HAL open science

Comportements physiques et aptitudes à la mise en culture des sols des marais de l'Ouest.

Yves Pons

To cite this version:

Yves Pons. Comportements physiques et aptitudes à la mise en culture des sols des marais de l'Ouest.. Sciences du Vivant [q-bio]. Institut National Agronomique, 1997. Français. NNT : . tel-02839388

HAL Id: tel-02839388

https://hal.inrae.fr/tel-02839388v1

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

TH-MB3

Institut National Agronomique
PARIS-GRIGNON

Institut National de la Recherche Agronomique
Systèmes Agraires et Développement
SAINT-LAURENT-DE-LA-PREE

INRA
STATION DE SCIENCE DU SOL
22 JUIN 1998
Domaine de Saint Paul - Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9

THESE

présentée pour l'obtention du titre de

DOCTEUR

de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon
« Sciences Agronomiques »
par

Yves PONS

Ingénieur Agronome de l'Institut National Agronomique

COMPORTEMENTS PHYSIQUES ET APTITUDES A LA MISE EN CULTURE DES SOLS DES MARAIS DE L'OUEST

soutenue **le 27 octobre 1997** devant la Commission d'examen composée de :

A. CAPILLON	Professeur à l'INA-PG	Président
G. BOURRIE	Professeur à l'Université de Rennes	Rapporteur
H. MANICHON	Directeur de Recherche au CIRAD	Rapporteur
C. CHEVERRY	Professeur à l'ENSAR	Examinateur
F. PAPY	Directeur de Recherche à l'INRA	Examinateur
L. DAMOUR	Ingénieur de Recherche à l'INRA	Examinateur

AVANT-PROPOS

J'ai réalisé ce travail sur une longue période et j'ai du mobiliser une grande partie de mon énergie pour le mener à bien. J'ai eu la chance de bénéficier d'appuis dans mon travail quotidien qu'il fallait poursuivre (merci à tous d'avoir assuré ma non-présence à mi-temps !) et de l'affection de mes amis et de mon entourage familial (« Dis, papa, quand auras tu fini ta thèse ? »). Je n'ai pas pu établir une liste exhaustive de tous ceux et celles qui m'ont aidés, aussi je suis sûr d'oublier dans ces remerciements l'un ou l'autre... J'espère qu'ils ne m'en tiendront pas rigueur.

Stéphane HENIN et Gérard MONNIER ont été à l'origine du projet initial de St Laurent et en même temps mes professeurs ; Michel SEBILLOTTE et Jacques CONCARET m'ont accompagné sur le chemin des connaissances de ces milieux. Je les remercie de l'héritage qu'ils m'ont transmis.

Philippe COLLAS, Claude CHEVALLIER, Jean-Marc MEYNARD, Josette MASLES, Sylvain PELLERIN, Hubert MANICHON m'ont fait bénéficier de leurs connaissances et de leurs travaux sur les Marais de l'Ouest.

Guy MARTINEAU, Annie GACHIGNAT, Joseph GARREAU, Pierre CAMUS et Bernard FILLONNEAU, Théophile GARREAU, René NAUD, Roland PORCHE ont avec efficacité réalisé la mise en place, le suivi des essais et la mise au point des tests. Ils ont produit des données originales.

Claude CHATAIGNER, Jean Michel HILLAIREAU et Bernard LESAGE ont de plus exploité les données et ont pris plus particulièrement en charge une partie de mon travail quotidien. Ils ont assuré avec sérieux la plupart des relations et réunions avec les techniciens et les agriculteurs.

Alain CAPILLON et Claude CHEVERRY m'ont aidé à la conception et à l'élaboration du projet. Ils ont donné *beaucoup* de leur temps pour être des interlocuteurs puis les lecteurs patients des divers états de rédaction dans un esprit exigeant, attentif et délicat. Ils m'ont amicalement soutenu au quotidien.

Ghislain BOURRIE et Hubert MANICHON ont accepté d'être rapporteurs. Ils m'ont amené, par leurs critiques et remarques, à clarifier et affiner le raisonnement et la construction de ma rédaction. François PAPY m'a encouragé et m'a autorisé à dégager du temps pour achever ce travail.

Léon DAMOUR a été l'accompagnateur permanent de ce projet. Je n'ai fait que démontrer, prouver, valider ses préconisations dans la mise en valeur des Marais de l'Ouest à partir du réseau « Exploitations de Références » qu'il a suscité et animé.

Les agriculteurs se reconnaîtront peut être dans ce document à partir de l'identification des parcelles qu'ils ont mis à notre disposition. Ils ont tous accepté les contraintes de nos interventions. Avec leurs techniciens, j'espère qu'ils trouveront dans ce travail des éléments pour promouvoir un nouveau développement rural ouvert aux attentes de la société.

Annie ROSSARD, Germaine GARREAU, ont assuré la mise en forme et la reprographie du document et Nicole DOIRAT le secrétariat.

Patrick STEYAERT, Claude CHEVALLIER, Eric KERNEIS et beaucoup de collègues ont accepté d'être les premiers auditeurs d'un oral balbutiant. Ils m'ont aidé à construire un propos clair pour cette épreuve finale.

A toutes et à tous, un grand merci. Ce travail n'aurait pu voir le jour sans votre contribution.

SOMMAIRE

Partie I. INTRODUCTION.

Chapitre 1. Cadre, conditions et démarche générale de la recherche. 1

Chapitre 2. De la question régionale à la question scientifique. 4

Chapitre 3. La problématique scientifique et le dispositif général de recherche. 12

Partie II. LES SOLS DES MARAIS DE L'OUEST : CARACTERISTIQUES ET STABILITE STRUCTURALE.

Chapitre 1. Caractéristiques et classification pédologique. 23

Chapitre 2. Mise au point d'un test de stabilité structurale. L'Indice de Dispersion. 26

Chapitre 3.Typologie de familles de sols définies par leur Indice de Dispersion. 32

Chapitre 4. Etude quantitative. Les facteurs de la dispersion et les relations entre l'Indice de Dispersion et les autres mesures de la stabilité structurale (Is et K). 45

Conclusion sur les caractéristiques et la stabilité structure des sols dans les Marais de l'Ouest 49

Partie III. COMPORTEMENT PHYSIQUE AU CHAMP.

Partie III-A. Le comportement hydraulique et la profondeur d'enracinement du blé.

Chapitre 1. Types de profils de sol, comportement hydraulique et enracinement du blé. 52

Chapitre 2. Cas particulier de comportement lorsque l'hiver est peu humide. 63

Partie III-B. Le comportement de la couche travaillée.

Chapitre 3. Effet de la stabilité structurale et des modalités de travail du sol sur le comportement de la couche travaillée. 70

Partie III-C. Le comportement physique du profil.

Chapitre 4. Synthèse et conclusion. 87

Partie IV. EFFET DE LA QUALITE DES SOLS SUR LE COMPORTEMENT DU BLE.

Effet de la qualité des sols sur le comportement du blé. 92

Synthèse des parties III et IV. Validation de la classification des sols à partir du comportement au champ. 106

Partie V. CONCLUSION

Conclusion 109

BIBLIOGRAPHIE 121

Partie I

Introduction

Chapitre 1. Cadre, conditions et démarche générale de la recherche.

Les circonstances.

Cette thèse est l'aboutissement de travaux de recherche sur la mise en valeur des Marais de l'Ouest. Ces travaux, initiés au début des années 1960 (Hénin et al., 1963), ont été menés à partir de 1964 par le Domaine Expérimental de St Laurent de la Prée (INRA-SEI St Laurent de la Prée, 1969) et, en ce qui me concerne, à partir de 1979.

Ceux présentés ici se sont déroulés sur une période d'une quinzaine d'années. Pendant ce délai, nous avons acquis une expérience (personnelle et collective) pour * dégager les questions essentielles (diagnostic), * établir des références techniques et enfin * diffuser des préconisations aux organismes de développement et d'aménagement agricole de la région. La thèse, projetée en 1992, s'explique par la volonté d'une part * de faire connaître et de valoriser scientifiquement les travaux réalisés (usage externe) et d'autre part * de faire progresser la problématique scientifique pour les recherches à venir dans les Marais de l'Ouest (usage interne).

Ainsi, les circonstances ont fait que la démarche de recherche n'a pas d'abord été conçue pour réaliser une thèse mais pour acquérir des références. De plus, présenter des résultats obtenus pendant une longue période a l'inconvénient de rendre compte de méthodes et de conclusions qui peuvent manquer de nouveauté par rapport aux connaissances scientifiques actuelles.

Les thèmes de recherche et leur genèse.

Les thèmes de recherche ont été déterminés à partir d'une demande de l'agriculture régionale. Dans un premier diagnostic régional, Hénin et al. (1963) pronostiquent le non fonctionnement du drainage pour deux raisons essentielles : l'excès d'eau était dû à la fois à une gestion trop haute du plan d'eau et à un drainage interne faible à nul des parcelles dans les marais argileux compte tenu de la très faible stabilité structurale. De plus le travail du sol présente de réelles difficultés dans les sols argileux. Aussi, l'étape initiale (1964 - 1967) a

