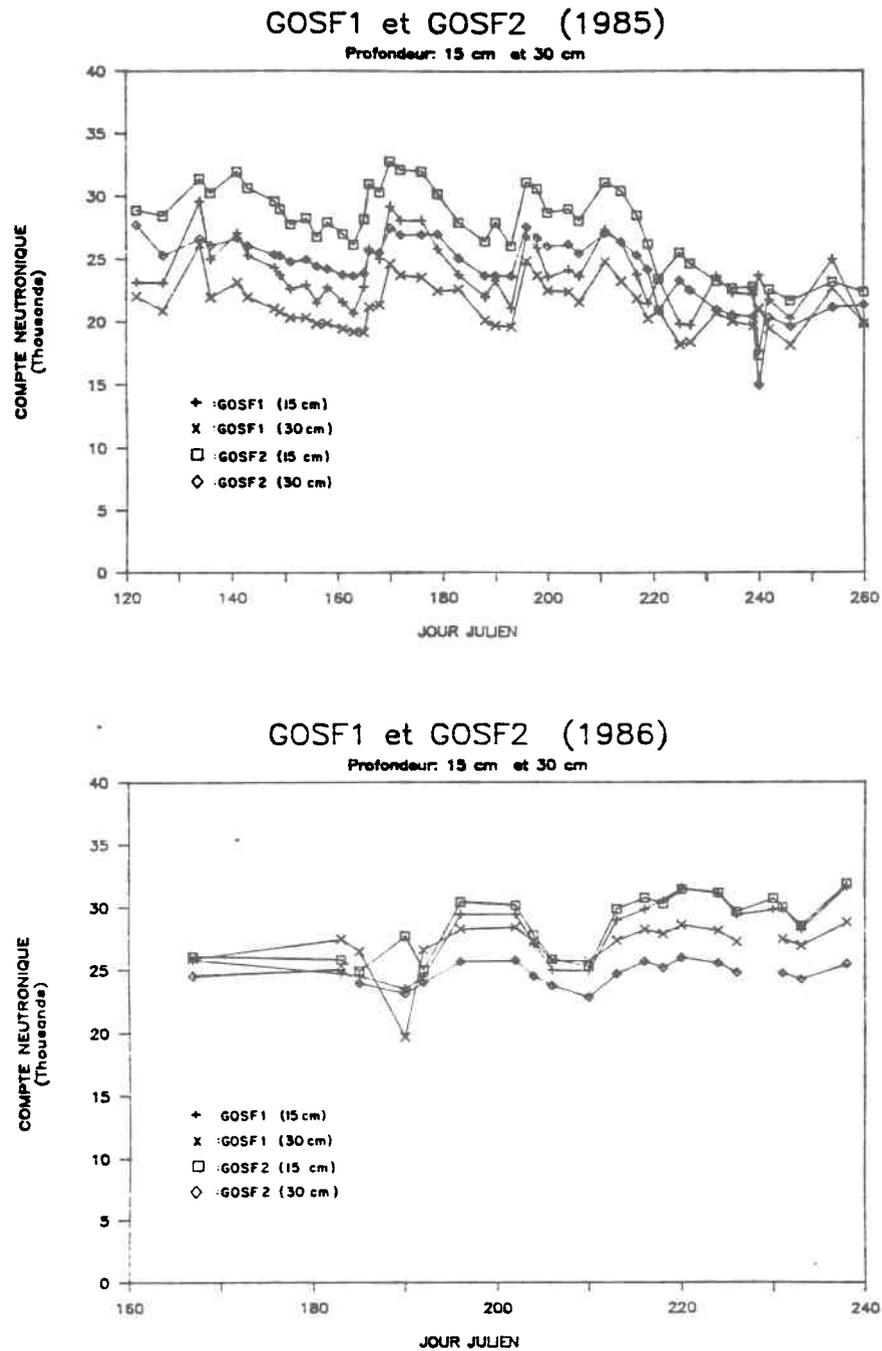


Figure C.7 Comparaison de l'évolution de la teneur en eau (ou du compte neutronique) moyen au cours d'une saison entre sites (et entre profondeurs) d'un même champ (suite).

si on compare les valeurs absolues des teneurs en eau moyennes pour les sites d'un même champ, on observe que les sites localisés à Notre-Dame-de-la-Paix sont assez semblables alors qu'à Baie-Comeau, les sites BUIP1-85 et BUIP1-86 ont des teneurs en eau pondérales 4 à 5% (base sèche) plus faibles que les sites BUIP2-85 et BUIP2-86. Ces observations s'expliquent par le fait que le sol entre 0 et 20 cm sur les deux sites situés à Notre-Dame-de-la-Paix a des caractéristiques de rétention en eau semblables. On a sur les deux sites un loam sableux contenant 3% de matière organique. Par contre, les sites situés à Baie-Comeau ont des sols différents en surface. Le site 2 est composé d'un loam à 4% de matière organique ayant une capacité de rétention en eau plus élevée que le sol du site 1 qui est un loam sableux à 4% de matière organique.

Pour les sites localisés à l'Ile d'Orléans, le suivi du niveau d'humidité du sol a été réalisé à l'aide d'une mesure neutronique à deux profondeurs. On observe que l'écart-type des comptes d'un site donné fluctue moins au cours de la saison qu'avec la méthode gravimétrique. Par contre, on note une plus grande variabilité de l'écart-type moyen à une profondeur donnée pour deux sites d'un même champ et entre les sites des différents champs. On peut relier les deux observations précédentes au fait que la lecture neutronique est toujours effectuée sur le même volume de sol.

On observe de plus que pour la majorité des sites, l'écart-type moyen au cours de la saison est plus élevé en profondeur que près de la surface. On observe le phénomène inverse pour les sites BLOP2-86 et GOSF1-86. Dans le premier cas, on observe pour le tuyau # 5 un compte nettement plus élevé que les autres au cours de la saison alors que pour le site GOSF1-86 un tuyau (#5) donne des lectures plus faibles que l'ensemble des autres tuyaux sur le site.

Pour les sites d'un même champ à l'Ile d'Orléans, on peut comparer directement l'évolution des comptes neutroniques au cours de l'été à une profondeur donnée puisque tous les sites d'un même champ ont la même courbe d'étalonnage sauf les sites PREF1-85 et PREF2-85.

De plus, on sait que pour une teneur en eau donnée, les comptes neutroniques seront plus faibles en surface qu'en profondeur.

On peut observer que pour l'ensemble des sites, la teneur en eau du sol à 15 ou 20 cm de profondeur est généralement plus élevée qu'à 30 ou 40 cm au cours de la saison. Ceci s'explique par la capacité de rétention du sol qui est généralement plus élevée en surface qu'en profondeur, dû notamment au taux plus élevé de matière organique en surface et au plus fort pourcentage de sable en profondeur. On note de plus que l'évolution du niveau d'humidité du sol en surface et en profondeur à l'intérieur d'un site donné est semblable dans la majorité des cas. On observe des discontinuités pour les sites BLOP1-86 et BLOP2-86 le 11 juillet où le sol en surface perd beaucoup plus d'eau qu'en profondeur et le 1er août où on observe le phénomène inverse. Pour les sites GOSF1-86 et GOSF2-86, on observe également des évolutions variables en surface (15 cm) et en profondeur à certaines dates au cours de l'été.

Si on compare l'évolution du niveau d'humidité du sol pour deux sites d'un même champ, on observe très peu de différence pour l'ensemble des champs, tant en surface qu'en profondeur.

Il est intéressant de noter que le niveau d'humidité du site BLOP1-85 est légèrement inférieur à celui du site BLOP2-85 tout au cours de la saison et pour les deux profondeurs de mesure alors qu'on observe le phénomène inverse pour les mêmes sites l'été suivant. Comme le sol de ces deux sites a des caractéristiques de rétention en eau voisines, ce résultat est acceptable. La différence peut être attribuée à la forte pluviométrie enregistrée au cours de l'été 1986.

Les comptes neutroniques moyens sont peu différents pour les sites PREP1-85 et PREP2-85 ainsi que pour les sites GOSF1-86 et GOSF2-86 au cours de la saison de culture pour les deux profondeurs de mesure, même si en surface le sol du site GOSF1-86 semble contenir plus d'eau. Par contre, le site GOSF2-86 est sensiblement plus humide en surface et en profondeur que le site GOSF1-85. Le site PREP1-85 est

également plus humide que le site PREF2-85 tel que le confirment les points des courbes de calibration ainsi que la valeur des comptes de chaque site. Ces résultats sont en accord avec l'analyse texturale réalisée pour chaque sol sauf pour les sites PREF1 et 2 (1985) où le sol du site 2 devrait retenir davantage l'eau que le sol du site 1 (tableaux B.3 et B.4)

ANNEXE D

COMPTES NEUTRONIQUES MESURÉS A L'AIDE D'UNE
SONDE A NEUTRONS POUR LES SITES CULTIVÉS EN
POMMES DE TERRE ET EN FRAISES A L'ILE D'ORLÉANS
POUR L'ÉTÉ 1986

Tableau D.1 Comptes neutroniques mesurés à l'aide d'une sonde à neutrons sur l'Ile d'Orléans pour le site BLOP1 (1986) à 15 cm de profondeur.

Site BLOP1 (1986), lecture à 15 cm de profondeur

DATE (jour julien)	POSITION DU TUYAU D'ACCES							MOYENNE	S ¹
	1	2	3	4	5	6	7		
167	26747	23817	25472	26915	29686	29387	29515	27363	2268
183	24442	20650	23380	25191	28418	27752	26028	25123	2649
185	23051	19435	22054	24014	28336	26696	24449	24005	2938
188	26161	25417	25192	28832	30122	29889	30241	27979	2299
190	23441	20981	22470	24833	28562	27206	25173	24667	2640
192	20354	13731	17591	18372	19314	20924	19099	18484	2378
196	23239	19470	21563	24249	23386	25759	27038	23529	2525
202	24855	19140	23198	23434	23065	25134	25814	23520	2204
204	21634	16086	20607	21233	20807	21873	22130	20624	2076
206	19965	14443	18455	19922	19929	20077	20550	19049	2131
210	20472	14801	18392	20171	19595	20253	21125	19258	2141
213	21938	18983	21811	26303	23678	23357	25058	23018	2395
216	25856	21360	24596	27564	26334	26977	28350	25862	2325
218	25481	20401	24007	26807	25300	25502	26643	24877	2182
220	26876	22334	25560	28253	26879	27387	28947	26605	2172
224	26826	22059	24821	27826	26442	26620	28923	26217	2226
226	25057	19505	22859	25536	24430	24298	25919	23943	2195
230	26366	21297	23448	27225	25045	24942	27388	25102	2182
231	25955	20536	23193	27124	24600	24810	26985	24743	2320
233	24441	18880	22116	25247	23287	23365	25426	23252	2256
238	27060	22151	25268	28169	26470	26853	29100	26439	2251

- 28336 : Compte neutronique utilisé pour la calibration de la sonde à neutrons.
 * : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.
 1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau D.2 Comptes neutroniques mesurés à l'aide d'une sonde à neutrons sur l'Ile d'Orléans pour le site BLOP1 (1986) à 35 cm de profondeur.

Site BLOP1 (1986), lecture à 35 cm de profondeur

DATE (jour julien)	POSITION DU TUYAU D'ACCES							MOYENNE	s ¹
	1	2	3	4	5	6	7		
167	20372	19715	19812	26199	24925	30561	23664	23607	4017
183	19971	18781	19455	25649	24258	29553	23303	22996	3898
185	19551	17992	18767	24643	24271	29127	22140	22356	3970
188	21270	20242	20706	27105	25551	31564	24549	24427	4097
190	20154	18697	19465	25735	24598	30180	23094	23132	4094
192	20009	18998	18988	25487	29029	28204	25109	23689	4317
196	20610	22182	20244	27742	29617	29880	27614	25413	4245
202	20939	20934	21236	27332	28761	29724	26983	25130	3935
204	19998	19243	20292	25894	28464	28035	25195	23874	3948
206	19012	17733	19102	25064	26216	26776	23375	22468	3783
210	18137	18015	18462	24296	25137	25735	22938	21817	3489
213	18061	19806	18443	24853	24583	25877	23849	22210	3315
216	21555	22694	20994	27747	28260	30373	27106	25533	3713
218	21066	22083	20733	27199	27734	29063	26577	24922	3499
220	21308	23119	21253	27867	28598	29760	27115	25574	3587
224	21500	23468	21284	27639	28586	29983	27231	25670	3533
226	20343	22327	20147	26573	27840	28464	26320	24573	3545
230	20505	22236	19860	26458	27632	28507	25814	24430	3512
231	19925	21975	19807	26302	27325	28460	25373	24167	3564
233	19669	21332	19366	25366	26721	27806	24790	23579	3427
238	21278	23418	21385	27749	28417	30021	27153	25632	3552

- 24271 : Compte neutronique utilisé pour la calibration de la sonde à neutrons.
 * : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.
 1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau D.3 Comptes neutroniques mesurés à l'aide d'une sonde à neutrons sur l'Ile d'Orléans pour le site BLOP2 (1986) à 15 cm de profondeur.

Site BLOP2 (1986), lecture à 15 cm de profondeur

DATE (jour julien)	POSITION DU TUYAU D'ACCES							MOYENNE	S ¹
	1	2	3	4	5	6	7		
167	22386	23030	25133	25011	29069	24455	26862	25135	2270
183	19853	23913	23636	23918	29199	21265	24556	23763	2937
185	18400	20062	22557	23930	25407	20270	23629	22036	2516
188	23349	22459	24374	26788	29744	25072	27861	25664	2594
190	20657	20961	22201	24685	26417	21687	25337	23135	2304
192	16796	14963	14106	16286	20085	16166	18357	16680	2017
196	22029	17701	18275	19973	25887	21217	23350	21205	2875
202	21485	18714	17934	20414	25457	22306	22810	21303	2563
204	18591	16085	15826	17099	22453	20306	20264	18661	2476
206	17117	15011	14579	16333	20626	18266	18713	17235	2144
210	16921	15140	14707	16362	21385	19337	19737	17656	2527
213	19498	18193	21171	21024	26843	23318	20362	21487	2841
216	22949	19435	21827	23099	28627	25624	23878	23634	2904
218	21394	19279	21102	22111	27555	24805	23705	22850	2744
220	23471	20320	22193	24039	29449	26304	25181	24422	2951
224	23262	20406	21290	23352	29542	25977	25119	24135	3081
226	20599	18777	19830	21153	27704	24451	23198	22245	3091
230	21261	18770	19616	21522	28174	24494	23245	22440	3200
231	20885	18273	19875	21384	27707	24083	23544	22250	3133
233	19463	17472	18803	20222	26615	23207	21853	21091	3091
238	23276	20588	21961	23307	29588	26059	25920	24386	3025

- 25407 : Compte neutronique utilisé pour la calibration de la sonde à neutrons.
 * : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.
 1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau D.4 Comptes neutroniques mesurés à l'aide d'une sonde à neutrons sur l'île d'Orléans pour le site BLOP2 (1986) à 35 cm de profondeur.