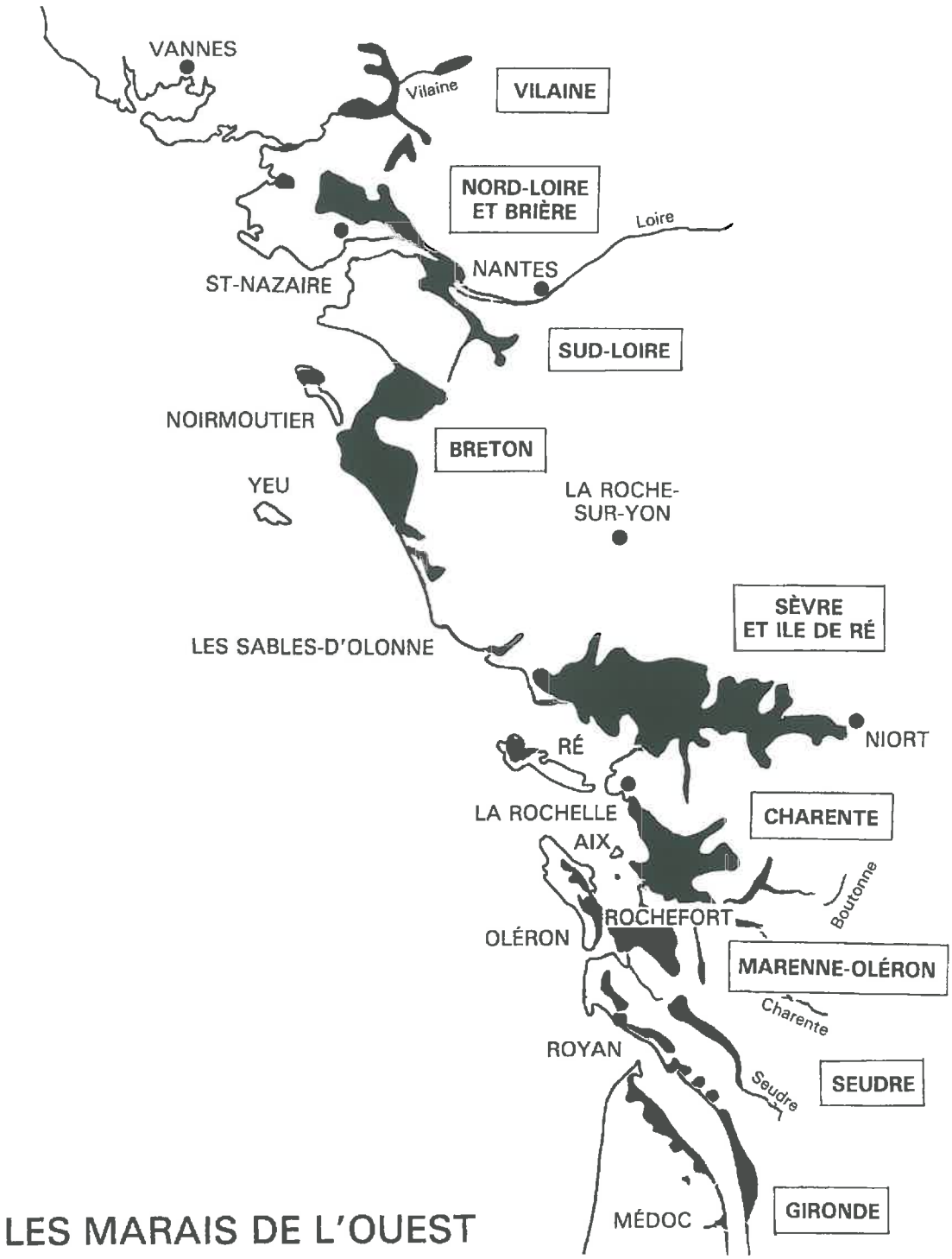


Figure I-1. Les Marais de l'Ouest

voulu confirmer la vocation herbagère du marais en appliquant les techniques de « la révolution fourragère ». Mais le contexte économique très favorable aux cultures rend l'option de mise en culture envisageable (1967). Les tentatives éparses de mise en culture ont donné des résultats technico-économiques très aléatoires notamment lorsque la stabilité structurale du sol était insuffisante.

Dans ce contexte, est-il possible d'intensifier les productions fourragères, d'accroître les surfaces en culture dans les terres de marais ? Quels sont les moyens techniques à mettre en oeuvre ? Quelles sont les conditions d'adoption de ces techniques pour les exploitations agricoles du marais (faisabilité, rentabilité) ? Quelles sont les conséquences sur les risques de pollution pour les activités aval et plus généralement sur l'environnement ?

En bref : comment évaluer les sols en vue de leur mise en valeur agricole[1] et en même temps peut - on rendre compte, par une stratification pertinente du milieu, des risques de pollution et des conséquences pour l'environnement ?

Les travaux présentés concernent l'évaluation du milieu par rapport à un objectif d'intensification : peut-on passer de la prairie naturelle à la culture ? Si oui, comment conduire les cultures après aménagement ? Ils abordent :

- l'évaluation de la stabilité structurale des sols par un test mettant en jeu le mécanisme de dispersion,
- l'identification des facteurs qui agissent sur la dispersion,
- les effets de la stabilité structurale des sols sur le potentiel de production.

Nous travaillons sur une zone représentative d'une parcelle cultivée.

Ce sujet se trouve à *l'interface de la science du sol et de l'agronomie*. Un premier point de vue est celui du chercheur en science du sol. Les phénomènes dans le sol sont ses objets d'étude. Il les caractérise, les compare, identifie les paramètres qui les distinguent. Il n'est pas obligé de considérer l'état de la plante pour justifier les différences entre sols. Un deuxième

[1] On peut définir la mise en valeur agricole comme les moyens à mettre en oeuvre (aménagements, gamme des systèmes de culture, potentiels de production) pour accroître les surfaces cultivées et augmenter la productivité des terres.

point de vue est celui de l'agronome. Le peuplement cultivé et le système de culture sont l'expression de la qualité des sols. Ce qui différencie a priori les sols sont leurs aptitudes à être un milieu favorable aux exigences des cultures (nombre de jours disponibles pour les interventions culturales, maintien de l'état structural). On juge le sol à travers les caractéristiques de l'interaction sol x peuplement. Il s'agit alors de déterminer les indicateurs pertinents de cette interaction. Le travail présenté dans cette thèse a l'ambition de partir de ces deux points de vue, puis de les croiser pour montrer leur cohérence dans le cas des marais de l'Ouest.

L'agronome qui travaille sur les *Systèmes Agraires et le Développement* juge la qualité des sols par rapport au comportement du peuplement végétal mais aussi au système que gère l'agriculteur. Il s'intéresse donc aux possibilités d'interventions techniques dans le cadre des contraintes du milieu et de celles liées au système de production.

Nous utilisons des concepts, méthodes et lois connus. Nous les appliquons à un contexte particulier, ce qui permettra de préciser leur domaine de validité. C'est plus la combinaison des concepts et méthodes qui peut être originale ici.

La *finalité de ce travail* est de faire progresser les connaissances (relations causales et modélisation) en valorisant scientifiquement les travaux réalisés et d'alimenter la problématique pour les recherches à venir. C'est aussi un moyen de justifier les outils de diagnostics et de pronostics destinés aux agriculteurs et aux agents de développement dans ce contexte particulier de recherche-action.

Tableau I-1. Caractéristiques climatiques des Marais de l'Ouest.
Exemple du poste de St Laurent de la Prée 1966-1992.

m : moyenne ; et : écart-type ; c.v % : coefficient de variation.

		JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Température moyenne (t°C)	m	5.7	6.8	8.4	10.4	13.8	16.9	19.3	19.2	17.1	13.6	9.0	6.3
	et	2.1	1.9	1.4	1.1	1.5	1.2	1.4	1.3	1.2	1.4	1.4	1.6
	c.v %	37	28	17	11	11	7	7	7	7	10	16	25
Pluies (mm)	m	80.1	67.8	58.5	58.4	61.9	46.7	39.5	46.1	68.2	79.2	88.1	85.6
	et	45.5	36.8	27.2	34.9	42.3	27.1	27.0	36.3	50.5	54.9	45.2	54.0
	c.v %	57	54	46	60	68	58	68	79	74	69	51	63
ETP Penman (mm)	m	11.3	20.4	45.7	74.3	103.8	126.6	143.4	119.2	75.5	38.5	14	7.6
	et	4.9	4.1	5.0	9.8	14.1	6.5	13.5	12.7	9.9	5.4	4.3	4.8
	c.v %	43	20	11	13	14	5	9	11	13	14	31	63
Pluies - ETP (mm)	m	69	47	13	-16	-42	-80	-104	-73	-7	41	74	78
	et	45.0	34.7	29.8	42.3	53.8	35.9	34.2	38.1	51.0	53.9	44.5	48.2
	c.v %	65	73	233	-266	-128	-45	-33	-52	-699	132	60	62
Bilan climatique umulé à/c oct (mm)	m	221	268	281	265	223	143	40	-34	-41	0	74	152

Chapitre 2. De la question régionale à la question scientifique.

1 - Contexte physique et géographique. Une zonation du milieu.

1 - 1. Caractéristiques physiques.

Entre la Vilaine au nord et la Gironde au sud, le littoral atlantique français possède des régions marécageuses qui s'étirent sur près de 300 km et se développent d'Ouest en Est (parfois sur plus de 60 km) sur d'anciens golfes marins et le long des fleuves et rivières côtières. Elles couvrent 250 000 ha environ et sont réunies sous la dénomination commune de "Marais de l'Ouest" (Figure I-1). Ceux-ci comprennent du nord au sud plusieurs secteurs géographiques traversés par des fleuves et rivières. Ce sont les marais de Vilaine au nord de la Loire (10 000 ha), le marais Breton au sud de la Loire (45 000 ha), le marais Poitevin (120 000 ha), le marais de Rochefort et les marais de Gironde (60 000 ha).

Ces marais sont le résultat du comblement progressif et récent d'anciens golfes marins par un matériau argileux connu localement sous le nom de « bri ». Ce matériau a la particularité d'être gonflant et très imperméable lorsqu'il est humide.

L'absence de pente dans les marais, une altitude voisine des niveaux atteints par les plus fortes marées, le passage obligatoire des eaux continentales à travers les zones de marais imposent des ouvrages de protection contre les eaux. La maîtrise des eaux nécessite la création et l'entretien périodique de digues, fossés et canaux d'évacuation, enfin la manoeuvre régulière des portes et écluses (Dupuis et al., 1965).

1 - 2. Les caractéristiques climatiques (Tableau I-1).

Le climat est de type océanique, particulièrement doux : la température moyenne annuelle est de 12.2 °C et la moyenne mensuelle ne descend jamais au dessous de 5.7 °C. La pluviométrie par an est de l'ordre de 750 à 800 mm. Le maximum se trouve en fin d'automne et en hiver (d'octobre à janvier = 333 mm). L'hiver est doux (6.4°C) et les 2/3 des

Tableau I-2. Les différents types de marais et leur mode d'utilisation traditionnelle d'après Capillon et Damour (1982)

Apellation vernaculaire	*Situation hydraulique*	*Mode d'utilisation traditionnelle dominant*
Mizottes	Submersion périodique par l'eau de mer	Prés salés ; fauche annuelle de foin.
Prises	Assainissement correct. Drainage moyen	Prairies semées Cultures d'automne, céréales féveroles.
Marais desséché	Assainissement insuffisant. Drainage médiocre ou nul.	Prairie naturelle, surtout pâturée.
Marais mouillé	Submersion systématique en hiver, occasionnelle aux printemps-automne (crues)	Prairie naturelle. Cultures légumières d'été. Populiculture.