Site BLOP2 (1986), lecture à 35 cm de profondeur

DATE (jour julien)	POSITION DU TUYAU D'ACCES							MOYENNE	s ¹
	1	2	3	4	5	6	7		
167	19377	17583	19981	21339	19485	23088	24361	20745	2344
183	18838	19791	19749	21072	21528	22603	24109	21099	1833
185	18474	16774	18808	20035	18050	21753	22862	19537	2149
188	19940	18112	21105	21720	<u>19770</u>	23612	25006	21324	2368
190	19101	17157	19705	21071	18460	22046	24025	20224	2329
192	18892	<u>21075</u>	21075	22465	19810	22103	25723	21592	2202
196	19662	18513	22180	22813	20840	23878	27070	22137	2851
202	19942	18741	23098	23174	20974	<u>24227</u>	27356	22502	2898
204	18660	17622	21713	22217	20177	22078	25668	21162	2656
206	17797	16839	20055	<u>21437</u>	19210	20999	24070	20058	2418
210	<u>17473</u>	16464	19261	20442	18893	20958	23464	19565	2326
213	17422	16718	20015	20591	19104	21294	21974	19588	1956
216	20567	18674	<u>22779</u>	24095	21233	24262	26745	22622	2696
218	19544	18015	22333	24105	20335	23657	25992	21997	2826
220	20277	18682	22529	24395	20999	24164	<u>26647</u>	22528	2748
224	20359	<u>18908</u>	22412	24333	20856	24011	26202	22440	2566
226	19406	18028	21820	23076	<u>20302</u>	23146	25073	21550	2447
230	18940	17832	21436	22372	20143	<u>23359</u>	24169	21179	2326
231	18723	17650	21307	22270	19630	23295	24263	21020	2446
233	17910	17285	20651	<u>21020</u>	19594	22620	23498	20368	2292
238	<u>20126</u>	18665	<u>22558</u>	24266	21001	23787	26304	22387	2638

18050 : Compte neutronique utilisé pour la calibration de la sonde à neutrons.
 * : Valeur réjetée pour l'ajustement du modèle.
 1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau D.5 Comptes neutroniques mesurés à l'aide d'une sonde à neutrons sur l'Ile d'Orléans pour le site GOSF1 (1986) à 15 cm de profondeur.

Site GOSP1 (1986), lecture à 15 cm de profondeur

DATE (jour julien)	POSITION DU TUYAU D'ACCES							MOYENNE	S ¹
	1	2	3	4	5	6	7		
167	27683	25910	23290	25718	23987*	28296		25814	1969
183	27982	21685	25395	26159	19242*	27903		24728	3536
185	27148	22051	23737	26628	19648*	28043		24543	3293
190	20376	19326	21610	26290	25213*	28171		23498	3558
192	27012	21126	23938	26337	20069*	28674		24526	3419
196	32009	27685	30192	31709	22518*	32748		29477	3853
202	32289	27942	30017	30929	22944*	32845		29494	3652
204	30110	24872	26959	29390	20002*	31666		27167	4254
206	28093	22586	24424	26954	17722*	30057		24973	4429
210	27666	23080	24052	26868	17872*	29815		24892	4221
213	31631	27993	28640	30252	23201*	32419		29023	3315
216	32331	28861	30509	31006	23624*	32983		29886	3390
218	31867	28352	29752	30395		32804		30634	1752
220	32771	29260	30781	31556		33569		31587	1688
224	32181	28588	30318	31336		33344		31153	1814
226	30354	26739	28313	30012		31783		29440	1950
230	32222	28514	29785	31030	24683*	32885		29853	2991
231	31077	27134	29048	30063		32294		29923	1970
233	29503	25256	26746	28621		31116		28248	2299
238	32565	29134	30784	32493		33309		31657	1687

19648 : Compte neutronique utilisé pour la calibration de la sonde à neutrons.
 * : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.
 1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

Tableau D.6 Comptes neutroniques mesurés à l'aide d'une sonde à neutrons sur l'île d'Orléans pour le site GOSF2 (1986) à 15 cm de profondeur.

Site GOSF2 (1986), lecture à 15 cm de profondeur									
DATE (jour julien)	POSITION DU TUYAU D'ACCES							MOYENNE	S ¹
	1	2	3	4	5	6	7		
167	23336	25339	27196	27710	26490	26414	26081	1566	
183	24747	26448	28022	26910	22980	26132	25873	1774	
185	23622	25290	26782	25836	22814	25344	24948	1465	
190	27211	27267	28618	29166	<u>26865</u>	27508	27773	908	
192	23491	25719	<u>26740</u>	25632	22585	25986	25026	1614	
196	27758	30576	32579	31411	29817	30707	30475	1624	
202	27547	30435	31762	30862	30164	<u>30482</u>	30209	1418	
204	25788	28171	29523	28067	27204	28164	27820	1242	
206	<u>23912</u>	26542	27637	25827	24749	26401	25845	1337	
210	23636	<u>25788</u>	27132	24564	24801	25613	25256	1203	
213	28021	29897	31433	30898	29853	29376	29913	1196	
216	28383	31127	32308	31507	30648	<u>30859</u>	30805	1323	
218	27876	30544	31532	30825	30834	30439	30342	1267	
220	29002	31502	33096	31683	31755	31817	31476	1340	
224	28553	31309	32806	<u>32560</u>	31257	30772	31210	1525	
226	<u>27276</u>	29726	<u>31296</u>	31293	29193	29132	29653	1518	
230	<u>28214</u>	30661	32162	32285	30820	30287	30738	1484	
231	27779	29708	31666	31287	29993	29736	30028	1379	
233	26361	<u>28007</u>	30046	30593	28092	27849	28491	1561	
238	28892	31596	32514	<u>32673</u>	34396	<u>31290</u>	31894	1828	

22814 : Compte neutronique utilisé pour la calibration de la sonde à neutrons.
 * : Valeur rejetée pour l'ajustement du modèle.
 1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7).

ANNEXE E

MESURES DE TENEURS EN EAU DU SOL AYANT SERVI
A LA CALIBRATION DE LA SONDE A NEUTRONS POUR
LES SITES LOCALISÉS A L'ILE D'ORLÉANS POUR
LES ÉTÉS 1985 et 1986

Tableau E.1 Mesures ayant servi à la calibration de la sonde à neutrons pour les sites BLOP1 et BLOP2 (1985) à 20 cm de profondeur.

SITE	DATE (jour julien)	TENEUR EN EAU PONDERALE (% B.S.)					POSITION DU TUYAU D'ACCES	COMPTE NEUTRONIQUE		
		1	2	3	4	moyenne		S ¹	ponctuel	moyen
BLOP1 1985 20 cm	183	10.7	15.2	16.5		14.1	3.0	7	23157	23828
	190	13.0	13.0	14.0		13.3	0.6	4	23110	22069
	198	13.7	14.4	15.2		14.4	0.8	4	24161	22967
	204	10.8	13.0	13.4		12.4	1.4	2	19158	21214
	206	12.0	12.9	14.1		13.0	1.1	1	19175	19904
	211	11.6	14.5	16.6		14.2	2.5	2	22746	24126
	219	8.1	10.3	11.2		9.9	1.6	5	19782	19437
	225	8.8	9.2	9.6		9.2	0.4	2	18829	19320
	232	9.7	10.3	11.7		10.6	1.0	7	19179	19282
	240	12.2	13.1	15.1		13.5	1.5	3	19751	19751
BLOP2 1985 20 cm	183	15.0	15.3	16.2		15.50	0.6	7	24804	24809
	190	14.0	14.0	17.0		15.00	1.7	6	24183	23316
	198	14.0	14.6	15.2		14.60	0.6	4	21008	24021
	204	11.2	11.8	16.6		13.20	3.0	2	24178	22222
	206	9.0	11.2	11.4		10.53	1.3	1	20383	21087
	211	14.8	16.1	16.1		15.67	0.8	2	27172	25306
	219	12.4	12.6	13.3		12.77	0.5	5	23086	21582
	225	12.2	12.3	12.6		12.36	0.2	2	23499	20806
	232	10.4	12.9	13.2		12.17	1.5	7	20313	20562
	240	11.4	11.4	12.0		11.59	0.4	3	18853	18853

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7)

Tableau E.2 Mesures ayant servi à la calibration de la sonde à neutrons pour les sites BLOP1 et BLOP2 (1985) à 40 cm de profondeur.

SITE	DATE (jour julien)	TENEUR EN EAU PONDERALE (% B.S.)					POSITION DU TUYAU D'ACCES	COMPTE NEUTRONIQUE		
		1	2	3	4	moyenne		S ¹	ponctuel	moyen
BLOP1 1985 40 cm	183	7.7	8.8	10.7		9.1	1.5	7	23475	20876
	190	8.0	11.0	11.0		10.0	1.7	4	19797	20070
	198	7.6	7.6	7.6		7.6	0.0	4	20726	20781
	204	7.1	8.4	9.6		8.4	1.3	2	16224	20267
	206	7.8	8.3	11.5		9.2	2.0	1	17089	19283
	211	8.5	8.6	8.9		8.7	0.2	2	18693	21086
	219	7.0	7.4	7.9		7.4	0.5	5	18618	18802
	225	7.2	7.7	8.1		7.7	0.4	2	16122	18600
	232	5.8	6.9	7.5		6.7	0.8	7	19361	17991
	240	5.7	7.5	7.8		7.0	1.1	3	20311	20311
BLOP2 1985 40 cm	183	7.8	11.1	12.0		10.3	2.2	7	22321	21118
	190	9.0	9.0	11.0		9.7	1.2	6	18458	20671
	198	7.5	8.3	9.1		8.3	0.8	4	18477	20973
	204	9.0	10.3	13.4		10.9	2.3	2	23146	20640
	206	6.3	6.7	6.8		6.6	0.3	1	19622	20355
	211	8.5	8.7	10.2		9.1	0.9	2	24206	21434
	219	7.6	8.3	14.9		10.3	4.0	5	23095	19926
	225	9.1	11.5	13.3		11.3	2.1	2	22941	19996
	232	7.2	10.4	10.4		9.3	1.9	7	19683	19398
	240	6.8	8.5	9.9		8.4	1.6	3	17362	17362

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7)

Tableau E.3 Mesures ayant servi à la calibration de la sonde à neutrons pour les sites BLOP1 et BLOP2 (1986) à 15 cm de profondeur.

SITE	DATE (jour julien)	TENEUR EN EAU PONDERALE (% B.S.)						POSITION DU TUYAU D'ACCES	COMPTE NEUTRONIQUE	
		1	2	3	4	moyenne	S ¹		ponctuel	moyen
BLOP1 1986 15 cm	185	15.8	16.8	17.6	19.4	17.4	1.5	5	28336	24005
	190	11.1	11.3	12.6	15.2	12.5	1.9	2	20981	24667
	196	18.6	19.5	20.7	21.1	20.0	1.2	6	25759	23529
	204	15.7	15.8	15.8	16.9	16.0	0.6	4	21233	21233
	206	11.3	11.7	11.7	12.7	11.9	0.6	1	19965	19049
	213	13.3	13.9	14.4	14.5	14.0	0.5	3	21811	23018
	218	16.4	17.2	18.1	18.2	17.5	0.8	7	26643	24877
	220	16.2	17.8	19.6	21.1	18.7	2.1	2	22334	26605
	224	17.8	18.3	18.8	20.1	18.7	1.0	5	26442	26217
	226	16.2	16.8	16.8	18.2	17.0	0.8	6	24298	23943
	231	14.4	16.4	18.7	18.7	17.1	2.1	4	27124	24743
	233	14.3	15.5	15.6	16.6	15.5	0.9	1	24441	23252
	238	13.5	16.0	17.2	18.0	16.2	1.9	3	25268	26439
BLOP2 1986 15 cm	185	13.7	14.9	14.9	15.4	14.7	0.7	5	25407	22036
	190	10.2	10.3	10.9	11.1	10.6	0.4	2	20961	23135
	196	10.7	14.8	18.2	19.0	15.7	3.8	6	21217	21205
	204	13.4	14.9	15.1	15.6	14.7	0.9	4	17099	18661
	206	10.3	10.4	10.5	10.5	10.4	0.1	1	17117	17235
	213	14.9	15.1	15.3	15.3	15.1	0.2	3	21171	21487
	218	15.3	17.9	18.0	18.2	17.3	1.4	7	23705	22850
	220	12.2	13.6	14.7	17.6	14.5	2.3	2	20320	24422
	224	18.0	18.6	19.8	21.8	19.5	1.7	5	29542	24135
	226	15.1	15.6	16.3	18.2	16.3	1.3	6	24451	22245
	231	14.8	16.6	16.8	16.9	16.3	1.0	4	21384	22250
	233	11.5	12.0	12.2	12.3	12.0	0.4	1	19463	21091
	238	12.1	13.6	14.4	14.9	13.7	1.2	3	21961	24386

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7)

Tableau E.4 Mesures ayant servi à la calibration de la sonde à neutrons pour les sites BLOP1 et BLOP2 (1986) à 35 cm de profondeur.

SITE	DATE (jour julien)	TENEUR EN EAU PONDERALE (% B.S.)						POSITION DU TUYAU D'ACCES	COMPTE NEUTRONIQUE	
		1	2	3	4	moyenne	S ¹		ponctuel	moyen
BLOP1 1986 35 cm	185	11.7	12.7	16.4	16.6	14.4	2.5	5	24271	22356
	190	7.8	8.0	8.6	9.2	8.4	0.7	2	18697	23132
	196	13.1	13.6	14.5	16.4	14.4	1.5	6	29880	25413
	204	11.0	11.6	11.8	15.8	12.5	2.2	4	25894	23874
	206	7.5	9.3			8.4	1.3	1	19012	22468
	213	7.1	7.4	7.5	9.6	7.9	1.1	3	18443	22210
	218	11.5	11.5	12.7	13.3	12.2	0.9	7	26577	24922
	220	10.4	13.5	15.4	16.1	13.9	2.6	2	23119	25574
	224	12.3	12.8	22.0	22.1	17.3	5.5	5	28586	25670
	226	9.8	14.2	17.5	17.6	14.8	3.7	6	28464	24573
	231	10.0	11.2	11.6	13.5	11.6	1.5	4	26302	24167
	233	7.6	9.5	9.6	11.4	9.5	1.5	1	19669	23579
	238	8.6	10.3	11.5	13.6	11.0	2.1	3	21385	25632
BLOP2 1986 35 cm	185	8.5	8.8	10.1	11.7	9.8	1.5	5	18050	19537
	190	8.6	8.7	8.9	9.4	8.9	0.4	2	17157	20224
	196	10.0	10.1	10.3	12.8	10.8	1.3	6	23878	22137
	204	9.3	10.1	10.7	11.3	10.4	0.8	4	22217	21162
	206	8.1	8.9	9.1	10.9	9.2	1.2	1	17797	20058
	213	7.4	8.7	10.8	11.1	9.5	1.7	3	20015	19588
	218	13.9	14.9	15.1	23.4	16.8	4.4	7	25992	21997
	220	9.3	9.5	11.8	16.0	11.6	3.1	2	18682	22528
	224	10.1	10.5	12.6	14.2	11.8	1.9	5	20856	22440
	226	11.3	12.8	13.7	15.5	13.3	1.7	6	23146	21550
	231	9.0	11.3	12.8	12.9	11.5	1.8	4	22270	21020
	233	7.6	7.9	8.1	9.8	8.3	1.0	1	17910	20368
	238	10.7	12.4	12.5	12.5	12.0	0.9	3	22558	22387

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7)

Tableau E.5 Mesures ayant servi à la calibration de la sonde à neutrons pour les sites PREP1 et PREP2 (1985) à 20 cm de profondeur.

SITE	DATE (jour julien)	TENEUR EN EAU PONDERALE (% B.S.)						POSITION DU TUYAU D'ACCES	COMPTE NEUTRONIQUE	
		1	2	3	4	moyenne	S ¹		ponctuel	moyen
PREP1 1985 20 cm	183	16.1	18.5	20.2		18.3	2.1	6	31596	31778
	190	20.0	20.0	20.0		20.0	0.0	6	30850	31940
	198	18.4	18.4	19.1		18.6	0.4	4	32474	32625
	204	16.9	17.4	20.9		18.4	2.2	3	31386	29826
	206	14.9	15.9	16.7		15.8	0.9	1	30644	28892
	211	19.5	21.4	22.6		21.2	1.6	2	32368	32359
	219	16.9	17.9	18.6		17.8	0.9	5	30351	31622
	225	16.3	17.7	20.7		18.2	2.2	2	29877	31232
	232	18.8	20.2	21.2		20.1	1.2	7	33569	32008
	240	19.1	22.5	23.0		21.5	2.1	3	33494	26906
PREP2 1985 20 cm	183	20.8	22.3	25.0		22.7	2.1	6	34898	33492
	190	21.0	21.0	23.0		21.7	1.2	6	33534	33264
	198	18.5	20.9	21.7		20.4	1.7	3	33594	33863
	204	15.9	16.5	17.7		16.7	0.9	2	30131	30137
	206	16.2	16.8	17.5		16.8	0.7	1	30055	31007
	211	21.1	24.0	24.1		23.1	1.7	2	34724	35565
	219	24.7	25.7	27.3		25.9	1.3	5	32944*	35556
	225	18.5	19.1	20.0		19.2	0.7	2	32429	32855
	232	20.8	22.7	24.8		22.7	2.0	7	34887	34141
	240	20.4	21.9	22.4		21.6	1.0	3	34764	34764

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7)
 * : Valeur non considérée dans la régression

Tableau E.6 Mesures ayant servi à la calibration de la sonde à neutrons pour les sites PREP1 et PREP2 (1985) à 40 cm de profondeur.

SITE	DATE (jour julien)	TENEUR EN EAU PONDERALE (% B.S.)					POSITION DU TUYAU D'ACCES	COMPTE NEUTRONIQUE		
		1	2	3	4	moyenne		s^1	ponctuel	moyen
PREP1 1985 40 cm	183	14.0	17.7	19.5		17.1	2.8	6	32191	32112
	190	21.0	22.0	22.0		21.7	0.6	6	31476	31676
	198	16.8	16.8	17.1		16.9	0.2	4	31298	32828
	204	11.5	13.5	19.0		14.7	3.9	3	27962	30777
	206	15.6	16.7	18.6		17.0	1.5	1	27458	30369
	211	24.4	24.4	31.2		26.7	3.9	2	38359	33647
	219	9.4	11.3	20.5		13.7	5.9	5	30676	31658
	225	22.0	26.9	31.4		26.8	4.7	2	38670	31949
	232	13.2	17.1	21.6		17.3	4.2	7	34310	31652
	240	16.4	16.4	21.4		18.0	2.9	3	28101	28101
PREP2 1985 40 cm	183	13.5	14.2	21.7		16.5	4.5	6	33976	31691
	190	22.0	23.0	23.0		22.7	0.6	6	33522	31994
	198	13.4	15.5	18.5		15.8	2.6	3	33120	32767
	204	13.9	14.5	14.9		14.4	0.5	2	28464	30589
	206	15.1	15.5	15.7		15.4	0.3	1	27079	30424
	211	13.2	20.0	20.7		18.0	4.1	2	29525	33191
	219	20.1	20.3	23.7		21.4	2.0	5	33658	33029
	225	9.3	10.2	14.4		11.3	2.7	2	27500	31737
	232	15.3	18.1	21.8		18.4	3.3	7	31268	31634
	240	14.7	16.8	20.6		17.4	3.0	3	31910	19978

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7)

Tableau E.7 Mesures ayant servi à la calibration de la sonde à neutrons pour les sites PREF1 et PREF2 (1985) à 15 cm de profondeur.

SITE	DATE (jour julien)	TENEUR EN EAU PONDERALE (% B.S.)					POSITION DU TUYAU D'ACCES	COMPTE NEUTRONIQUE		
		1	2	3	4	moyenne		S ¹	ponctuel	moyen
PREF1 1985 15 cm	163	22.9	23.3	23.8		23.3	0.4	4	32415	31880
	166	24.1	24.9	25.7		24.9	0.8	3	33596	34040
	183	13.5	14.4	15.5		14.5	1.0	6	28872	31156
	190	23.0	24.0	24.0		23.7	0.6	7	32868	34060
	198	21.6	23.0	23.2		22.6	0.9	4	34834	33076
	204	19.5	19.7	20.5		19.9	0.5	3	32498	29684
	206	17.8	18.5	18.5		18.3	0.4	1	29555	29418
	211	21.9	22.8	23.9		22.9	1.0	3	37439	34813
	219	19.2	21.7	21.9		20.9	1.5	5	31649	30024
	225	19.6	20.1	21.2		20.3	0.9	2	29551	31437
	232	17.8	18.6	19.0		18.5	0.6	7	28565	29658
	240	16.8	18.3	18.8		18.0	1.0	3	30825	30825
	PREF2 1985 15 cm	163	13.5	14.9	15.7		14.7	1.1	1	24808
166		18.0	18.2	19.4		18.5	0.7	2	29497	29032
183		14.2	15.4	15.5		15.0	0.7	6	26448	25591
190		14.0	16.0	16.0		15.3	1.2	6	28428	26337
198		16.5	17.0	17.7		17.1	0.6	4	28697	26838
204		11.4	12.3	13.4		12.4	1.0	2	21969	23294
206		12.2	13.0	13.1		12.8	0.5	1	20585	21830
211		13.9	15.1	15.9		15.0	1.0	3	27400	28614
219		11.2	11.4	13.7		12.1	1.4	5	24052	23318
225		10.9	12.3	15.8		13.0	2.5	2	22704	24363
232		10.5	11.0	12.9		11.5	1.2	7	22511	21924
240		10.1	11.9	12.1		11.4	1.1	3	20381	20381

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7)

Tableau E.8 Mesures ayant servi à la calibration de la sonde à neutrons pour les sites GOSF1 et GOSF2 (1985) à 15 cm de profondeur.

SITE	DATE (jour julien)	TENEUR EN EAU PONDERALE (% B.S.)					POSITION DU TUYAU D'ACCES	COMPTE NEUTRONIQUE		
		1	2	3	4	moyenne		S ¹	ponctuel	moyen
GOSF1 1985 15 cm	163	13.3	15.3	15.7		14.8	1.3	1	19474	20637
	166	17.8	18.7	20.4		19.0	1.3	3	25280	25875
	183	14.5	14.7	14.8		14.7	0.2	4	25286	23696
	190	15.0	17.0	18.0		16.7	1.5	7	21877	23266
	198	17.4	18.1	20.0		18.5	1.3	6	28286	25912
	204	16.9	17.3	18.4		17.5	0.8	5	25866	24172
	206	13.1	13.2	14.2		13.5	0.6	1	20618	23605
	211	16.2	16.8	17.1		16.7	0.5	2	25340	27442
	219	11.5	13.7	14.3		13.2	1.5	5	22453	21439
	225	10.2	10.5	11.1		10.6	0.5	2	17701	19805
	232	14.1	14.4	18.7		15.7	2.6	7	24629	23682
	240	11.3	13.7	14.0		13.0	1.5	3	23764	23764
GOSF2 1985 15 cm	163	18.1	20.4	21.8		20.1	1.9	1	25366	26131
	166	23.0	23.6	23.8		23.4	0.4	2	32626	30980
	183	17.6	18.2	20.0		18.6	1.2	4	24859	27909
	190	20.0	22.0	22.0		21.3	1.2	6	27508	27950
	198	24.2	24.4	24.9		24.5	0.4	3	32244	30662
	204	20.4	23.6	24.7		22.9	2.2	4	29852	29054
	206	19.8	20.2	20.5		20.2	0.4	1	27401	28118
	211	16.5	18.7	24.6		19.9	4.2	2	29754	31150
	219	12.4	17.2	19.1		16.2	3.5	5	24860	26251
	225	15.9	16.4	17.3		16.5	0.7	2	26159	25567
	232	15.0	15.2	18.7		16.3	2.1	7	25236	23266
	240	14.9	15.5	17.3		15.9	1.2	3	17343	17343

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7)

Tableau E.9 Mesures ayant servi à la calibration de la sonde à neutrons pour les sites GOSF1 et GOSF2 (1986) à 15 cm de profondeur.

SITE	DATE (jour julien)	TENEUR EN EAU PONDERALE (% B.S.)						POSITION DU TUYAU D'ACCES	COMPTE NEUTRONIQUE	
		1	2	3	4	moyenne	S ¹		ponctuel	moyen
GOSF1 1986 15 cm	185	15.0	15.1	15.2	15.3	15.1	0.1	5	19648	24543
	190	15.8	16.2	16.3	17.3	16.4*	0.6	3	21610	23498
	196		24.3	24.7		24.5*	0.3	6	32748	29477
	204		19.3	19.5		19.4*	0.2	1	30110	27167
	206	14.3	15.6	15.9	16.4	15.5	0.9	2	22586	24973
	213	21.9	22.6	22.9	23.9	22.9	0.8	6	32419	29023
	220	17.4	21.5	21.6	21.8	20.6	2.1	4	31556	31587
	224	18.6	20.2	20.3	20.8	20.0	0.9	3	30318	31153
	226	19.0	19.6	20.1	22.3	20.3	1.4	1	30354	29440
	231	19.5	19.6	19.6	20.5	19.8	0.5	2	27134	29923
	233	21.1*	22.3*	22.4	22.7	22.1*	0.7	6	31116	28248
	238	12.3	13.8	17.8	19.5	15.9	3.4	4	32493	31657
GOSF2 1986 15 cm	185	16.9	18.1	18.2	18.3	17.9	0.7	5	22814	24948
	190	16.5	18.4	18.8	19.1	18.2	1.2	3	28618	27773
	196	19.2	20.1	21.7	22.1	20.8*	1.4	6	30707	30475
	204		17.8	19.0		18.4*	0.9	1	25788	27820
	206	10.9*	15.2	15.9	18.6	15.2*	3.2	2	26542	25845
	213	20.8	20.8	21.2	23.1	21.5	1.1	6	29376	29913
	220	22.8	23.4	23.6	24.0	23.4	0.5	4	31683	31476
	224	20.8	22.7	22.7	22.7	22.2	0.9	3	32806	31210
	226	15.6	18.0	20.9	21.5	19.0	2.7	1	27276	29653
	231	20.9	21.6	22.3	22.5	21.8	0.7	2	29708	30028
	233	16.2	18.6	19.7	23.8	19.6	3.2	6	27849	28491
	238	17.4	17.6	20.2	20.9	19.0	1.8	4	32673	31894

1 : Ecart-type calculé à l'aide de la variance non biaisée (équation 5.7)
 * : Valeur non considérée dans la régression.

ANNEXE F

ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE
ET AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES

F. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DU MODÈLE ET AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES

F.1 Étude de la sensibilité des principaux paramètres servant au calcul du déficit en eau journalier du sol

La présente section traitera de la sensibilité du modèle de gestion de l'irrigation de Penel (1984) à ses diverses composantes soit à l'ETP et aux autres termes entrant dans le calcul de l'ETR, au déficit initial, aux caractéristiques de rétention en eau du sol, à la profondeur d'enracinement et au paramètre d'infiltration (Ia). L'identification des parties plus sensibles permettra de leur accorder une attention particulière lors de l'optimisation des paramètres et lors de l'utilisation subséquente du modèle.