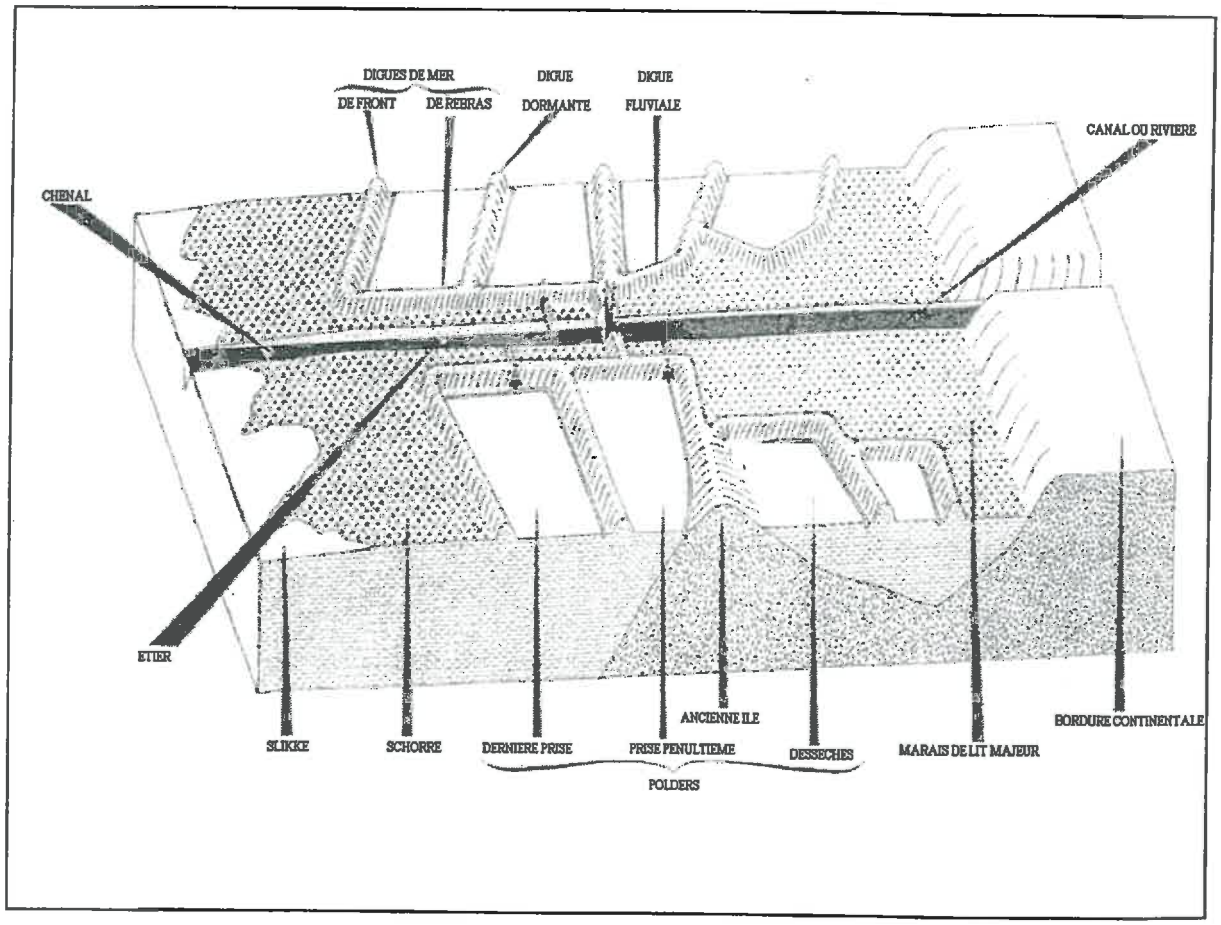


Figure I-2. Bloc-diagramme schématique illustrant la définition de quelques formes anthropiques des marais (d'après Verger, 1968)

précipitations soit 530 mm tombent de septembre à mars. L'excès d'eau en hiver mesuré par le cumul du bilan climatique est de 280 mm de pluie.

Par contre l'été présente un caractère de sécheresse marqué pour la façade atlantique de la France, ainsi qu'une forte insolation. Les mois juin, juillet, août sont particulièrement secs : P = 132 mm, ETP = 390 mm, le bilan climatique P-ETP de l'été est de - 250 mm. Le bilan climatique annuel est équilibré.

La variabilité climatique géographique dans les Marais de l'Ouest (Pons et Médion, 1980) est limitée aux zones les plus excentrées qui sont, mis à part les marais de Gironde, peu concernées par la mise en culture (Figure I-1). Les climats du marais Poitevin et de Rochefort sont pratiquement semblables. Aussi nous utilisons les données climatiques de la station de St Laurent de la Prée pour discuter de la variabilité inter annuelle pour la période 1966-1993 (Annexe I).

1 - 3. Paysage et utilisation traditionnelle (Tableau I-2).

Ces espaces et leur utilisation dépendent de l'excès d'eau plus ou moins prononcé et de la nature de l'eau qui les entourent (Figure I-2).

Les *marais côtiers* sont soumis à *l'eau de mer* soit directement soit à travers divers chenaux. Dans le premier cas, c'est un paysage de prairies halophytes (les mizottes) constituant les *prés salés*. Dans le second cas, ce sont soit les *marais salants* soit les bassins de *claires*. Ces derniers, situés le long des estuaires, permettent l'affinage et le stockage des coquillages.

Les *marais mouillés* sont soumis aux crues des fleuves et rivières. Les parcelles, petites, ont souvent un accès unique par voie d'eau. La prairie et le peuplier occupent la plupart des parcelles. Quelques cultures d'été existent de façon traditionnelle : haricots demi secs, melons, maraîchage. Le maïs est cultivé dans les parcelles accessibles au matériel. Ces contraintes ont entraîné ces dernières années une tendance à la réduction des activités

agricoles (qui se manifeste par l'enfrichement de parcelles) au profit du tourisme dans la zone de la "Venise verte".

Dans les *marais desséchés* la maîtrise de l'hydraulique générale permet de maintenir l'eau des fossés au dessous de la surface du sol. Les parcelles sont de grandes dimensions et leur relief en cuvette est dû à la présence d'un bourrelet d'argile provoqué par le curage régulier des fossés. En hiver, l'eau est retenue dans la parcelle par ce bourrelet, ce qui provoque une asphyxie des sols. Pendant l'été, l'amenée d'eau douce dans les fossés ne s'infiltre pas dans la parcelle, le sol étant strictement imperméable. Elle permet de disposer de clôtures et d'abreuvoirs pour le cheptel. Jusqu' en 1970, la plupart des marais desséchés sont occupés par la prairie naturelle exploitée extensivement par des bovins en majorité. Les marais les plus récemment endigués constituent *les prises*. Généralement d'un niveau légèrement plus élevé que les marais plus anciens, elles bénéficient de conditions d'assainissement plus favorables et sont de ce fait traditionnellement cultivées. Le marais desséché a vu, à partir des années 1980, un fort développement du drainage et de la mise en culture. Ce sera notre zone privilégiée d'étude.

2 - Le milieu et son histoire : aménagement et systèmes de production.

L'histoire, en combinant le contexte physique et l'action des hommes pendant une longue durée, nous montre l'évolution de ce milieu sous l'effet des techniques et des conditions économiques et politiques. Nous utilisons les travaux de Talureau (1965), Boutin (1976), Billaud (1980) pour décrire l'histoire de l'agriculture dans les marais.

Les trois périodes d'aménagement des Marais de l'Ouest sont le Moyen-âge et particulièrement les 11 et 12 ième siècles, le 17 ième siècle et le 19 ième siècle.

- Elles présentent des *traits semblables*. Elles se caractérisent par -a- un projet politique fort, volontariste, visant la puissance et l'indépendance économique ; -b- un objectif d'abord agricole des aménagements : il s'agit de permettre une production agricole moins "précaire" en luttant contre les inondations ; -c- une conception d'ensemble des dessèchements (marais desséché/ mouillé) qui n'a pas varié depuis les 11 et 12 ièmes siècles ; -d- une mise

Tableau I-3. Incidence de la maîtrise hydraulique et de la force de travail sur l'orientation des systèmes de production dans le marais desséché du 17ème au début du 20ème siècle

Maîtrise hydraulique (Exemple) / Force de travail/ha : (main d'oeuvre et/ou équipement)	Bonne ("Prises")	Mauvaise
Forte	***Cultures** ***Polyculture-élevage**	***Lait** ***Elevages mixtes** ***Petits élevages**
Faible	***Elevage plus ou moins extensif**	***Elevage viande extensif.**

en oeuvre coordonnée et planifiée de multiples domaines (techniques, économiques, sociaux, juridiques et politiques) ; -e- une organisation sociale particulière pour décider, organiser et payer les travaux, puis gérer et entretenir les aménagements (syndicats de marais).

- Les systèmes de production *changent* en s'adaptant au contexte économique. Aussi les exigences en matière d'aménagement évoluent.

L'évolution des systèmes de production s'articule autour de trois contraintes majeures : la *maîtrise de l'excès d'eau*, la *force de travail* (main d'oeuvre et équipement) et le *rapport des prix* entre production végétale et animale.

Le tableau I-3 illustre la relation des deux premières contraintes avec les systèmes de production. Avec une bonne maîtrise hydraulique (niveau d'eau bas comme dans le secteur des "prises") et une force de travail par ha élevée, la culture et la polyculture-élevage est possible. Par contre si la force de travail est faible ce seront les systèmes d'élevage plus ou moins extensifs qui seront adaptés. Dans le cas d'une mauvaise maîtrise hydraulique (niveau d'eau élevé et/ ou aléatoire), si la force de travail est élevée un élevage laitier ou mixte associé à des petits élevages est bien adapté ; si la force de travail est faible, c'est l'élevage de viande extensif qui semble le plus favorable.

Le rapport des prix entre les productions végétales et animales module ces grandes tendances soit vers l'augmentation soit vers la réduction des surfaces en cultures. Il intervient donc sur les exigences des agriculteurs en matière d'assainissement.

Lorsque les prix des céréales sont favorables, les baux imposent, après aménagement, un assolement constitué de 2/3 de cultures et de 1/3 de prairies. Ce système, établi dès le Moyen-âge, s'est maintenu jusqu'au début du 19 ième siècle. Les exigences des agriculteurs vis-à-vis de l'assainissement sont fortes pour réussir les cultures.

L'évolution de la seconde moitié du 19 ième siècle à la fin de la seconde guerre mondiale montre le cas contraire. Sous l'effet d'une forte réduction de la main d'oeuvre et du prix des céréales d'une part et de la très bonne valorisation des produits d'élevage d'autre part, l'élevage exclusif se généralise. Les propriétaires exigent lors du renouvellement des baux la

mise en prés et en pâtures des parcelles. Les besoins en aménagement et en gestion des eaux évoluent : exigence d'eau en été dans les fossés pour abreuver les animaux et clôturer les parcelles, tolérance aux inondations l'hiver. La fin du 19 ième siècle et le début du 20 ième voit la confirmation des tendances amorcées précédemment. Si le cheval disparaît, l'élevage bovin s'adapte au développement des coopératives laitières. Selon l'importance de la main d'oeuvre et de la surface agricole, le développement de l'élevage va s'orienter vers le lait (UTH/SAU forte), la viande (UTH/SAU faible) ou le système mixte.