La notion de sensibilité relative (Sr), décrite par l'équation F.1 a été introduite par McCuen (1973). Cette formulation élimine les différences dues à la valeur de F et de x_j et facilite la comparaison entre variables.

$$Sr_j = \frac{(F_2 - F_1)}{x_{j2} \ x_{j1}} \quad \frac{(x_{j1})}{F_1} \quad (F.1)$$

où: Sr_j : sensibilité relative de la fonction F à la variable x_j
 F_1, x_{j1} : valeurs de base de la fonction F évaluée à x_{j1} et de la variable x_j
 F_2, x_{j2} : valeurs de la fonction F après perturbation de la variable x_j , i.e. F évaluée à x_{j2}

Parce qu'elle donne des valeurs moyennes et facilite la comparaison entre variables, la sensibilité relative présente un intérêt pour les paramètres dont la sensibilité varie peu en fonction du temps. Nous l'utiliserons pour étudier la sensibilité de l'équation de Penman servant en calcul de l'ETP. Par contre, la sensibilité du modèle sera évaluée davantage sur une base graphique à cause de la raison précédente. L'étude de sensibilité du modèle sera effectuée à l'aide du site BLOP1 (été 1986) pour la culture de la pomme de terre et

à l'aide du site GOSF1 (été 1985) pour la culture de la fraise en utilisant les simulations présentées au chapitre précédent comme référence. La sensibilité de l'équation de Penman sera étudiée à l'aide des données de l'aéroport de Québec pour le mois de juin 1986 en conservant les valeurs des paramètres utilisées lors des premières simulations comme référence.

La figure F.1 (a à d) montre pour le site BLOP1 (1986) l'effet d'une variation de 25% de la teneur en eau à la capacité au champ (TEECC), de la réserve en eau utile du sol (RU en mm/m) et de la profondeur d'enracinement (PR) sur les résultats du modèle, une erreur de 25% sur les paramètres étant possible. On observe qu'une erreur de 25% sur les caractéristiques de rétention en eau du sol ou sur la profondeur d'enracinement de la culture a une influence importante sur le déficit exprimé en % de la réserve utile (en mm) qui indique quand irriguer. Une sous-estimation de la réserve utile ou de la profondeur d'enracinement demandera une fréquence d'irrigation plus élevée. Par contre, les paramètres précédents influencent peu le déficit exprimé en millimètres qui indique la hauteur d'eau à appliquer. On voit également que le modèle est moins sensible à une erreur sur la profondeur d'enracinement que sur la réserve utile (en mm/m). De plus, une surestimation de la profondeur d'enracinement entraîne un biais de moindre importance qu'une sous-estimation de cette dernière lorsque le sol en profondeur a une capacité de rétention en eau plus faible qu'en surface (cas généralement rencontré). On observe finalement qu'une erreur sur le choix de la teneur en eau à la capacité au champ a deux fois plus d'influence sur le déficit mesuré au champ que sur la réserve utile (en mm) calculée par le modèle. Ce point est d'autant plus important que les valeurs de déficits mesurés servent à la calibration du modèle et que la teneur en eau à la capacité au champ est entachée d'une erreur d'évaluation pouvant facilement atteindre 25%.

L'étude de la sensibilité du déficit initial a démontré que ce paramètre n'affecte pas la réponse du modèle dans le cas du site BLOP1. Or, on observe que pour ce site, une pluie importante s'est produite le lendemain de la date du déficit initial. Il sera donc avantageux, en

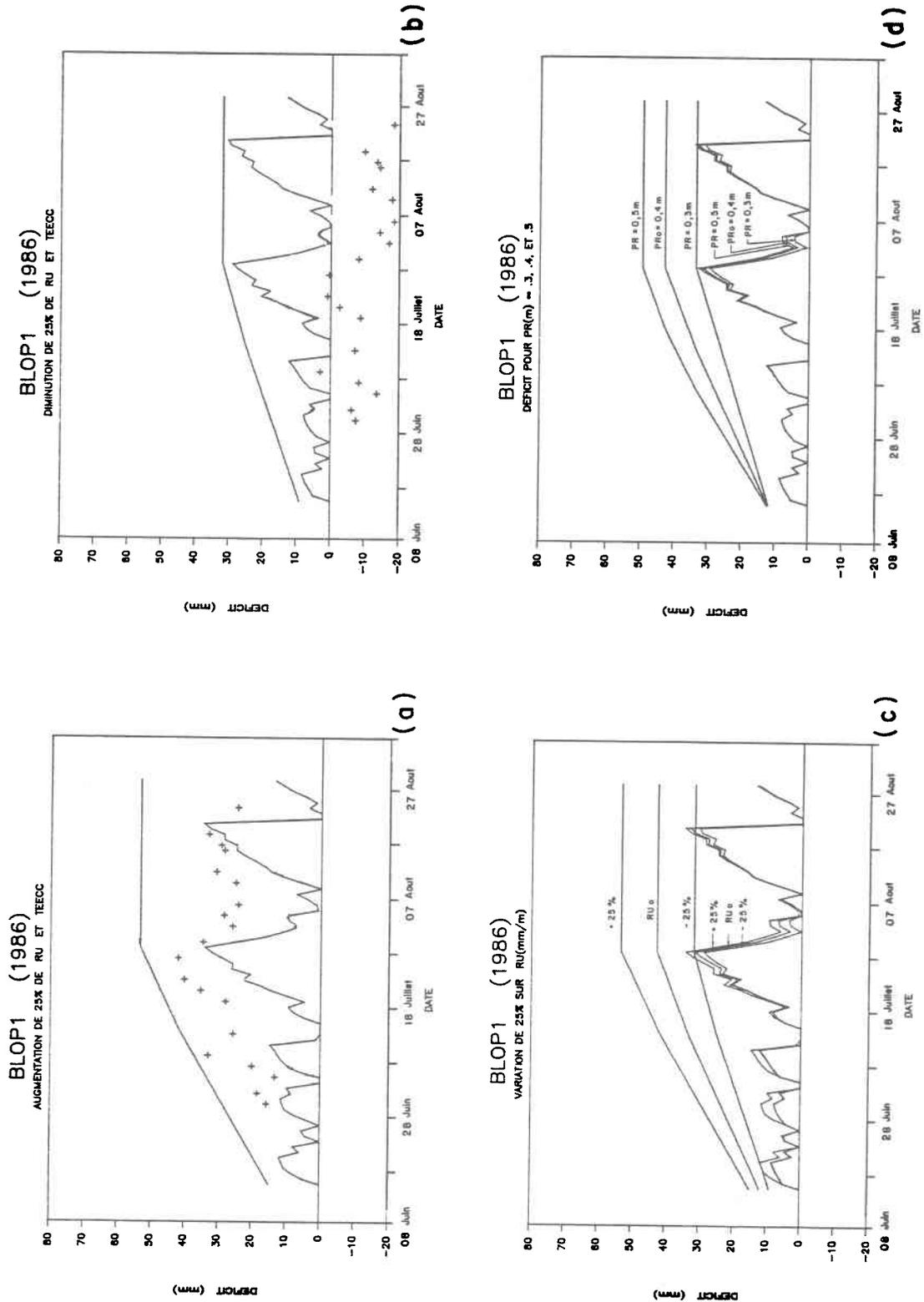


Figure F.1 Sensibilité du modèle à une variation de 25% de la teneur en eau à la capacité au champ, de la réserve utile (en mm/m) et de la profondeur d'enracinement pour le site BLOP1 en 1986.

l'absence de mesures au champ, de choisir comme valeur de départ au début de la saison un déficit nul une journée avant une pluie importante. Comme la profondeur d'enracinement est plus faible en début de saison pour la pomme de terre, le déficit en eau du sol dans la zone des racines sera facile à combler.

La sensibilité de l'indice d'abstraction initiale (I_a) qui contrôle le ruissellement est illustrée à la figure F.2. On observe que pour la valeur de référence choisie ($I_a = 12$), il n'y a aucun ruissellement, le surplus des pluies étant évacué par drainage lorsque le sol a atteint la teneur en eau à la capacité au champ. Or le site BLOP1 est cultivé sur un loam sableux (taux d'infiltration élevé) qui favorise l'infiltration et une observation de la distribution horaire des pluies pour l'aéroport de Québec montre que la pluie horaire dépasse rarement 20 mm/h ce qui est voisin du taux d'infiltration d'un loam sableux. Par contre, la forte pente du terrain et l'orientation de la culture dans le sens de la pente provoque du ruissellement à l'occasion de certaines pluies comme en témoigne l'érosion du sol entre les rangs. Pour le site étudié, le modèle commence à considérer un peu de ruissellement pour $I_a = 6$. On voit à la figure F.2 que la plus grande sensibilité du modèle se situe entre $I_a = 6$ (début de ruissellement) et $I_a = 0$ (ruissellement de toute la pluie tombée), le dernier cas étant physiquement impossible. On observe également que la sensibilité de I_a est plus marquée lors des pluies importantes. Comme nous ne disposons que des pluies journalières pour ajuster le modèle, nous devons trouver les valeurs de I_a qui représentent le mieux en moyenne le ruissellement de différentes pluies sur un site. On observe également que pour les sites où il pourrait y avoir ruissellement lors de certaines pluies, les valeurs de I_a choisies à partir du tableau 3.1 semblent un peu élevées. La sensibilité de I_a est également illustrée pour le site GOSF1 (1985) cultivé en fraises (voir figure F.3).

La figure F.4 (a à d) illustre la sensibilité des différentes composantes entrant le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR). Notons qu'un biais sur le calcul d'ETR comme sur le choix de I_a ou du déficit initial a une influence uniquement sur le déficit (exprimé en mm) et non sur la réserve utile (exprimée en mm).

BLOP1 (1986)
DEFICIT POUR $I_a = 12, 6, 3, 1, 0$

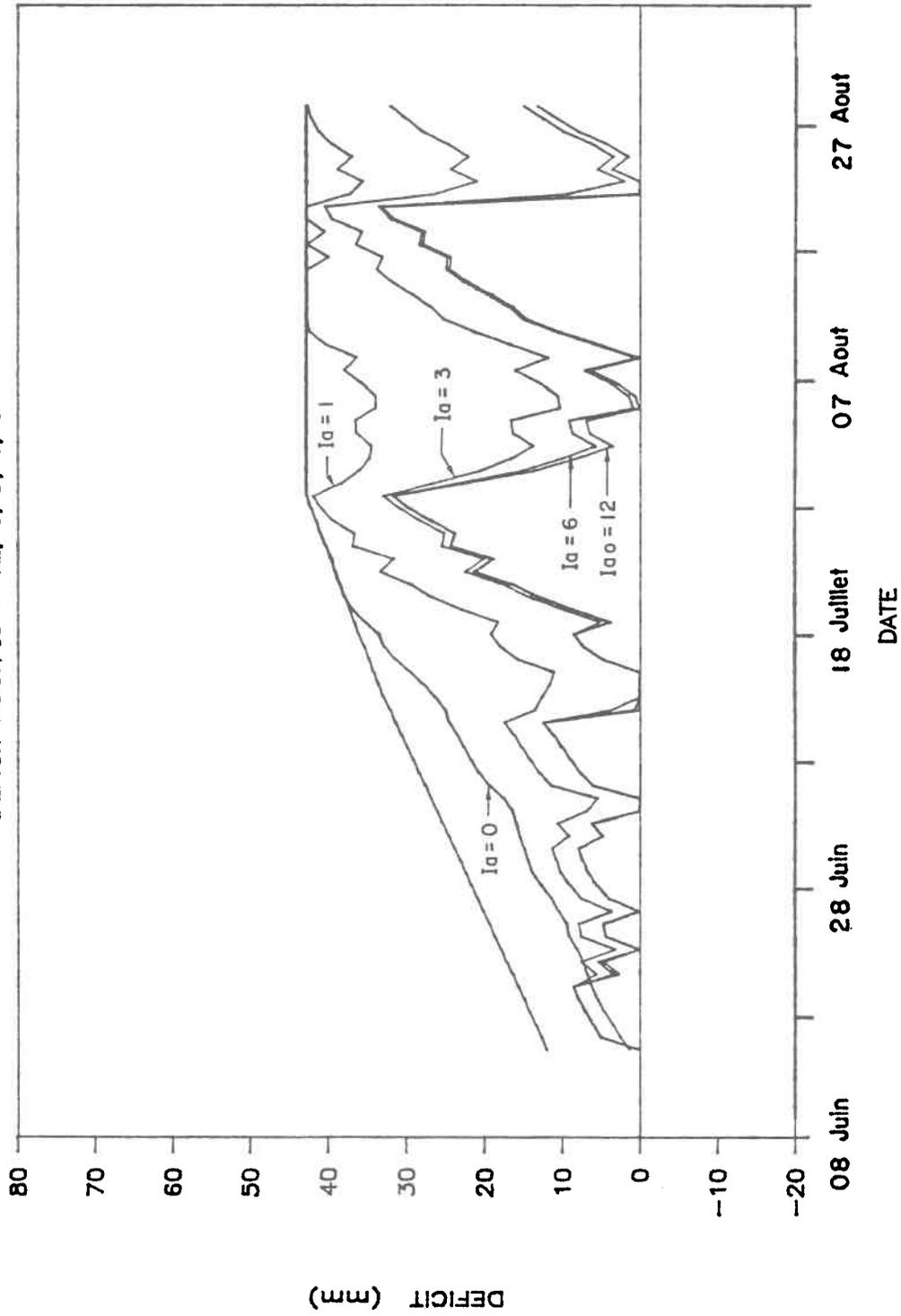


Figure F.2 Sensibilité du modèle à l'indice d'abstraction initiale (I_a) pour le site BLOP1 en 1986.