3 - L'évolution récente de l'agriculture et de la région.

3 - 1. Après la seconde guerre mondiale *le contexte de l'économie change*.

On assigne à l'agriculture l'objectif de couvrir les besoins nationaux puis européens. Pour cela une politique de prix garantis est mise en place. Le prix des productions végétales devient plus favorable que celui des productions animales. Parallèlement, de nouvelles techniques sont mises à la disposition des agriculteurs par l'intermédiaire des Organismes de Développement Agricole. Toutes les conditions sont réunies pour que les régions de marais puissent bénéficier d'un développement exceptionnel à condition de pouvoir surmonter les contraintes traditionnelles : l'excès d'eau et la puissance de travail.

3 - 2. Les Grands Travaux d'Aménagement et les premières tentatives d'intensification.

Dans les années 1950, le déséquilibre économique apparaît de plus en plus grand entre les marais et les régions voisines. En 1953, dans le cadre de l'aménagement du territoire, les Marais de l'Ouest bénéficient de Grands Travaux hydrauliques complétés par un aménagement des structures d'exploitations (remembrements, restructuration, développement). C'est la 4 ième grande période d'aménagement : "depuis les grands travaux d'assèchement effectués au 18 ième siècle... aucune action d'ensemble n'a été entreprise dans les marais du littoral atlantique" (Talureau, 1965). "Il dépend désormais des hommes de cette région de démentir le désavantage géographique de sa position européenne pour en faire une des régions prospères du territoire français" P. Lamour in Talureau (1965).

3 - 3. Des questions posées par les acteurs de la région...

La valorisation agricole du marais après les travaux d'aménagement ne semble pas tenir les promesses qu'on en attendait. Certains spécialistes conseillent d'éviter le drainage enterré compte tenu de l'imperméabilité et de la sodicité des sols (Hénin et al., 1963). Des essais de mise en culture menés chez des agriculteurs dans les années 1960 se soldent par des résultats aléatoires et parfois négatifs. Deux séries de causes sont invoquées :

a - une maîtrise insuffisante de l'excès d'eau et plus généralement des conditions de milieu. D'une part, le drainage par rigoles ne suffit pas dans la plupart des cas à la maîtrise de l'eau au niveau de la parcelle ; le niveau de l'hydraulique générale du bassin de marais est trop haut ou trop aléatoire. D'autre part, l'excès d'eau s'accompagne d'une imperméabilité de surface qui provoque flaques et asphyxie des plantes.

b - des équipements (matériels et tracteurs) et des techniques inadaptés aux conditions particulières du milieu (modalités d'intervention). Les références techniques et "l'expérience" manquent dans ce milieu qui a "perdu" la mémoire de ses techniques et dont les moyens ont de toute façon changé.

Aussi la question de l'aménageur est de connaître le lien qui doit exister entre l'aménagement hydraulique au niveau du bassin et les modes de drainage à la parcelle.
La question de l'agriculteur est de savoir si l'intensification des productions sur les parcelles de marais peut augmenter le revenu du travail.
Pour le développement agricole, il s'agit de savoir quelles techniques et moyens mettre en oeuvre pour intensifier : quelles productions, quels systèmes de cultures sont les plus adaptés (prairies, cultures) ?

3 - 4. La mise au point des techniques d'intensification.

- ***Le domaine expérimental de Saint Laurent de la Prée*** a mis au point les techniques d'intensification et de diversification des productions agricoles dans le marais (1964 - 1974) : méthodes d'assainissement et de drainage (Damour et al., 1972) dans des sols réputés

imperméables (Morizet et al., 1970), effets de la maîtrise de l'eau sur l'état physico-chimique du profil (Mingeau, 1973), les différents systèmes de productions (prairies, cultures) et leurs rendements (Denby-Wilkes, 1976), les modalités de travail du sol (Garreau et Jeannin, 1975 ; Garreau, 1976). De cet ensemble d'essais, il ressort un corps de règles à appliquer pour s'adapter aux contraintes de mise en culture (Damour et Pons, 1979) : a - une parfaite maîtrise de l'eau au niveau de la parcelle, b- des interventions culturales en condition sèche et un nombre réduit de reprises en condition humide, c- ces deux contraintes impliquent un choix limité aux cultures d'hiver ou à celles de printemps se récoltant tôt (tournesol).

Durant cette étape, la question sur la qualité des sols est de savoir comment l'eau circule dans un profil de sol aussi imperméable.

Mais les conclusions tirées des expériences réalisées dans le Domaine Expérimental de Saint Laurent de la Prée peuvent-elles *être généralisées (faisabilité et fiabilité) aux exploitations de la région ?*

- L'application des techniques aux exploitations agricoles.

Un réseau de 12 Exploitations de Références mis en place en 1976 a permis de tester si les techniques d'assainissement et de drainage donnaient les mêmes résultats selon les sols et les moyens mis en œuvre (systèmes de production et technicité). Le bilan du suivi (Collectif, 1980) montre que l'effet du drainage est très variable selon les sols. L'efficacité est faible si le sol est instable, forte si le sol est stable (Damour, 1981 ; Collas et al., 1984 ; Collas, 1985 ; Damour et Pons, 1987). Ceci a des conséquences sur les systèmes de culture [potentiel de rendement (Pons, 1985) et éventail du choix de cultures (Laporte et al., 1984)] et donc sur la qualité de l'eau (Snegaroff, 1981). Ainsi dans les sols peu stables, il est nécessaire de gypser (Van Beekom et al., 1953 ; Guyot et al., 1984 ; Concaret, 1988) et de choisir des systèmes de culture qui permettent de respecter des conditions favorables d'interventions culturales (Damour et al. 1984 b, Pons et al. 1991).

Lorsqu'il y a maîtrise de l'eau, la maîtrise du travail du sol est la clé de la conservation de la fertilité physique des sols (Capillon et Damour, 1982 ; Capillon et Pellerin, 1984)

notamment dans les sols peu stables. Ceci agit directement sur le revenu des exploitations agricoles (Laporte et al., 1984) qui évoluent de façon différente selon les contraintes du milieu (Capillon et Tagaux, 1983, 1984).

3 - 5. Les nouveaux enjeux.

Le développement des techniques d'intensification et plus particulièrement du drainage et de la mise en culture ont suscité dès 1975 l'opposition d'autres acteurs liés à l'usage du marais : ostréiculteurs et conchyliculteurs, associations de protection de la nature, chasseurs, pêcheurs. Deux séries de préoccupations président à cette opposition : pour les premiers, c'est la crainte de la pollution des eaux issues du marais (Chevallier et Masson, 1988), pour les autres c'est la réduction voire la perte du caractère humide de la région. Les activités liées à la culture sont-elles conciliables avec le maintien de la qualité de l'eau et la conservation du caractère humide de la région ? Tel est le nouveau défi aujourd'hui (Steyaert et al., 1995). Des mesures sont prises pour favoriser le maintien de la prairie et freiner voire interdire le drainage : octroi de primes à la prairie dans le cadre d'OGAF-Environnement (Capillon et David, 1993 ; Périchon, 1994) ; en Charente Maritime, interdiction de tout nouveau drainage sans l'accord d'une commission locale réunissant les principaux acteurs du marais. Des solutions techniques sont explorées : le lagunage des eaux de drainage (Racault et al., 1990), le relèvement des drains au moment des premiers écoulements (Chevallier et Turpaud, 1996), le stockage de l'eau en été à travers l'irrigation souterraine, la gestion humide des prairies (Kernéis et al., 1995), la mise au point de nouveaux systèmes de culture.

La question technique est donc de savoir si en gérant l'eau de façon particulière au niveau d'îlots cultivés on peut améliorer la qualité de l'eau et renforcer le caractère humide de la région pour favoriser la biodiversité. Ces solutions soulèvent la question de la caractérisation de la perméabilité et de l'état chimique du sol et des conditions d' évolution.

Quels sont les facteurs qui agissent sur la perméabilité ? Quel est l'effet de la stabilité structurale sur la production et plus généralement sur les systèmes de cultures ? Comment améliorer la stabilité structurale ?

Tableau I-4. Cadre, hypothèses pour étudier l'aptitude des sols à évacuer l'eau en excès dans les terres de marais

APTITUDE DES SOLS A EVACUER L'EAU EN EXCES.

	Point de vue sur les sols		Mise à l'épreuve au champ			
	Matériau	+ Milieu aménagé et systèmes de culture : climat, sol, plante, techniques culturales	Parcelle			
	Stabilité structurale ↓		Perméabilité du profil en condition saturée ↓			
Classement	*Degré de dispersion* * sols * profils		*Excès d'eau* * comportement physique du profil * comportement du blé			
Indicateurs	Indice de Dispersion.		Profondeur de la nappe	Porosité de la couche travaillée	Profondeur et densité racinaire	Composantes du rendement
Déterminismes des indicateurs.	Etat chimique		Etat physique		Colonisation racinaire	Etat du peuplement
Mécanismes, facteurs et conditions d'évolution	Variation d'état chimique Variables explicatives.	gypse	Variation de l'état physique et de l'état chimique Remaniement du sol, gonflement-retrait.			

Chapitre 3. La problématique scientifique et le dispositif général de recherche.

1 - La problématique scientifique (Tableau I-4)

1 - 1. Comment caractériser les sols pour rendre compte de leur aptitude à la mise en culture ?

Dans ce milieu particulier, l'excès d'eau est dû à la fois au contexte physique et géographique mais aussi à la nature très argileuse du matériau. L'action de l'homme à travers l'histoire a été d'aménager les eaux à l'échelle de bassins pour rendre moins aléatoire la production agricole. Cependant même dans le marais desséché, l'aménagement ne suffit pas à régler l'excès d'eau à la parcelle, il est nécessaire d'y adjoindre un drainage relié aux fossés collecteurs. Une fois l'eau maîtrisée, la mise en culture exige ensuite un travail du sol minimum pour assurer un milieu favorable à la levée et à la croissance du peuplement. Se posent alors les contraintes liées à la nature des sols : la forte cohésion à l'état sec exige une forte puissance de travail ; la faible perméabilité, la plasticité et l'adhésivité pendant la période humide entraînent une faible portance.