GOSF1 (1985)

DEFICIT POUR $I_0 = 9, 6, 3, 2, 1$

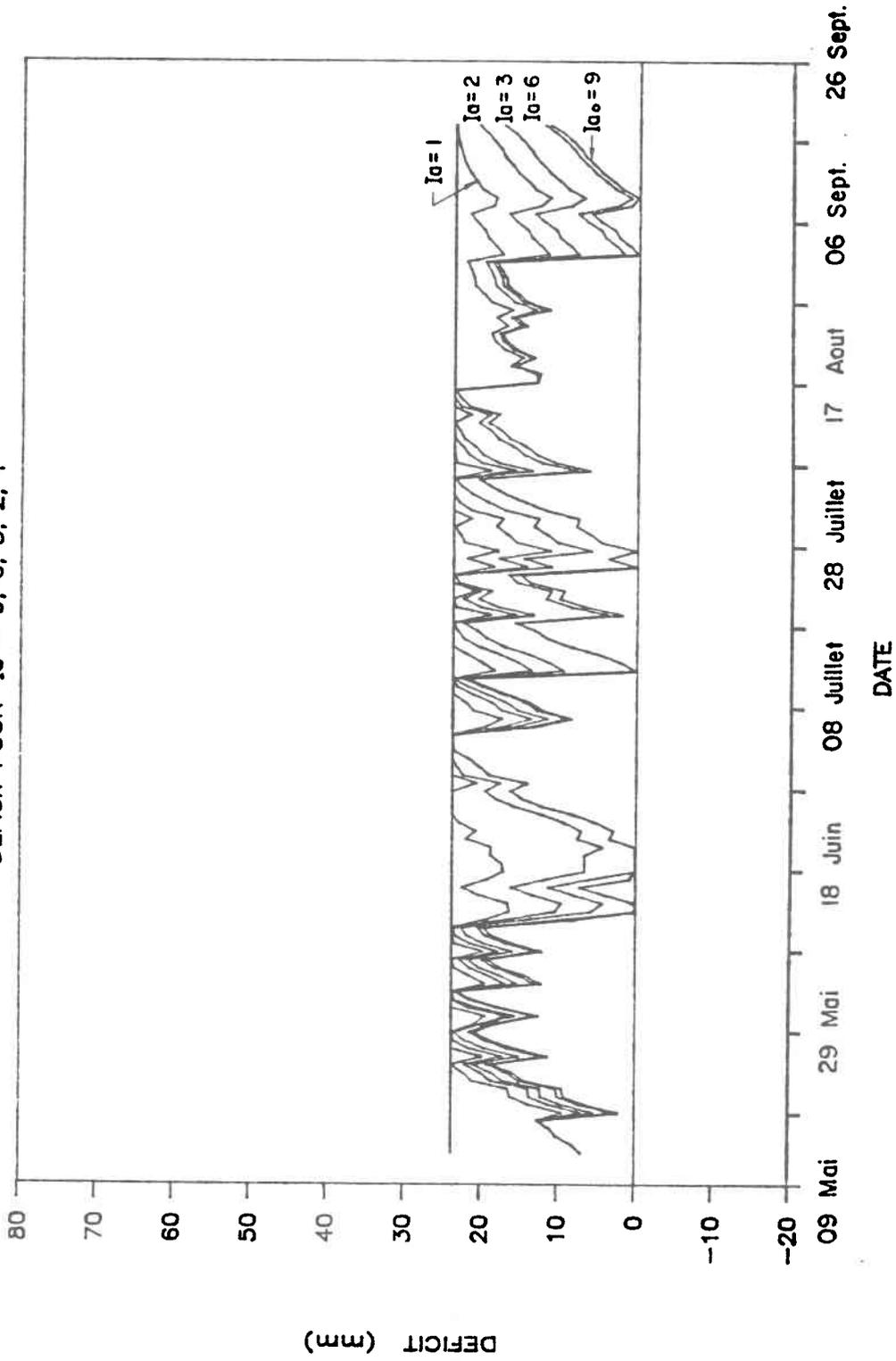


Figure F. 3 Sensibilité du modèle à l'indice d'abstraction initiale (I_0) pour le site GOSF1 en 1985.

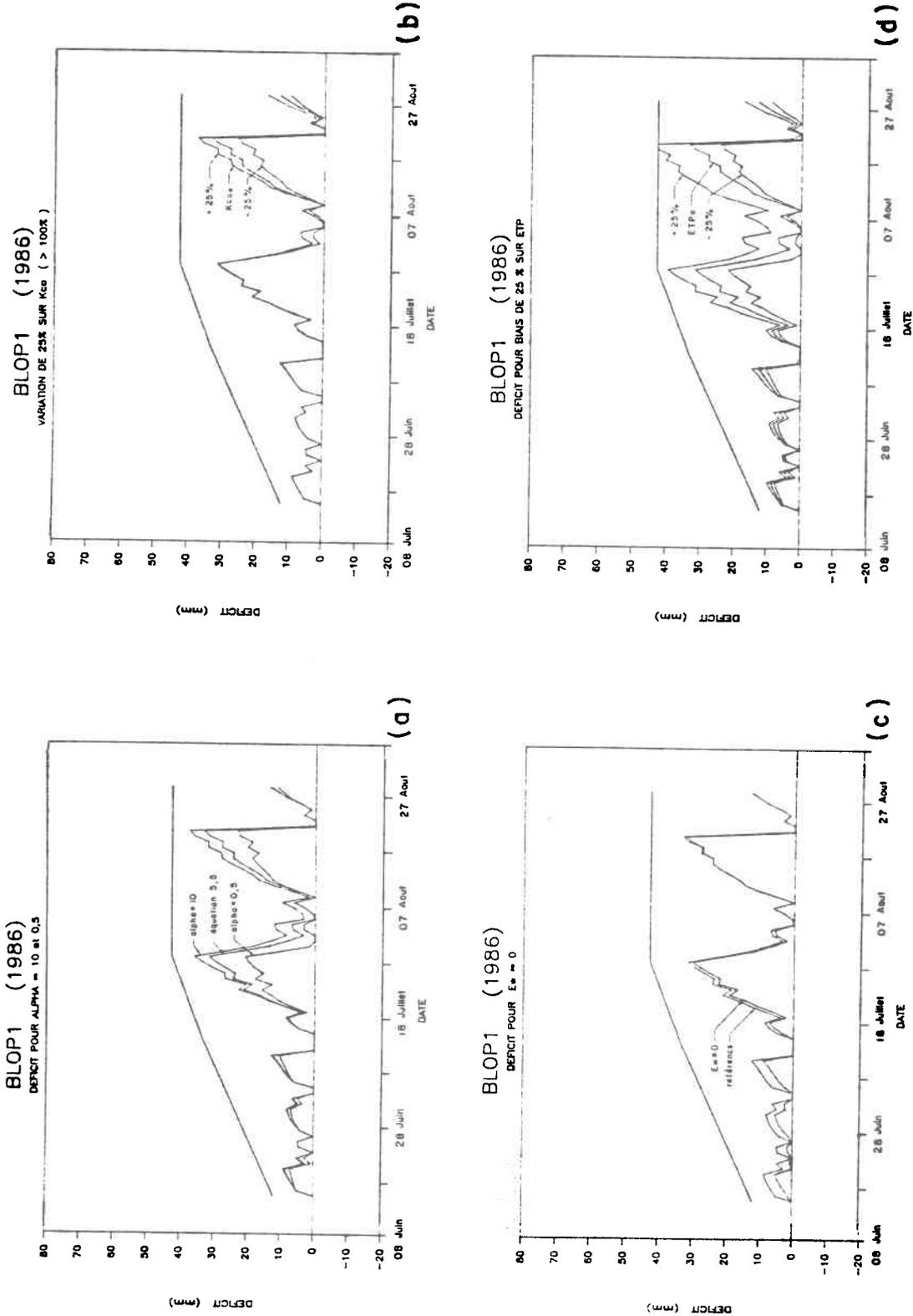


Figure F.4 Sensibilité du modèle aux paramètres entrant dans le calcul de l'évapotranspiration réelle pour le site BLOP1 en 1986.

De Jong et Tugwood (1987), suite à la comparaison de six modèles servant au calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP), mentionnent que l'évapotranspiration réelle dans un modèle de bilan hydrique est contrôlée davantage par les conditions de sol et de culture imposées que par l'ETP. Nous tenterons de vérifier ce point.

A la figure F.4a, nous montrons l'effet du choix de valeurs de alpha extrêmes (10 pour un sable et 0,5 pour une argile) pour le calcul du coefficient d'assèchement du sol (équation 6.2) comparé aux résultats obtenus à l'aide de l'équation 3.5 (simulations de départ). Comme la classe texturale de la plupart des sols cultivés en pommes de terre et en fraises varie de loam sableux à loam argileux ($\alpha=6$ à 2, figure 6.9), le biais entraîné par le coefficient d'assèchement pourra être maintenu à un niveau acceptable. La figure F.4b illustre la sensibilité du modèle à une variation de 25% du coefficient cultural de base (K_{co}) après la date de couverture totale du feuillage. On observe que l'ETR trop élevée en fin de saison pour les pommes de terre pourrait provenir d'une surestimation de ce paramètre. Le troisième coefficient entrant dans le calcul de l'ETR (EW) tient compte du surplus d'évapotranspiration après une pluie. Nous comparons à la figure F.4c les déficits calculés en tenant compte de ce coefficient (référence) et en négligeant ce dernier. On observe que son effet est plus marqué en début de saison où le pourcentage de recouvrement du sol par la culture de la pomme de terre est faible, cet effet devenant négligeable en fin de saison.

Pour la culture de la fraise (site GOSF1, 1985), on observe à la figure F.5b qu'une diminution de 25% du coefficient cultural de base (K_{co}) pourrait permettre d'améliorer l'estimation de l'ETR qui est trop élevée tout au cours de la saison. Le choix d'une valeur de alpha correspondant à un loam ou un loam argileux pour le calcul du coefficient d'assèchement entraînera également une réduction de l'ETR par rapport à la simulation de référence (figure F.5a). On observe également que le coefficient EW a une influence non négligeable au cours de toute la saison et davantage en fin de saison (figure F.5c). L'algorithme servant au calcul de EW a été calibré en Idaho pour la culture du

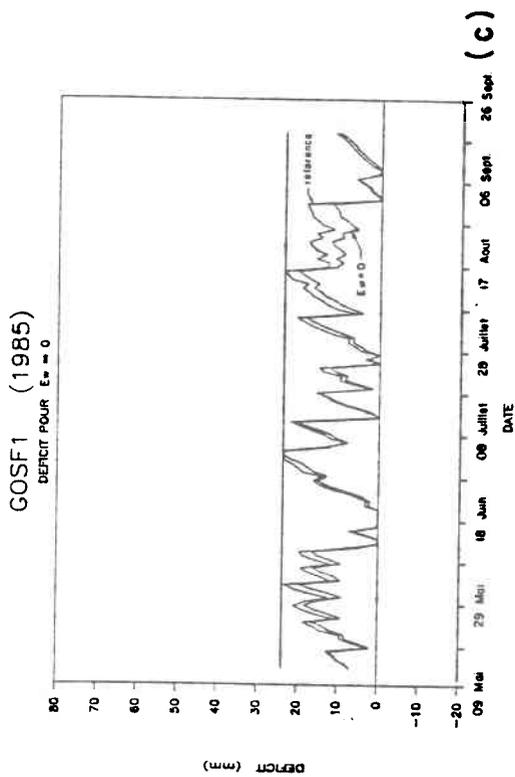
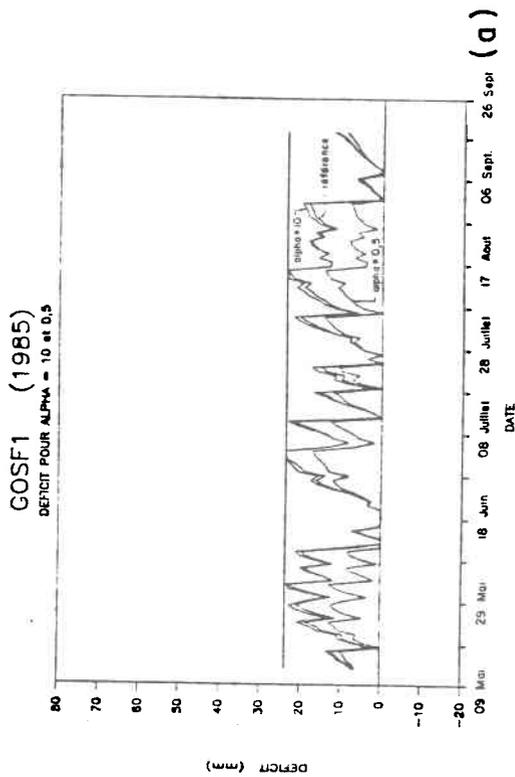
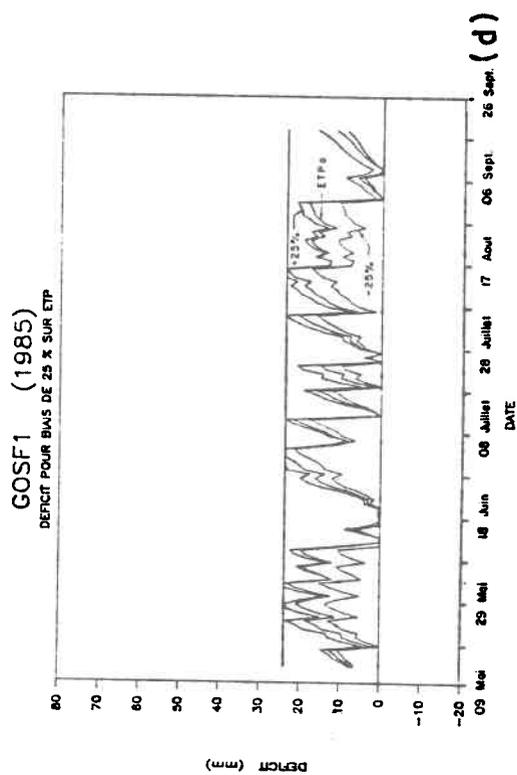
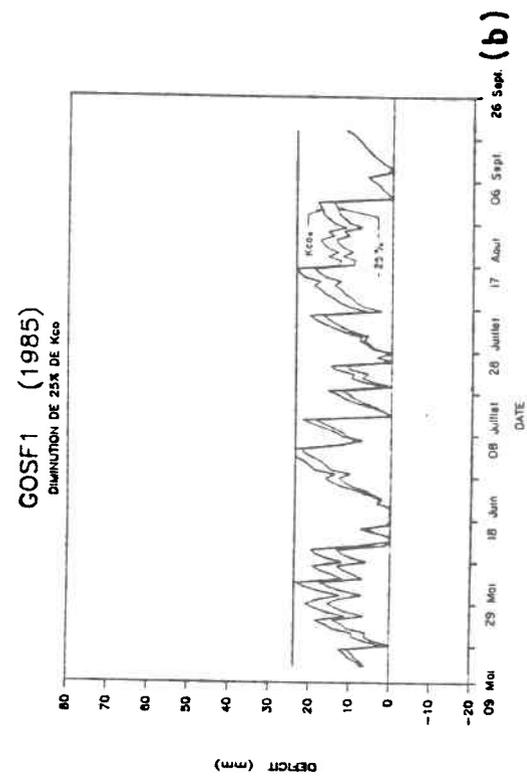


Figure F.5 Sensibilité du modèle aux paramètres entrant dans le calcul de l'évapotranspiration réelle pour le site GOSF1 en 1985.

maïs. Or cet algorithme est intimement relié à l'évolution du coefficient K_{co} . Il peut donc être justifié de l'utiliser au Québec pour la culture de la pomme de terre à cause de la ressemblance pour ces deux cultures de l'évolution du coefficient K_{co} au cours d'une saison (figure 2.7). Pour la culture de la fraise, par contre, son utilisation est douteuse à cause de l'évolution différente du coefficient K_{co} au cours d'une saison de culture. De plus, pour les sites étudiés, la présence d'un paillis entre les rangs de fraises va contribuer à réduire l'évapotranspiration. Donc, l'élimination du terme E_w pour la culture de la fraise entraînera une réduction de l'ETR par rapport à la simulation de référence, et cette réduction sera plus prononcée en fin de saison.