Dans un tel contexte, on postule que la mise en culture *nécessite un sol apte à évacuer l'eau en excès.*

Cette qualité est liée à la perméabilité du profil et à sa conservation pendant l'hiver. Elle permet d'assurer un milieu favorable à l'élaboration du rendement du peuplement végétal. Le maintien *d'un état structural* suffisamment poreux est attaché à la *stabilité structurale.* Celle ci est définie par l'aptitude d'une terre à maintenir son état d'agrégation lors d'une agression par l'eau. Lorsque nous parlons de *qualité des sols de marais* nous entendons stabilité structurale des divers horizons du profil et les conséquences qui en découlent lorsqu'ils sont cultivés.

La stabilité structurale s'extériorise en hiver sur une parcelle drainée par un comportement plus ou moins marqué par *l'excès d'eau* : degré de *dispersion* de la surface plus ou moins fort, *efficacité* du drainage est plus ou moins bonne.

1 - 2. L'hypothèse centrale de cette thèse est qu'il existe un *liaison étroite entre l'intensité de la dispersion du matériau et l'excès d'eau.* En effet de nombreux auteurs relient l'aptitude à la dispersion et la perméabilité du matériau (Quirk et Schofield, 1955 ; Loveday et Pyle, 1973 ; Shainberg et al., 1980, 1981), et plus généralement la stabilité structurale et la perméabilité du matériau (Hénin et al., 1969 ; Hénin, 1977). D'autres travaillent sur le comportement au champ et privilégient quelques aspects comme le fonctionnement du drainage (Collas, 1985), le comportement agronomique avec les jours disponibles (Collas et Tiercelin, 1988), l'adaptation des conduites des cultures à l'excès d'eau (Papy, 1988 ; Meynard et Aubry, 1988), le comportement des plantes et particulièrement le rendement (Van Hoorn, 1958 ; Trafford et Oliphant, 1977 ; Pons, 1985 ; Massé et Capy, 1988). Quelques uns, pour faire le lien entre excès d'eau et plante utilisent une instrumentation lourde qui réduit le nombre de situations étudiées mais permet de mieux comprendre les phénomènes (Cannell et al., 1980, 1985 ; Cannell, 1984 ; Belford 1981). Enfin quelques travaux tentent de lier caractéristiques du matériau et comportement au champ (Féodoroff, 1960 ; Gras, 1961 ; Périgaud, 1963).

On fait l'hypothèse qu'on peut, à partir de mesures et d'observations simples, utilisables par un agent de développement, classer les sols pour rendre compte à la fois de la stabilité structurale du matériau, de l'excès d'eau et des réactions de la végétation. La variable d'entrée est le *degré de stabilité du profil* évalué par un *test de dispersion*, les variables de sorties sont *l'excès d'eau* et le *comportement des cultures*. Le système est la *parcelle* aménagée, drainée et cultivée.

1 - 3. Le matériau et son degré de dispersion.

Nous classons les échantillons de sol selon leur *degré de stabilité* en choisissant la *dispersion* pour l'évaluer.

En effet, quatre mécanismes principaux sont mis en avant pour expliquer la désagrégation (Emerson, 1967 ; Boiffin, 1984 ; Le Bissonnais, 1988) : l'éclatement, la désagrégation mécanique, la microfissuration par gonflement et la dispersion physico-chimique. Il semble que la dispersion soit le mécanisme de désagrégation le plus efficace car

Tableau I-5. Granulométrie, taux de calcaire et de matière organique des sols des Marais de l'Ouest, marais desséchés, ensemble bris récent, intermédiaire, ancien.

m, et, n : moyenne, écart type, nombre d'échantillons.

		Argiles	Limons	Sables				Matière	nb échant.
				très fins	fins	grossiers	CaCO3	organique	MO/A*100
		%	%	%	%	%	%	%	> 7
Horizons (cm)									
0-30	m	56.8	28.3	7.8	2.3	1.3	5.4	5.2	
	et	4.9	10.9	10.6	1.8	1.2	5.2	3.1	
	n	27	27	27	27	27	27	27	13/28 = 46%
30-60	m	56.8	35.0	3.8	2.0	1.5	7.2	1.7	
	et	4.6	7.2	3.2	1.7	1.4	5.4	1	
	n	19	19	19	19	19	19	19	1/20 = 5%
60-90	m	57.0	37.3	3.4	1.7	1.5	6.3	0.92	
	et	6.3	8.4	2.8	1.9	1.6	4.3	0.25	
	n	18	18	18	18	18	18	18	0/19 = 0%
Ensemble	m	56.8	32.9	5.3	2.0	1.4	6.2	3	
	et	5.3	10.0	7.4	1.8	1.4	5	2.9	
	n	64	64	64	64	64	64	64	17/67 = 25%

il concerne les particules élémentaires et il décuple les effets des autres mécanismes (Bresson et Boiffin, 1990 cités par Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Les caractéristiques du sol qui jouent sur la stabilité sont : la sodicité, la matière organique, les sels de fer et, si aucun de ces facteurs n'est déterminant, la teneur en argile et sa minéralogie, la teneur en CaCO3 (Le Bissonnais et Le Souder, 1995). Compte tenu de la nature et de la texture peu variables des sols de marais (Tableau I-5), on peut supposer a priori que les facteurs qui agissent sur la stabilité sont la *sodicité et l'état calcique.* La *teneur en matière organique* agit aussi mais à partir d'un certain seuil par rapport au taux d'argile. Monnier et Stengel (1982) proposent un seuil MO * 100 / A > 7 où MO et A sont les taux de matière organique et d'argile en %. Quirk (1979) qui rapporte Greenland et al. (1968) note que les sols soumis à des alternances d'oxydation et de réduction forment une pellicule de fer et de produits hydrolysés qui augmente la stabilité du matériau.

De plus de nombreux travaux ont montré le lien entre la sodicité, la *salinité* d'une part et la capacité d'hydratation du matériau et son degré de gonflement d'autre part, pour expliquer l'imperméabilité du matériau et la morphologie des profils (Tessier et Pédro, 1980 ; Tessier, 1984 ; Halitim et al., 1984 ; Azib, 1989). D'ailleurs les pédologues utilisent la valeur de la sodicité associée souvent à celle de la salinité ou à d'autres paramètres pour classer les sols (Richards, 1954 ; Cheverry, 1974 ; Servant, 1975 ; Duchaufour, 1977) et pronostiquer les évolutions futures (Cheverry et Bourrié, 1996). Ainsi, faire évoluer le degré de dispersion du matériau et plus généralement son comportement physique passe par l'évolution parallèle de l'état chimique.

En superposant des horizons de stabilités différentes, on peut imaginer des profils de sol "types", ordonnés selon leur degré de stabilité prévisible.

1 - 4. Le comportement au champ.

- L'excès d'eau et le comportement du blé.

Au champ, la pérennité de la structure dépend non seulement de la stabilité structurale

du matériau mais aussi des conditions hydriques lors du *travail du sol*, et de l'excès d'eau[2] plus ou moins sévère auquel est soumis le profil pendant l'hiver.

L'état physique du profil sera a priori favorable au peuplement cultivé s'il possède et conserve pendant l'hiver -a- un réseau continu de pores de relativement grandes tailles, susceptibles d'accueillir le système radiculaire, d'assurer l'évacuation de l'eau saturante, [ce qui favorise le renouvellement de l'atmosphère du sol et le réchauffement des couches superficielles], -b- une interface sol-atmosphère fragmentaire et perméable, dépourvue d'obstacles susceptibles d'entraver la levée, les échanges gazeux, la propagation de la chaleur, l'infiltration de l'eau (Boiffin et Monnier, 1982).

Nous posons que :

a - la *profondeur de la nappe en hiver* est un indicateur du plancher de la zone perméable ou du niveau où il y a excès d'eau dans le profil de sol (Van Hoorn, 1958 ; Trafford et Oliphant, 1977 ; Cavazza et Rossi Pisa, 1987). Cette profondeur dépend de celle de l'élément drainant et/ou de celle de l'horizon imperméable selon le niveau de l'un par rapport à l'autre.

b - la description de l'état structural de la couche travaillée rend compte de la qualité de l'interface sol - atmosphère.

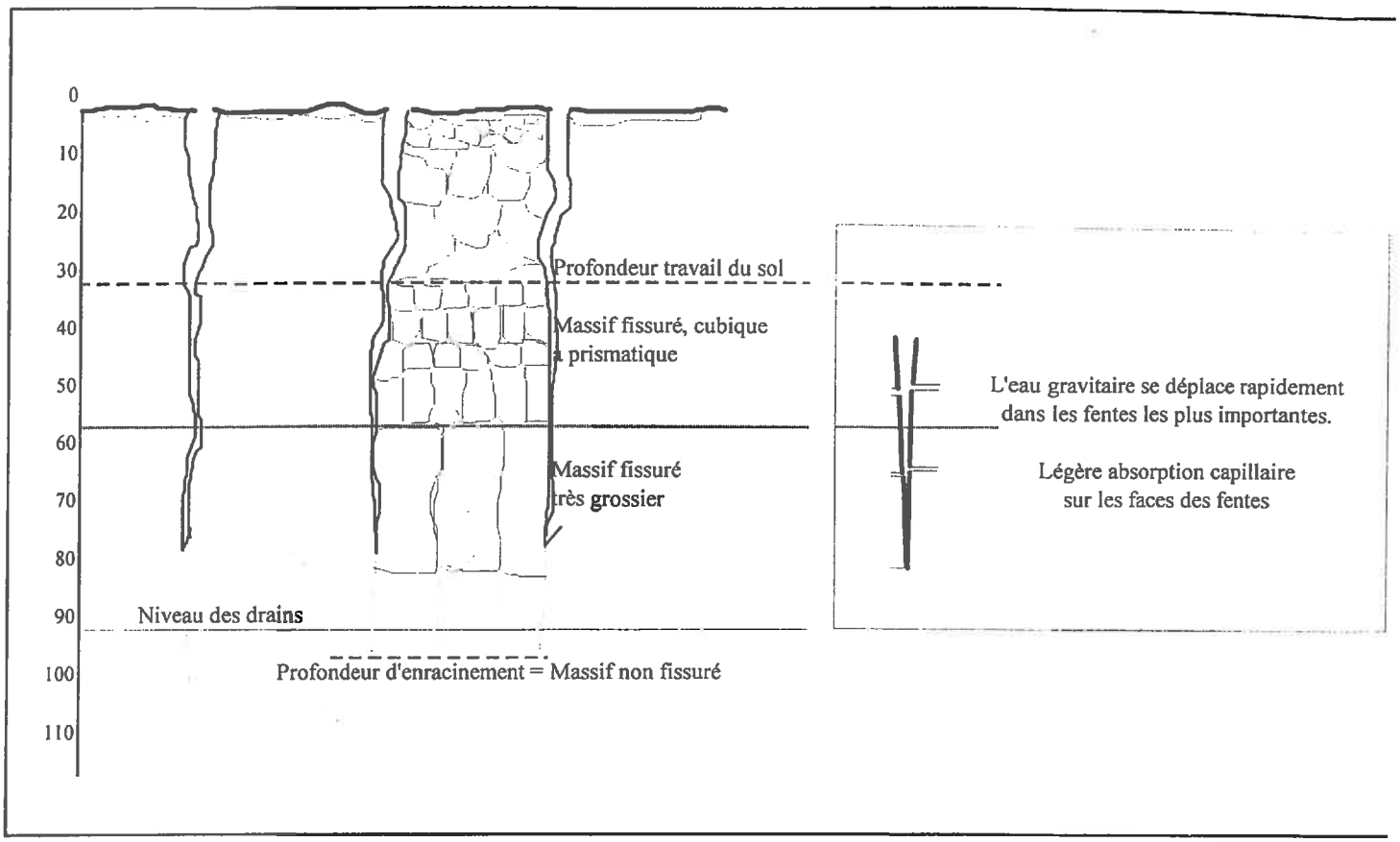
La combinaison des ces deux paramètres rend compte du degré *d'excès d'eau* au champ.

Le *blé d'hiver* est une culture pertinente pour juger l'effet de l'excès d'eau sur le peuplement végétal. Son cycle végétatif est en effet directement soumis à la période saturée hivernale et son comportement doit révéler le degré d'excès d'eau. Pendant la période humide, les composantes du rendement qui devraient être affectées sont : le nombre de pieds, le nombre de talles herbacés dont l'indicateur peut être la *biomasse obtenue début montaison*. De ce point de vue, la distinction entre les types de sol doit être fondée sur *le degré de dispersion de l'horizon (0-30 cm)*. Par contre pour les composantes du rendement qui s'élaborent tardivement (*nombre de grains/m²*) ce sont plutôt les caractéristiques des horizons profonds qui devraient être concernées.

---

[2] L'excès d'eau au champ entraîne une destruction d'autant plus marquée de la structure que la stabilité est faible.

- A -



- B -

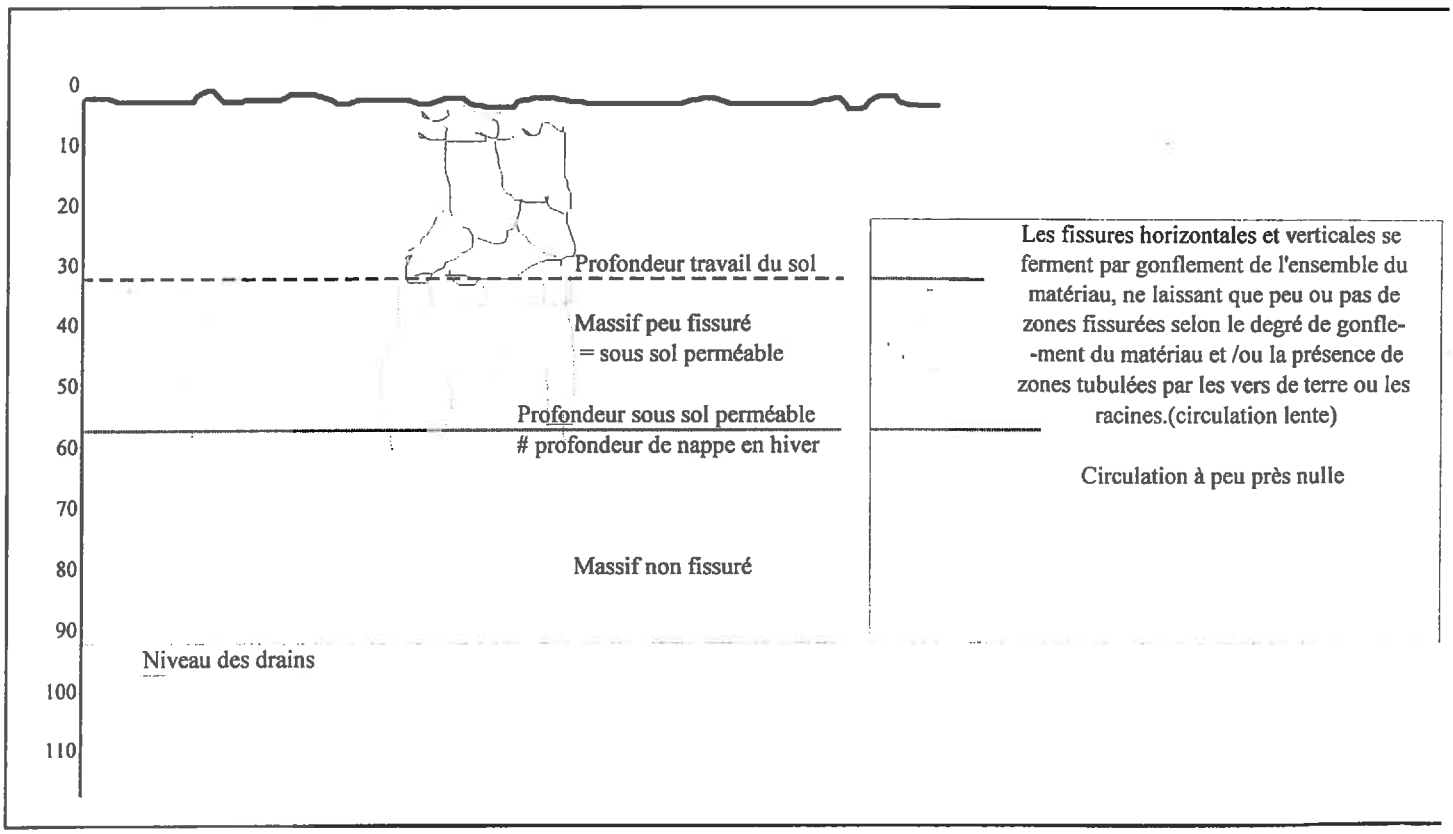


Figure I-3. Etat de fissuration du profil -A- après récolte du blé ; -B- en fin de période saturée.

S'il existe une liaison entre l'excès d'eau dans le profil et le comportement des cultures, cette relation doit jouer aussi sur la colonisation des racines (densité, profondeur), puisque le système racinaire représente l'interface entre les conditions pédoclimatiques et le comportement de la culture. On devrait trouver une correspondance entre la *profondeur d'enracinement du blé* et celle de la nappe à l'issue de la période saturée.

- L'évolution du profil pendant une campagne. Effet du climat et du système de culture.

Au champ les mécanismes d'évolution du sol sont chimiques comme ceux du matériau mais ils exigent des conditions physiques particulières pour l'évacuation des sels en excès : un système de drainage et un profil suffisamment perméable pour qu'il y ait circulation de l'eau. La perméabilité est liée à l'état structural du profil de sol. Or celui ci est éminemment variable dans le marais. Cette variabilité est expliquée en grande partie par l'état hydrique, annuellement récurrent, qui agit sur l'état de gonflement et de retrait du matériau. Ceci a des conséquences sur la circulation de l'eau (Armstrong et al., 1996) et notamment le fonctionnement du drainage. Les figures I-3 décrivent un même profil en condition sèche (A) et en condition saturée (B) ; la figure I-5 illustre la circulation de l'eau dans un sol saturé (Concaret et al., 1976 ; Collas, 1985 ; Damour et al., 1984 (a) ; Miatkowski, 1993).

On peut écrire pour un moment quelconque de la campagne : Etat structural = f (Etat hydrique).

L'état hydrique peut être estimé par le *bilan hydrique (P - ETR +/- RU)* avec : P : précipitation, ETR : évapotranspiration réelle de la culture, RU : réserve utile en eau du sol.

On peut poser : ETR = k x ETP avec k coefficient qui dépend de l'état de croissance de la culture, ETP (évapotranspiration potentielle) qui dépend de paramètres climatiques. Supposons pour simplifier k = 1.

En été, le bilan climatique (P - ETP) est généralement négatif. L'aptitude du peuplement végétal à fabriquer de la matière sèche va alors être conditionnée par l'utilisation de la RU et donc par la profondeur d'enracinement p. L'enracinement, en asséchant le profil, le structure en le fissurant. Si la profondeur p augmente, le sol se structure en profondeur, on aboutit à l'amélioration de la fertilité du sol (Boiffin et Monnier, 1982).

En hiver, le bilan climatique est généralement positif. Le drainage fonctionne lorsque l'excédent du bilan climatique compense la RU utilisée.

Ainsi, les termes du bilan hydrique rendent compte à la fois des conditions de milieu [climat (P et ETP), sol (RU)] et des systèmes de culture (k et p). La profondeur p exprime l'interaction qualité du sol x peuplement cultivé x climat.

C'est pourquoi *l'étude du bilan hydrique* (présentée en Annexe I) doit respecter le découpage de la campagne en périodes homogènes vis-à-vis des états hydriques et donc structuraux. : *saturée / massif (hiver)*, ressuyée / début de fissuration (printemps), sèche / fissuré (été) et ré humectée / motteux après travail (automne). On peut alors estimer pour chacune d'elle, *la valeur et la variabilité du bilan hydrique* (P - ETP +/- RU), autant du bilan négatif, moteur de l'assèchement et donc de la structuration en profondeur du profil, que du bilan positif, condition de l'échange cationique. On peut alors discuter de l'occurrence de certains événements (absence de drainage par exemple) par l'étude fréquentielle des caractéristiques des différentes périodes du bilan climatique et hydrique.

1 - 5. Généralisation des principes de classification.

Ce principe de classification (stabilité structurale des horizons successifs) n'est-il pas inféodé au blé et à la période hivernale ? On peut la généraliser au comportement du maïs et, à titre de cadre, à l'étude de la qualité de l'eau et des conséquences d'une gestion plus humide du milieu.