Les figures F.4d et F.5d montrent pour les sites BLOP1 (1986) et GOSF1 (1985) respectivement l'effet d'un biais systématique de 25% de l'ETP sur le déficit calculé (mm). On observe qu'un biais de 25% sur l'ETP influence davantage le déficit calculé qu'un biais de 25% sur le coefficient cultural de base (K_{co}). Il convient donc d'identifier les termes de la formule de Penman susceptibles d'introduire un biais dans le calcul de l'ETP et d'examiner le sens et l'importance de ce biais.

Plusieurs auteurs ont étudié la sensibilité de l'équation de Penman pour le calcul de l'évapotranspiration journalière pour différentes régions du monde (McCuen, 1973; Saxton, 1975; Camillo et Gurney, 1984; Merva et Fernandez, 1985). La plupart font ressortir la forte sensibilité de l'équation de Penman au rayonnement net. Ainsi, pour la région de Michigan (région centrale du Nord des États-Unis), Merva et Fernandez (1985) trouvent, pour une variation de 20% des différents paramètres de l'équation de Penman, les variations de l'ETP calculé (ou sensibilité relative) suivantes; 30% (1,5) pour le rayonnement solaire, 11,5% (0,58) pour le pourcentage d'ensoleillement, 9% (0,45) pour la température maximum journalière, -8% (-0,40) pour l'albédo, 2,5% (0,13) pour la vitesse du vent et 2,3% (0,12) pour la température au point de rosée.

Pour le mois de juin 1986 à Québec, on observe que parmi les variables présentées au tableau F.1, l'équation de Penman est plus sensible à l'humidité relative. Par contre, nous ne disposons pas de mesures permettant d'évaluer l'erreur commise en utilisant l'humidité relative de l'air à l'aéroport de Québec pour représenter celle rencontrée sur les sites étudiés. De plus, la faible sensibilité obtenue par les auteurs précédents pour la température au point de rosée montre qu'il pourrait y avoir un intérêt à utiliser cette mesure plutôt que l'humidité relative pour le calcul de l'ETP. On observe de plus que pour les données de l'aéroport de Québec, la sensibilité de l'albédo est la moitié de celle de l'exemple précédent tandis que la sensibilité de la vitesse du vent est deux fois plus importante. A Québec, pour le mois de juin, le terme d'advection dans la formule de Penman contribue pour 38% de l'ETP en moyenne avec la fonction de vitesse du vent utilisée dans le modèle de Penel (1984) contre 33% de l'ETP lorsqu'on utilise la fonction citée dans le rapport de Penel (1984). L'utilisation de la première fonction conduit à des valeurs d'ETP 8% plus élevées que la seconde. Dans l'exemple précédent, le terme advectif contribuait pour 30% de l'ETP totale. Il est bon de noter que le rayonnement net de courte longueur d'onde contribue pour environ 75% du bilan énergétique pour Québec. Il est donc important de l'évaluer avec une précision adéquate. On observe au tableau F.1 que le coefficient b servant au calcul du rayonnement de courte longueur d'onde possède une sensibilité relative plus élevée que le coefficient a .

En combinant les effets des vitesses du vent et des températures sous-estimées d'environ 10% pour le site BLOP1 en juin 1986 (qui tendent à sous-estimer l'ETP) et les effets 1° du rayonnement aux confins de l'atmosphère de 3 à 4% trop élevé, 2° de l'albédo trop faible en fin de saison et 3° de la fonction de vitesse du vent élevée (qui tendent à surestimer l'ETP), on devrait s'attendre à un biais sur le calcul de l'ETP inférieur à 10% qui pourra être corrigé en bonne partie au niveau de l'ETR en ajustant les coefficients cultureaux.

Tableau F.1 Sensibilité relative* de l'équation de Penman à ses paramètres pour juin 1986 pour l'aéroport de Québec.

Paramètre	Perturbation (%)	Sensibilité relative
albédo	+30	-0,26
	-30	-0,26
température moyenne de l'air	+30	0,33
	-30	0,37
humidité relative moyenne de l'air	+30	-0,53
	-30	-0,53
vitesse du vent	+50	0,26
	-50	0,30
durée d'ensoleillement	+25	0,32
	-25	0,32
a	+30	0,20
b	-20	0,35
(1-a")	+30	-0,37
	-10	-0,40
b"	+130	0,11
c	+20	-0,35
	-20	-0,35
d	+72	0,10
	-100	0,10

* : Sensibilité relative telle que définie par l'équation F.1 .

Donc, nous allons conserver le mode de calcul actuel de l'ETP en assumant qu'elle est évaluée avec une précision suffisante pour les besoins de gestion de l'irrigation. Une courbe de coefficient d'assèchement différente sera choisie pour chaque type de sol. De plus, le terme E_w sera conservé pour la culture de la pomme de terre et non pour celle de la fraise. Les paramètres à ajuster seront les coefficients culturaux K_{co} et l'indice I_a contrôlant le ruissellement. Les coefficients culturaux seront d'abord ajustés pour bien représenter l'ETP pour l'ensemble des sites en multipliant les coefficients A, B, C et D par une même constante. Ainsi, la forme de la courbe des coefficients K_{co} sera conservée. Le paramètre I_a sera ajusté en dernier et ne devra pas provoquer de ruissellement excessif en particulier pour les sols étant soit sableux ou avec une faible pente. Comme l'évaluation de la teneur en eau à la capacité au champ est entachée d'une erreur importante et que les valeurs des déficits mesurés qui servent à la calibration sont plus sensibles à cette propriété du sol que les valeurs calculées par le modèle, nous allons dans certains cas ajuster ce paramètre de façon à centrer les déficits mesurés.

F.2 Ajustement des paramètres du modèle

Les paramètres K_{co} et I_a devraient être ajustés de façon à minimiser la distance entre les valeurs moyennes de déficit mesuré et les déficits simulés par le modèle. On veut donc que les critères NTD (mm) et S (écart-type) présentés à la section 6.1 tendent respectivement vers un et zéro. On cherchera de plus à avoir un biais acceptable ($MOY \rightarrow 0$) entre les valeurs mesurées et calculées en ajustant la teneur en eau à la capacité au champ lorsque nécessaire.

Notons que l'ajustement des paramètres sera effectué par essais successifs à cause de la difficulté à coupler le modèle dans sa forme actuelle à un sous-programme d'optimisation automatique. Ainsi, les résultats obtenus pourront être améliorés ultérieurement en adaptant le modèle à un optimisateur automatique. Cependant, il faut tenir compte de la forte variabilité des déficits mesurés dans le choix de la précision acceptable. Ainsi, un écart-type élevé entre les valeurs calculées et mesurées devra être accepté pour les sites où

l'erreur sur les mesures de déficit est plus élevée.

Dans un premier temps, une série de simulations a été réalisée en utilisant des valeurs de alpha correspondant aux types de sols de chaque site pour le calcul du coefficient d'assèchement (figure 6.9). De plus, le terme de surplus d'évapotranspiration suite à une pluie n'a pas été considéré pour les sites cultivés en fraises. La teneur en eau la plus élevée observée en 1985 pour le site PREF2 a été choisie pour représenter la capacité au champ. Finalement, des valeurs de teneurs en eau à la capacité au champ plus faibles ont été choisies pour les sites BUIP1 et 2, et NDPP1 et 2, de façon à centrer les valeurs mesurées par rapport aux valeurs calculées par le modèle. Les résultats obtenus sont présentés au tableau F.2.

Suite aux modifications précédentes, on peut noter une amélioration importante des simulations par rapport aux résultats présentés au tableau 6.2 pour les sites cultivés en fraises tandis que pour les sites cultivés en pommes de terre l'amélioration est moins notable.

L'évapotranspiration réelle semblait d'une part trop élevée en fin de saison pour la culture de la pomme de terre et d'autre part trop élevée pour la culture de la fraise tout au long de l'été et de façon moins marquée en fin de saison. Ainsi, une autre série de simulations a été réalisée pour tous les sites en utilisant pour la culture de la pomme de terre un coefficient cultural (K_{co}) 25% plus faible après la date de couverture totale et une valeur maximale de 1,1 (au lieu de 1,2 utilisée précédemment). Pour la culture de la fraise, une valeur constante de 0,5 a été utilisée pour toute la saison. On observe au tableau F.3 une amélioration significative des simulations pour l'ensemble de sites localisés à l'Ile d'Orléans et ceci pour les deux cultures considérées. Pour les sites localisés à Baie-Comeau et à Notre-Dame-de-la-Paix, l'amélioration est moins significative. Par contre, l'évaluation de l'évapotranspiration réelle pour l'ensemble des sites est en moyenne assez bonne et sera considérée acceptable pour les besoins de la présente étude.

Tableau F.2 Résultats des simulations (essai 2)

SITE	(mm)	NTD (%RU)	MOY (mm)	DIFMOY (mm)	S (mm)	Ia (mm)	CC* (%B.S.)
BUIP1 (85)	0,57	0,45	3,3	4,7	4,7	14	21,0
BUIP2	-4,06	-5,08	0,49	6,8	8,8	8	27,7
BUIP1 (86)	0,66	0,30	0,39	3,6	4,3	14	21,0
BUIP2	-1,35	-5,25	-5,2	8,2	7,6	8	27,7
NDPP1 (85)	0,71	0,42	1,1	4,8	6,3	13	15,2
NDPP2	0,37	0,10	5,0	7,3	8,6	13	15,9
NDPP1 (86)	0,76	0,67	-4,7	5,4	4,5	13	15,2
NDPP2	0,32	0,04	-9,6	9,6	5,2	13	15,9
BLOP1 (85)	0,14	-1,86	0,2	5,1	6,1	12	--
BLOP2	-3,97	-7,32	6,4	8,1	7,4	13	--
BLOP1 (86)	-0,89	-0,59	2,9	5,8	7,8	12	--
BLOP2	-1,25	-0,92	3,3	5,9	7,5	13	--
PREP1 (85)	-2,27	-2,32	8,9	9,0	6,1	12	--
PREP2	-2,40	-2,51	10,3	10,6	6,9	14	--
PREF1 (85)	-0,43	--	1,4	5,0	6,4	10	--
PREF2	0,00	--	-0,2	4,0	4,8	7	17,7
GOSF1 (85)	-0,09	--	-0,2	3,4	4,2	9	--
GOSF2	-0,40	--	1,9	4,2	4,8	7	--
GOSF1 (86)	-1,18	--	3,2	4,2	4,3	9	--
GOSF2	-1,02	--	2,7	3,7	3,9	9	--

* : Teneur en eau à la capacité au champ différente de celle retenue au tableau B.4 .

Tableau F.3 Résultats des simulations (essai 3)

SITE	(mm)	NTD (%RU)	MOY (mm)	DIFMOY (mm)	S (mm)	Ia (mm)	CC* (%B.S.)
BUIP1 (85)	0,69	0,57	2,8	4,2	4,0	14	21,0
BUIP2	-1,85	-2,93	-1,0	5,3	6,5	8	27,7
BUIP1 (86)	0,58	0,20	-0,2	4,0	4,8	14	21,0
BUIP2	-1,87	-6,12	-6,2	8,9	8,0	8	27,7
NDPP1 (85)	0,73	0,45	0,6	4,7	6,2	13	15,2
NDPP2	0,41	0,14	4,5	7,2	8,5	13	15,9
NDPP1 (86)	0,64	0,54	-6,0	6,7	5,1	13	15,2
NDPP2	0,13	-0,19	-10,7	10,7	6,2	13	15,9
BLOP1 (85)	0,28	-1,52	-2,5	4,1	5,0	12	--
BLOP2	-1,70	-3,68	4,1	6,1	5,9	13	--
BLOP1 (86)	-0,06	0,02	1,2	4,8	6,1	12	--
BLOP2	-0,36	-0,25	1,7	5,1	6,2	13	--
PREP1 (85)	0,48	0,44	0,2	3,6	4,4	12	--
PREP2	0,38	0,29	1,9	4,3	5,0	14	--
PREF1 (85)	0,23	--	-0,6	3,5	4,7	10	--
PREF2	0,32	--	-1,3	3,2	3,8	7	17,7
GOSF1 (85)	-0,27	--	-2,6	3,5	3,7	9	--
GOSF2	0,09	--	0,0	3,1	4,2	7	--
GOSF1 (86)	0,04	--	1,2	2,8	3,4	9	--
GOSF2	0,11	--	0,7	2,4	3,1	9	--

* : Teneur en eau à la capacité au champ différente de celle retenue au tableau B.4 .