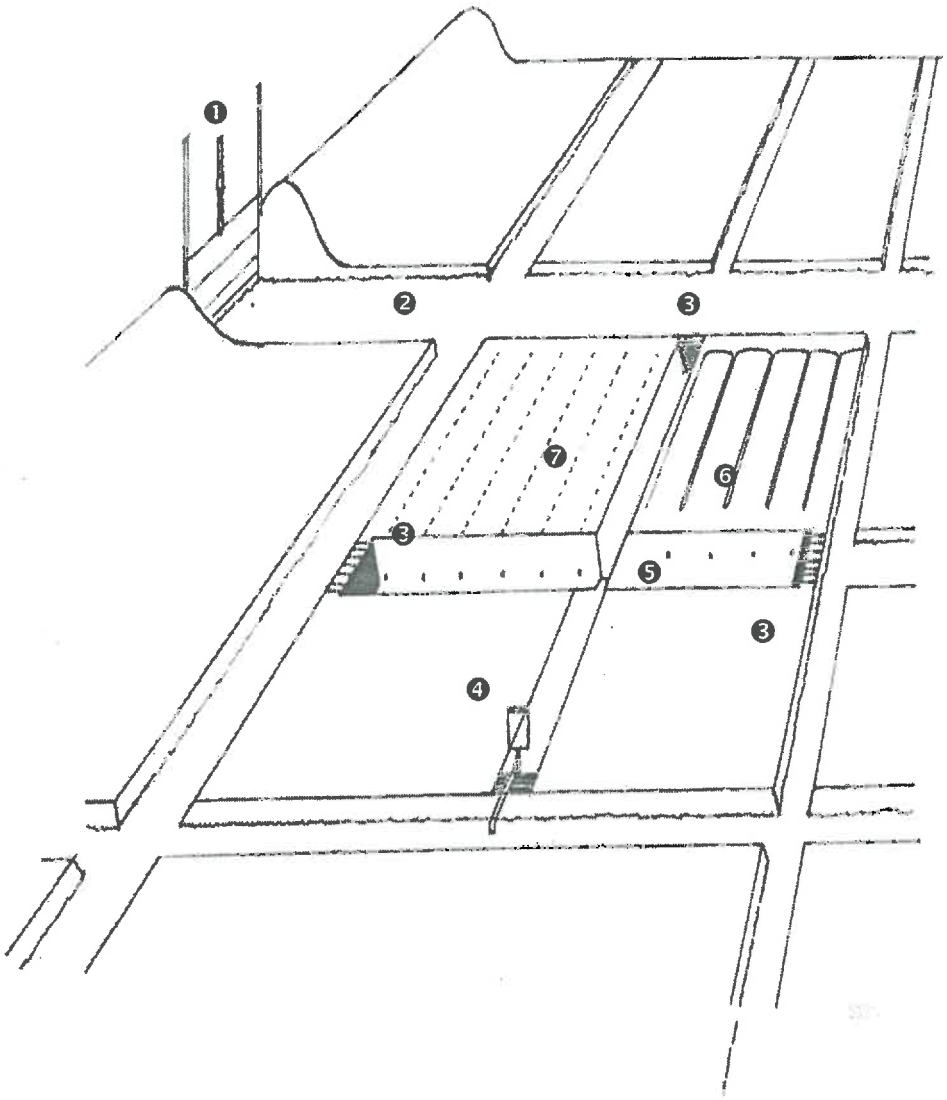
Pour *la culture du maïs*, la contrainte de milieu essentielle pour la production n'est plus l'excès d'eau en hiver comme pour le blé mais l'alimentation hydrique en été. Les types de sols ont-ils un effet sur l'alimentation hydrique en l'absence d'irrigation ? Si notre thèse est juste,

on devrait trouver une relation entre le rendement du maïs et les types de sol en supposant la zone instable du profil défavorable à l'enracinement.

Si l'ensemble des hypothèses est vérifié, on peut utiliser la classification des sols et ce que l'on sait des conséquences sur le comportement des sols et des cultures, pour *proposer un cadre d'étude sur la qualité de l'eau et sur les effets d'une gestion plus humide du milieu.*

En effet, on peut faire l'hypothèse que débit et qualité de l'eau sont liées puisque il existe une correspondance entre les débits de drainage et les niveaux de nappe observés. Il est possible de classer les débits selon les horizons qu'ils sollicitent : les très faibles passent par des zones très peu poreuses (imperméables), les forts et très forts par des zones poreuses liées soit au remaniement du sol soit à une porosité « naturellement » forte du sous sol. Si on fait l'hypothèse que le niveau moyen de la nappe en hiver fixe la profondeur de la zone imperméable, on peut trier tous les débits par rapport à cette valeur moyenne. Les débits faibles correspondent à un niveau de nappe inférieur au niveau moyen, ils sollicitent des horizons de très faible perméabilité ; les débits intermédiaire, fort ou très fort correspondent à un niveau supérieur, ils sollicitent des horizons à porosité moyenne, forte ou très forte qui peuvent appartenir au sous sol ou à la couche travaillée. On peut par ce moyen définir a priori des "types de débit" liés au type de sol. Si on croise ces débits avec les systèmes de culture spécifiés par leurs inputs, on devrait dégager plusieurs « types d'eau » caractérisés par leur occurrence et leur risque.

Les conséquences d'une gestion plus humide du milieu sont plus faciles à prévoir dans les marais desséchés. En réduisant l'intensité du drainage, les échanges chimiques sol ---> eau devraient se réduire voire être supprimés, et donc la sodicité (et la salinité) des sols ne pas ou peu évoluer. On assisterait alors, selon les circonstances de la submersion, à une dégradation plus ou moins forte de la stabilité des horizons superficiels et donc à une évolution des profils vers des comportements plus défavorables.



❶ - Ecluse ❷ - Niveau d'eau général contrôlé par les écluses	Contrôle du plan d'eau collectif
❸ - Barrage d'argile ❹ - Pompe ❺ - Niveau d'eau dans les fossés isolés	Isolement hydraulique
❻ - Rigoles ❼ - Drains	Drainage de la parcelle

Figure I-4. Assainissement et drainage dans les marais dessèchés

2 - Dispositif général de recherche.

2 - 1. Le matériau.

On met au point un test de mesure de la stabilité structurale sur la plus large gamme de sols : marais mouillés, desséchés, bassins de marais, parcelles drainées ou non. Ce test mime les contraintes rencontrées par le sol au champ lors de l'humectation et de la saturation du sol ; il aboutit à évaluer un Indice de Dispersion (ID). On suppose qu'alors, l'ID ne dépend que de l'état chimique. On établit donc sur un échantillon représentatif mais plus restreint la correspondance entre état chimique (variable d'entrée) et degré de dispersion (variable de sortie). L'enjeu est ici d'évaluer la stabilité structurale et d'identifier les facteurs chimiques responsables de la dispersion.

2 - 2. Les parcelles, les conditions de milieu et les traitements expérimentaux.

- Le choix.

Bien que la recherche se soit déroulée sur une quinzaine d'années, les travaux ont été menés simultanément sur des parcelles appartenant au domaine de St Laurent de la Prée et sur un ensemble d'exploitations agricoles ayant des terres de marais (Laporte et al., 1984). Les parcelles ont été choisies pour représenter la plus large gamme possible de situations, gamme de milieux la plus ouverte grâce à une combinaison types de sol x degrés de maîtrise de l'eau, gamme d'exploitations représentant des systèmes de production et de cultures variés. On constitue ainsi un dispositif de parcelles de références adapté à la fois :

* au contexte milieu x exploitation agricole,
* à l'action et à la recherche.

- Les conditions de milieu explorées.

Les résultats présentés dans cette thèse concernent les parcelles de marais desséchés, isolées hydrauliquement, drainées et cultivées.

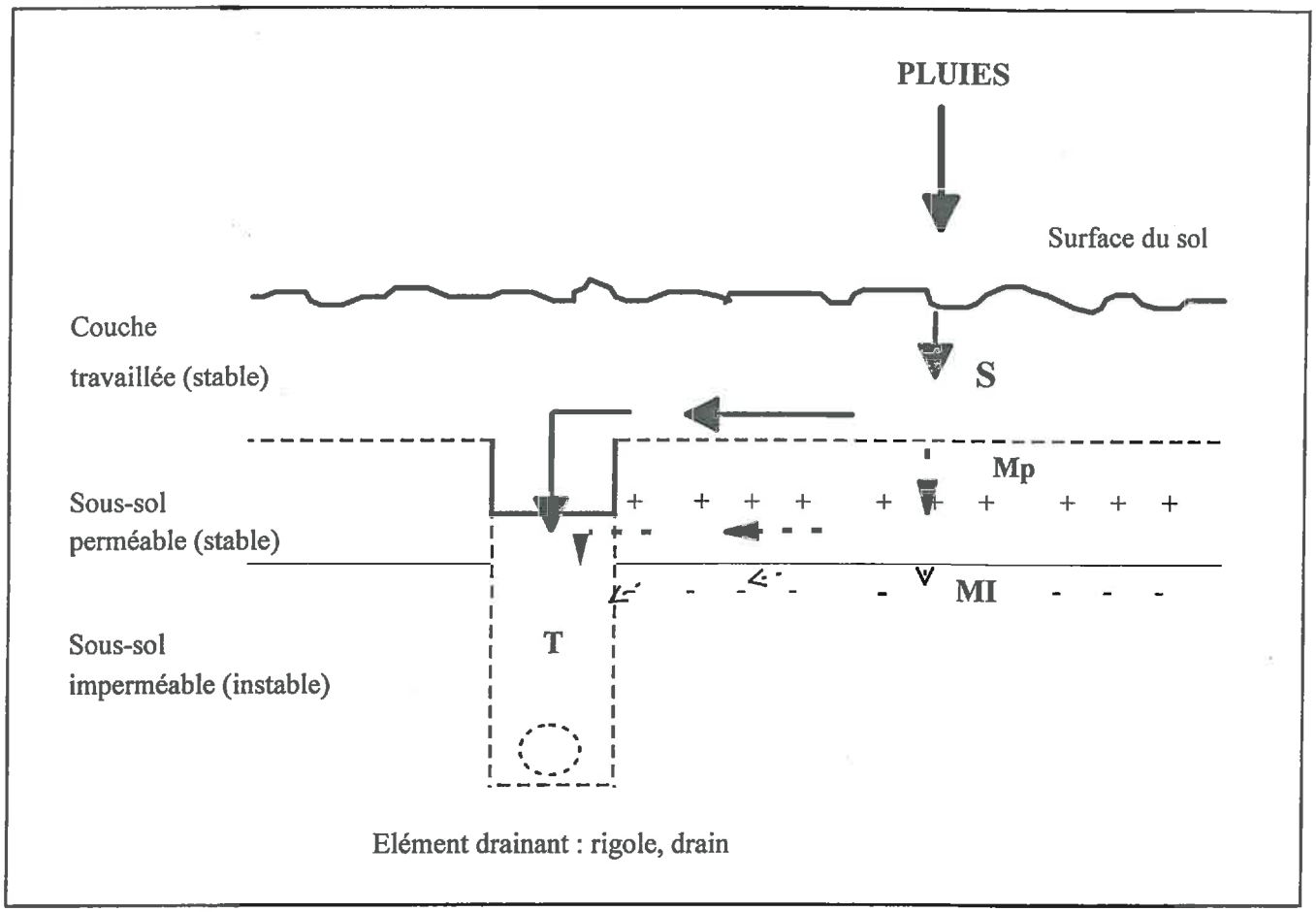


Figure I-5. Circulation de l'eau en sol de marais saturé et drainé.
S, M, T : circulation de l'eau dans la couche remaniée, dans le sous-sol et dans la tranchée de drainage.
Rigole (en plein), drain (tirets).