L'étape suivante consiste à tenter d'ajuster l'indice contrôlant d'infiltration (I_a) en tenant compte des conditions d'infiltration des champs étudiés. D'abord, l'étude de sensibilité a démontré que le modèle réagit peu à une variation des valeurs de I_a choisies, celles-ci étant situées entre 7 et 14. De plus, les valeurs de I_a choisies provoquent rarement un ruissellement lorsqu'il n'y a pas de drainage ce qui explique leur faible sensibilité. Le site BUIP2 semble rencontrer les conditions les plus propices au ruissellement parmi les sites étudiés puisque son horizon de sol en surface est constitué d'un loam et qu'une pente du terrain de 2% est observée. Tous les autres sites cultivés en pommes de terre sont constitués d'un loam sableux dont la perméabilité est plus élevée. De plus, les sites cultivés en fraises contiennent un paillis entre les billons qui limite le ruissellement. On pourrait s'attendre à ce qu'une diminution du facteur I_a (augmentation du ruissellement) améliore la simulation du modèle pour le site BUIP2 puisque cette modification tendrait à corriger le biais entre les valeurs simulées et mesurées ($MOY < 0$) en augmentant le déficit. Or, une diminution du facteur I_a a donné de moins bons résultats moyens pour les deux années que la valeur I_a de départ. Par contre, une augmentation du facteur I_a n'a pas modifié les résultats de façon significative. Ainsi, le choix des valeurs de I_a à partir du tableau 3.1 semble acceptable compte tenu du fait que nous ne disposons pas de mesures pour déterminer directement la hauteur de pluie ruissellée sur les différents sites étudiés. Des mesures à l'aide d'un simulateur de pluies seraient nécessaires pour évaluer le ruissellement de façon indépendante aux mesures de teneur en eau du sol pour les différentes cultures et les différents types de sols rencontrés.

Nous avons vu qu'une erreur sur l'évaluation de la teneur en eau à la capacité au champ a deux fois plus d'influence sur le déficit déterminé à partir des mesures du niveau d'humidité du sol obtenues sur les sites que sur le déficit calculé par le modèle. De plus, nous observons au tableau B.4 que l'imprécision sur l'évaluation de la teneur en eau à la capacité au champ peut être importante. Pour ces raisons, nous avons ajusté cette caractéristique du sol de façon à

minimiser le biais entre les déficits mesurés et calculés en supposant qu'une bonne estimation est ainsi obtenue. Les résultats de cette dernière série de simulations sont présentés au tableau F.4 et aux figures F.6 à F.10 pour tous les sites étudiés.

Pour les sites cultivés en pommes de terre au cours de deux étés successifs (BUIP1 et 2, NDPP1 et 2, et BLOP1 et 2), on observe que le biais entre les valeurs calculées par le modèle et mesurées au champ diffère d'une année à l'autre. Cette différence est plus marquée pour le site NDPP2. La localisation du site n'a pas varié au cours des deux étés successifs et les paramètres de sol, de cultures et d'infiltration n'ont pas été modifiés. Ainsi, la différence entre les deux étés peut provenir soit d'une distribution différente des précipitations ou d'un changement d'heure de prise d'échantillons ou encore d'un changement de profondeur dans la prise des échantillons. La dernière possibilité est plus probable dû au fait que l'échantillonnage a été réalisé par deux personnes différentes en 1985 et 1986. Comme le sol du site NDPP2 était plus pierreux, la profondeur d'échantillonnage a pu être plus faible en 1986 et conduire à sous-estimer la teneur en eau du sol sur la couche 0-20 cm. Nous obtenons de plus pour certains sites cultivés en pommes de terre des valeurs de NTD négatives et certains écart-types supérieurs à 6 mm. Pour le site BUIP2, on observe une surestimation du déficit en août 1985 alors qu'en 1986, le déficit calculé est à l'extérieur des intervalles de confiance pour toute la saison. De plus, pour les deux sites localisés à Baie-Comeau, le déficit calculé par le modèle au cours du mois d'août est surestimé en 1985 et sous-estimé en 1986. A Notre-Dame-de-la-Paix, les résultats des simulations sont satisfaisants pour le site 1. Pour le second site, les valeurs calculées sont systématiquement supérieures aux valeurs mesurées en 1985 et inférieures en 1986.

A l'Ile d'Orléans, les sites BLOP1 et 2 donnent des résultats acceptables pour les deux étés, les déficits calculés se situant à l'intérieur de l'intervalle de confiance à 95% des déficits mesurés et de part et d'autre de la moyenne au cours des deux étés. Une observation des simulations (figure F.8) montre qu'une pluie peut avoir

Tableau F.4 Résultats des simulations (essai 4)

SITE	(mm)	NTD (%RU)	MOY (mm)	DIFMOY (mm)	S (mm)	Ia (mm)	CC* (%B.S.)
BUIP1 (85)	0,81	0,70	1,0	3,5	3,9	14	21,5
BUIP2	-2,58	-2,75	1,3	5,1	6,7	8	27,0
BUIP1 (86)	0,53	0,10	-1,9	4,2	5,0	14	21,5
BUIP2	-1,60	-4,47	-4,0	7,7	8,0	8	27,0
NDPP1 (85)	0,63	0,34	2,8	5,2	6,2	13	14,5
NDPP2	0,05	-0,33	7,4	8,8	8,7	13	15,0
NDPP1 (86)	0,80	0,76	-2,9	4,6	5,0	13	14,5
NDPP2	0,49	0,36	-7,0	7,6	5,7	13	15,0
BLOP1 (85)	0,31	-1,35	-2,2	4,1	5,0	12	18,2
BLOP2	-0,67	-2,67	1,7	5,0	5,7	13	18,2
BLOP1 (86)	-0,13	-0,01	1,9	4,9	6,2	12	18,2
BLOP2	-0,31	-0,37	-1,8	5,3	6,2	13	18,2
PREP1 (85)	0,48	0,44	0,2	3,6	4,4	12	21,7
PREP2	0,37	0,29	0,4	4,7	5,4	14	24,2
PREF1 (85)	0,23	--	-0,6	3,5	4,7	10	23,8
PREF2	0,40	--	0,0	3,1	3,7	7	17,2
GOSF1 (85)	0,14	--	0,0	3,0	3,7	9	17,8
GOSF2	0,09	--	0,0	3,1	4,2	7	22,8
GOSF1 (86)	0,15	--	0,1	2,6	3,4	9	21,8
GOSF2	0,15	--	0,2	2,4	3,1	9	21,8

* : Teneur en eau à la capacité au champ retenue pour l'ajustement final du modèle.

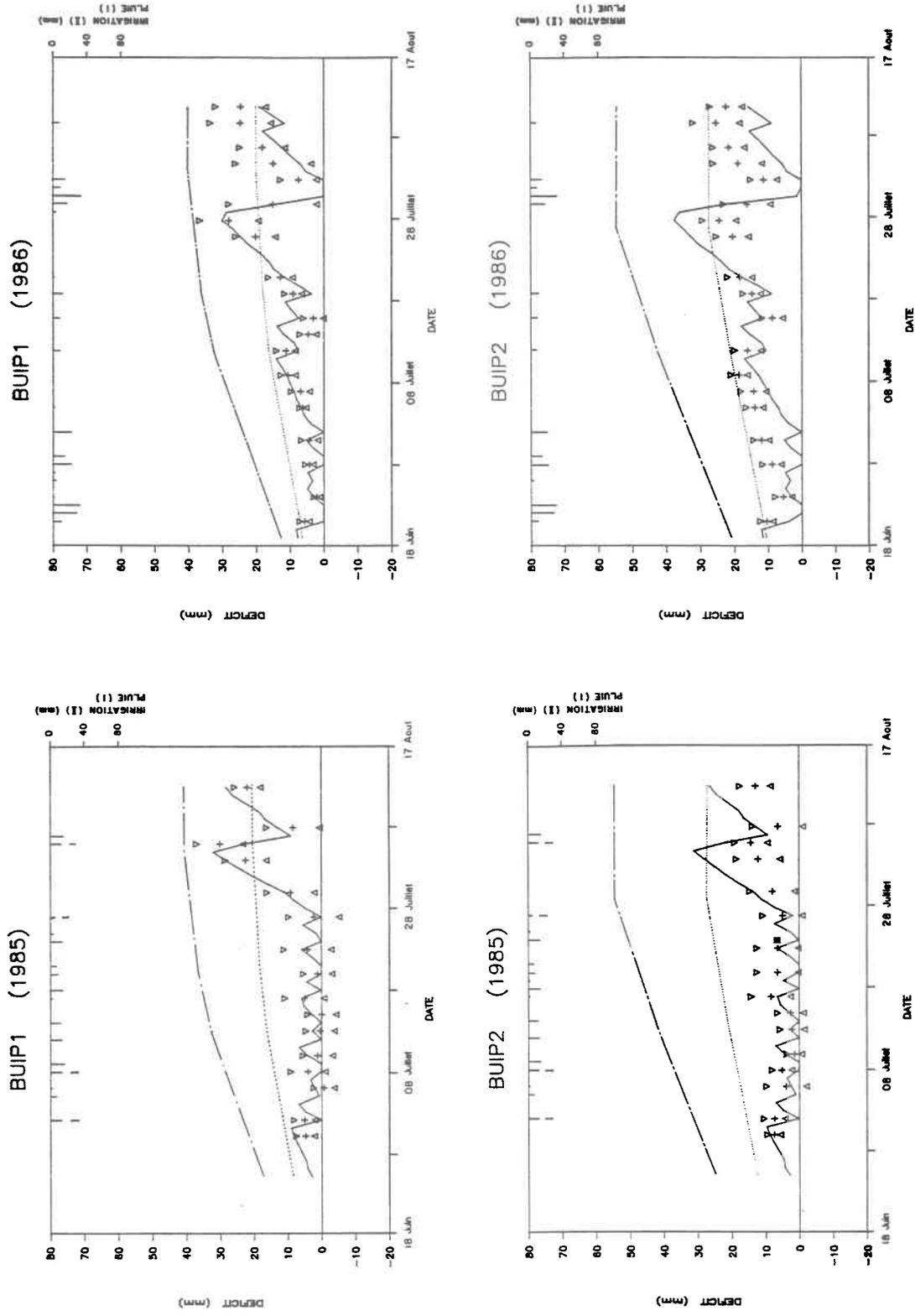


Figure F.6 Simulations après ajustement du modèle pour les sites BUIP1 et BUIP2 en 1985 et 1986. Déficit calculé (—) et mesuré (+) ; intervalle de confiance à 95% et réserve utile (--- : 100%; - - - : 50%).

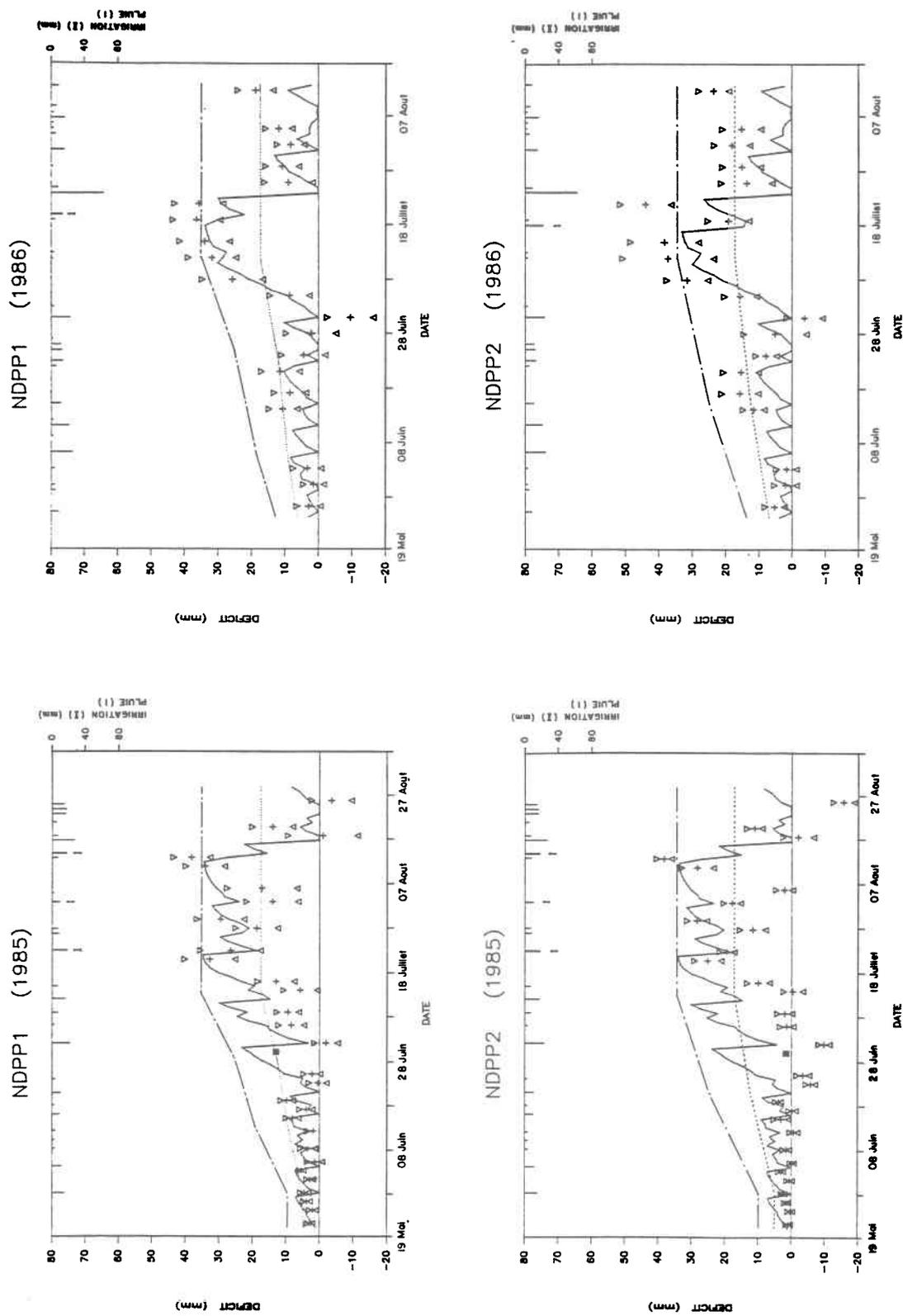


Figure F.7 Simulations après ajustement du modèle pour les sites NDPP1 et NDPP2 en 1985 et 1986. Déficit calculé (—) et mesuré (+) et intervalle de confiance à 95% et réserve utile (--- : 100%; - - - : 50%).

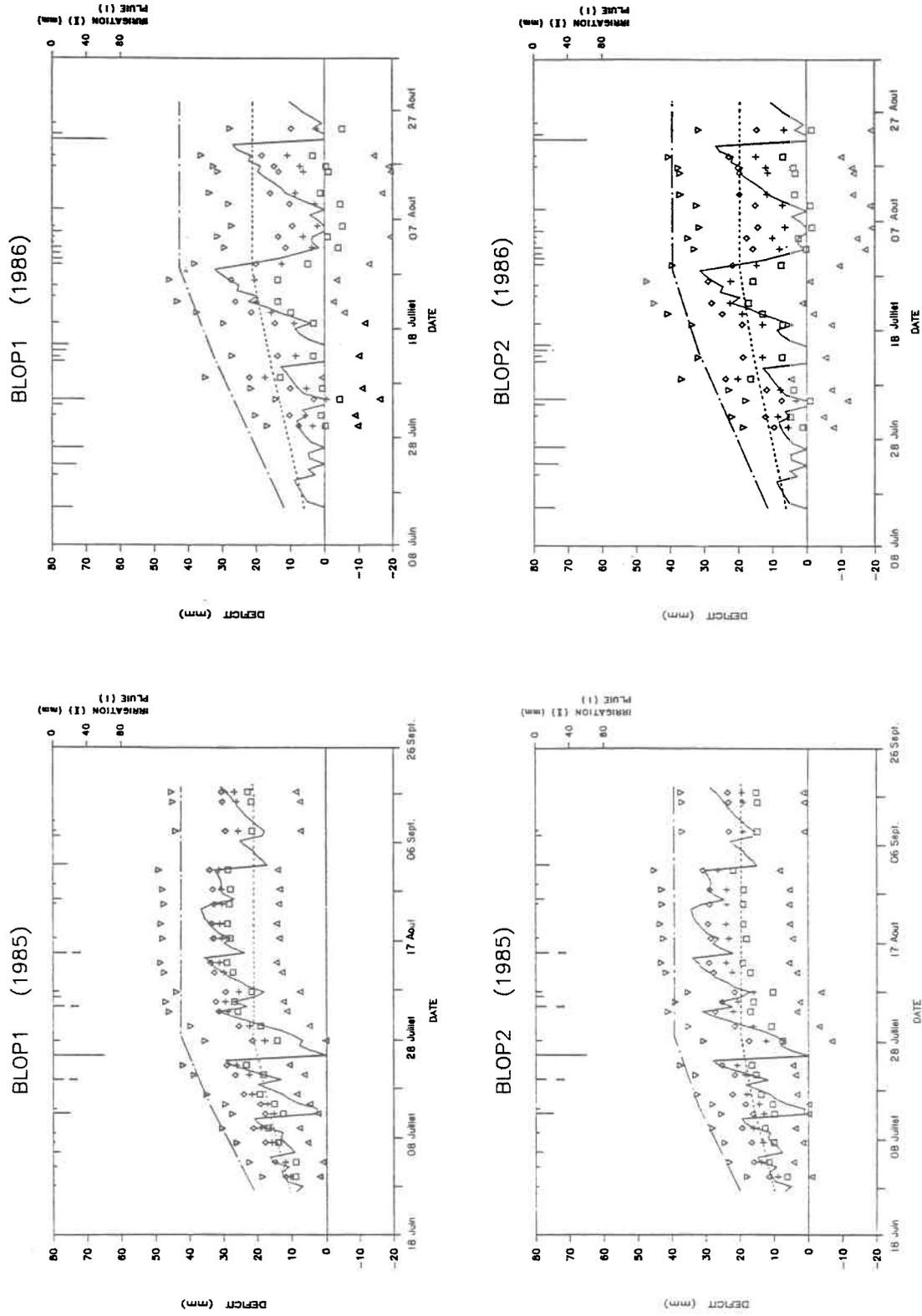


Figure F.8 Simulations après ajustement du modèle pour les sites BLOP1 et BLOP2 en 1985 et 1986. Déficit calculé (—) et mesuré (+) ; intervalle de confiance à 95% et réserve utile (--- : 100%; - - - : 50%).

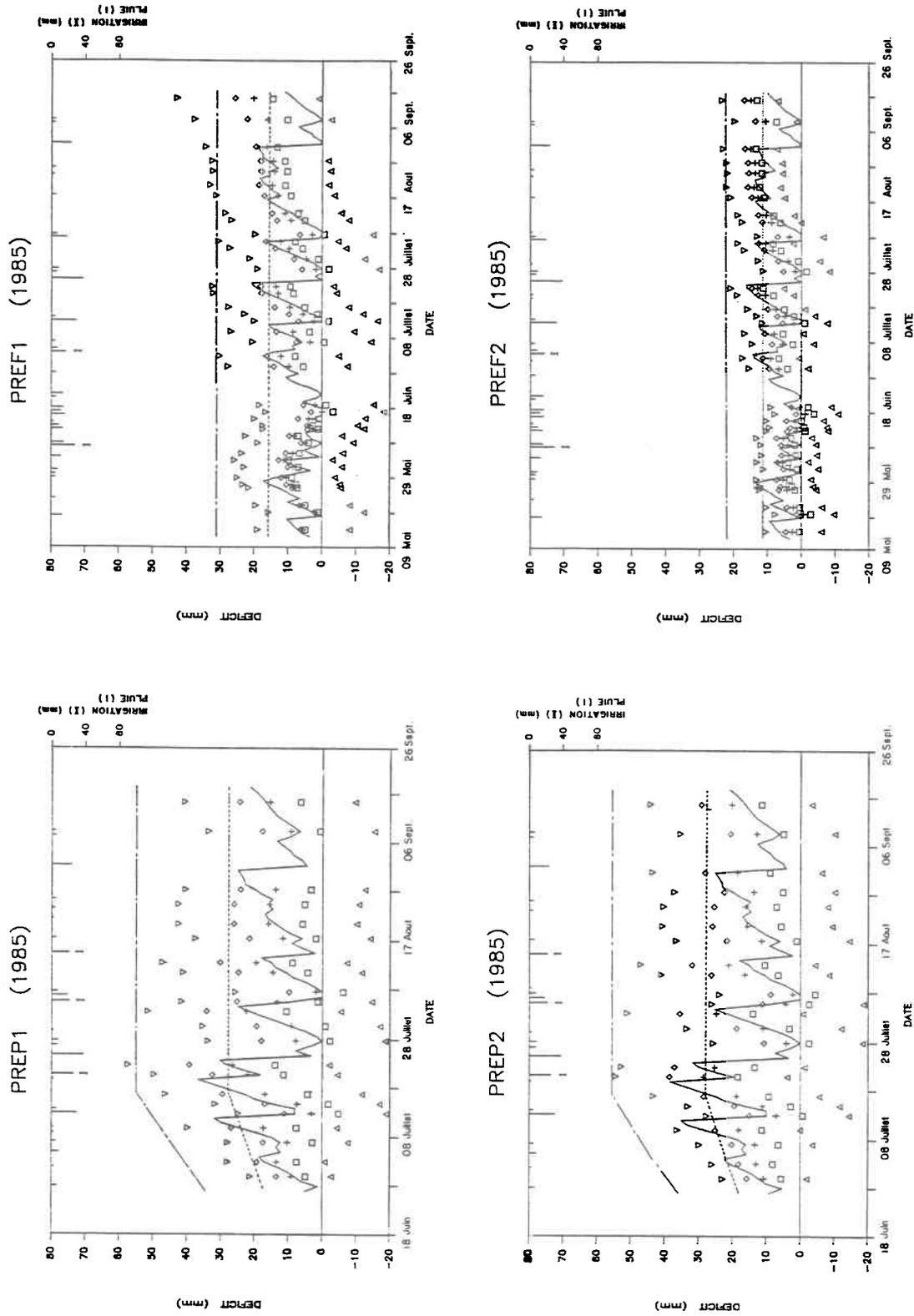


Figure F.9 Simulations après ajustement du modèle pour les sites PREP1, PREP2, PREF1 et PREF2 en 1985. Déficit calculé (—) et mesuré (+ : moyenne; Δ, ▽ : intervalle de confiance à 95%) et réserve utile (--- : 100%; - - - : 50%).

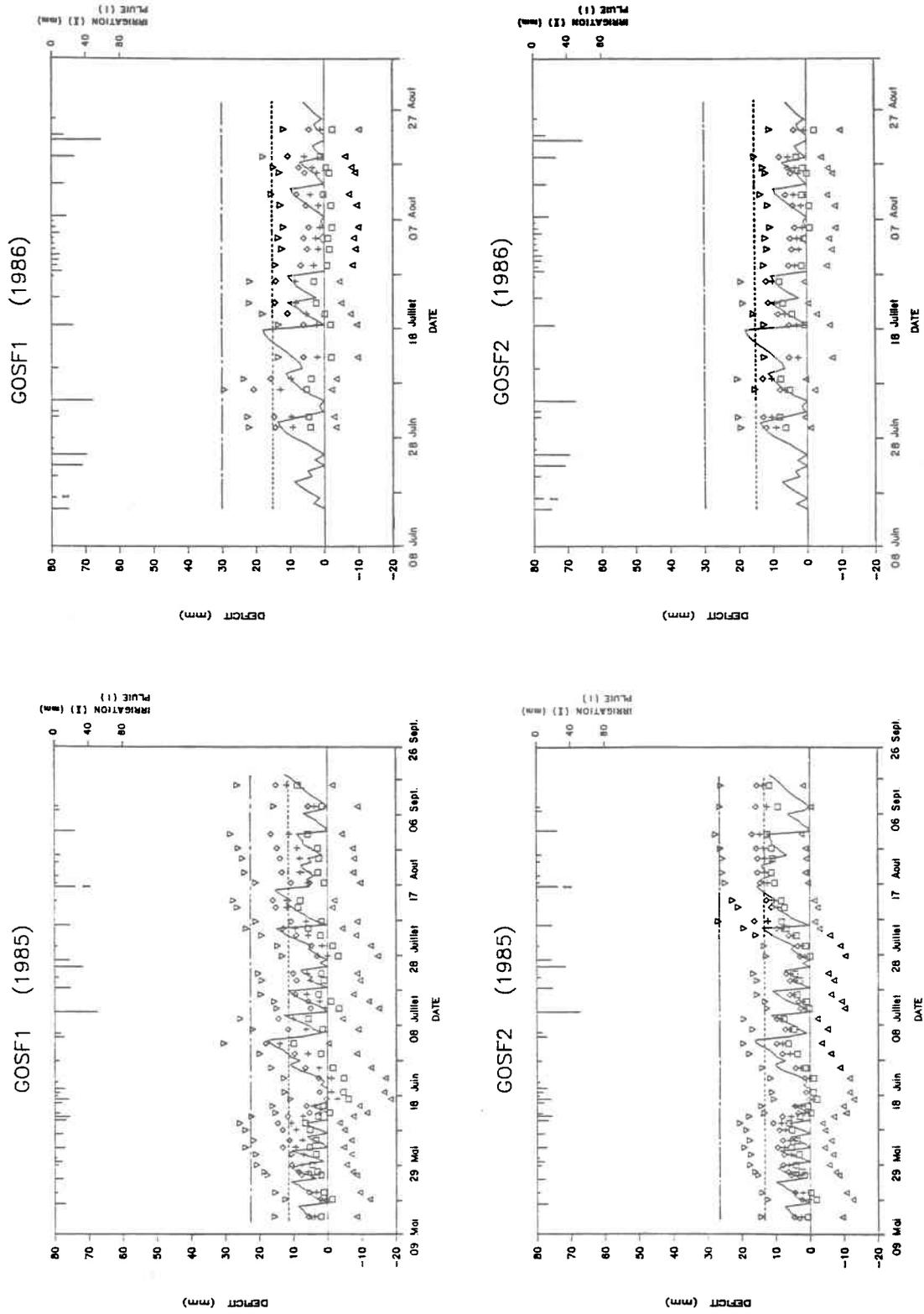


Figure F.10 Simulations après ajustement du modèle pour les sites GOSF1 et GOSF2 en 1985 et 1986. Déficit calculé (—) et mesuré (---) ; irrigation calculée (—) et mesurée (---) ; intervalle de confiance à 95% et réserve utile (---- : 100%; - - - : 50%).

été oubliée entre le 12 et le 17 août 1986 pour les sites BLOP1 et 2 puisque le déficit mesuré diminue entre ces deux dates alors que le déficit calculé augmente. Finalement, les sites PREP1 et 2 donnent de très bons résultats compte tenu de la forte variabilité des mesures de teneur en eau du sol à l'intérieur de ces deux sites.

Les simulations réalisées pour les sites cultivés en fraises donnent de très bons résultats pour toute la saison de culture dans tous les cas. L'écart-type entre les déficits en eau calculés et mesurés est faible et les déficits calculés se maintiennent à l'intérieur des intervalles de confiance et de part et d'autres des déficits moyens mesurés. Seuls les déficits calculés après le 6 septembre semblent sous-estimés. Notons que la valeur de teneur en eau à la capacité au champ choisie pour le site PREF2 n'est pas caractéristique d'un loam argileux, mais elle donne de bons résultats et correspond à la teneur en eau la plus élevée observée au cours de l'été 1985 sur cette parcelle.