La maîtrise de l'excès d'eau (Figure I-4) nécessite simultanément -a- un plan d'eau général à un niveau suffisamment bas (assainissement) pour permettre l'implantation de cultures, et -b- l'évacuation des eaux de pluies en excès dans la parcelle (drainage) dans des sols très lourds et peu ou pas perméables (Figure I-5).

a - La plupart du temps, le contrôle du plan d'eau collectif est insuffisant pour la mise en culture soit pour des raisons d'hydraulique générale soit pour des questions de voisinage d'utilisateurs variés. Pour assurer un *assainissement* suffisant, compatible avec le drainage de la parcelle, on réalise *l'isolement hydraulique* d'un périmètre où on contrôle le niveau intérieur par pompage et déversement dans le réseau collectif extérieur. Ceci suppose une imperméabilité suffisante du sous-sol, ce qui n'est pas le cas des sols tourbeux (marais mouillé) dont l'assainissement est tributaire d'une décision collective.

b - *Le drainage des parcelles* se fait superficiellement par rigoles (- 0.50 / - 0.60 m) ou plus profondément par drains (- 0.80 à - 1.20 m).

- ***Les traitements expérimentaux*** sont constitués par *divers degrés d'excès d'eau* obtenus en combinant les *types de profil de sol* aux *modes de drainage* et dans certains cas l'apport de *gypse*. Les types de profils représentent la plus grande gamme possible de stabilité structurale.

2 - 3. Choix de la période et des facteurs pour l'étude du comportement du profil et des cultures.

- Choix de la période d'étude.

Nous choisissons *la période saturée* pour étudier l'état structural et le comportement du blé. D'une part, c'est le moment où le profil a atteint son gonflement et son imperméabilité maximum. D'autre part, le blé a terminé sa phase végétative à l'issue de cette période (mi-mars) et son état début montaison explique en partie son rendement (Masles-Meynard, 1980 ; Meynard, 1985).

- Choix des indicateurs.

Nous choisissons deux indicateurs pour juger de la circulation des fluides dans le profil.

- La *profondeur moyenne de la nappe en hiver*. Nous faisons l'hypothèse qu'il indique le niveau où l'eau circule lentement à cause d'une structure très peu poreuse.
- Les *notes de porosité* de la surface et de la couche travaillée qui permettent de *classer* les situations culturales par rapport à la possibilité de circulation des fluides à travers la surface et la couche travaillée et par rapport à la colonisation racinaire (volume de porosité visible - volume des creux).

De façon parallèle, on enregistre la *densité et la profondeur d'enracinement*. Ces données sont obtenues après description de l'état structural et racinaire du profil à la fin de la période saturée. Simultanément, nous mesurons l'état des parties aériennes *(croissance* et *développement)* du blé au début de la montaison.

Nous utilisons les outils et démarches proposés par Masle-Meynard (1980), Meynard (1985), Sébillotte (1988), Leterme et al. (1994), pour montrer l'effet des conditions de milieu et notamment de l'excès d'eau sur l'élaboration du rendement.

En mettant en relation les indicateurs de porosité, d'enracinement et d'état de croissance, on pourra juger des états du profil favorables ou non à l'enracinement et au peuplement en l'absence d'autre facteur limitant.

- Choix des facteurs et conditions explicatives.

On fait l'hypothèse que la conservation de l'état obtenu par le travail du sol et par la fissuration des horizons du sous sol non remanié est liée à la *stabilité structurale* du matériau évaluée par un *Indice de Dispersion*. Mais, au champ, la pérennité de la structure dépend aussi des conditions hydriques lors du travail du sol, et de l'excès d'eau plus ou moins sévère auquel est soumis le profil pendant l'hiver. On contrôle donc les *conditions de milieu et d'état* qui dépendent -a- du milieu (sol x climat), -b- des pratiques de l'agriculteur que l'on enregistre

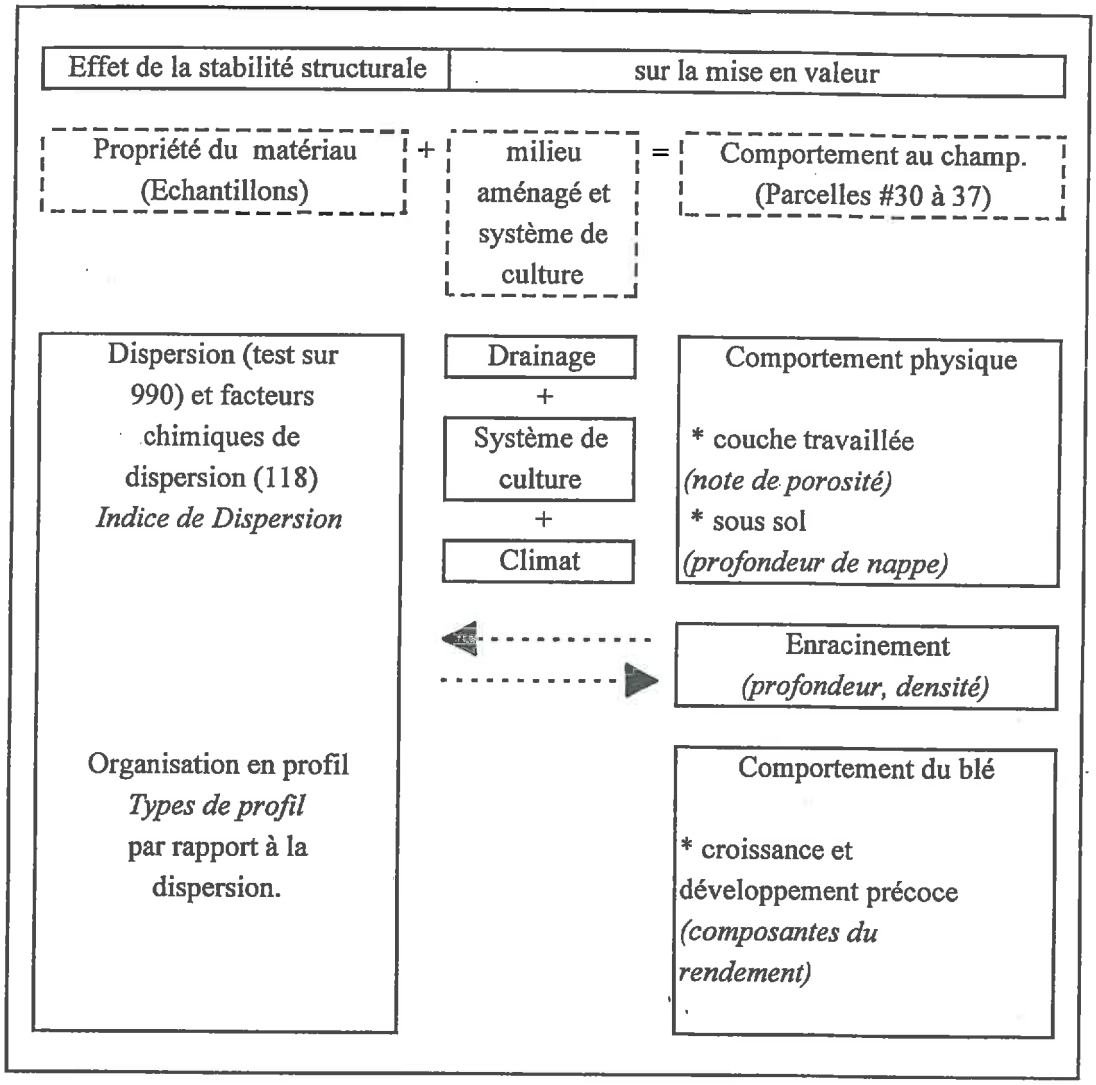


Figure I-6. Propriéte du matériau et comportement au champ.
En italique, les principaux indicateurs.

(itinéraire technique et notamment *le travail du sol et ses modalités*) et/ou -c- de leur interaction (état structural, maîtrise de l'excès d'eau).

2 - 4. La démarche utilisée et plan de l'étude (Figure I-6).

Après l'introduction, la deuxième partie aborde l'étude du matériau. On met au point un Indice de Dispersion qui permet d'évaluer la stabilité structurale (939 échantillons prélevés à l'occasion d'études diverses - pédologie, pré ou post drainage - dans tous les bassins de marais de l'Ouest). On identifie les facteurs chimiques de dispersion puis on établit une relation entre les facteurs et le degré de dispersion pour un sous ensemble de 118 échantillons. Ceci nous amène à distinguer 8 familles d'échantillons par rapport à la stabilité structurale et à la classification pédologique. A partir de ces familles, on construit une typologie de profils basée uniquement sur un gradient de stabilité du matériau.

Dans une troisième partie, on teste cette typologie de profils pendant 3 années successives sur une trentaine de parcelles aménagées et cultivées en blé dans les marais desséchés. On constate que cette classification rend compte à la fois du comportement physique des sols et de la profondeur racinaire du blé. On émet alors l'hypothèse que la profondeur de la nappe en hiver représente la profondeur du niveau imperméable du profil de sol.

Dans une quatrième partie, on met à l'épreuve la typologie de profils à travers le comportement du blé, particulièrement pendant la période d'excès d'eau hivernal.

Dans la cinquième partie nous discutons et concluons sur la stabilité du diagnostic de qualité du sol par rapport à la mise en valeur à court et à long terme. Peut-on en déduire des préconisations pour gérer la stabilité structurale et des pronostics d'évolution de la fertilité physique des sols de marais ?

Partie II

Les sols des Marais de l'Ouest : caractéristiques et stabilité structurale.

Cette partie porte sur l'étude du comportement de dispersion du matériau. Les caractéristiques des sols et la classification pédologique qui seront présentées dans le chapitre 1 sont insuffisants pour pronostiquer le comportement au champ. Pour évaluer la stabilité du matériau, nous avons mis au point un test basé sur la dispersion (chapitre 2) qui permet de calculer un Indice de Dispersion (ID). Nous pourrons alors classer les sols par rapport à 3 ensembles de caractéristiques : l'état chimique, l'ID, et la classe pédologique. Nous aboutirons à des familles de sol qui rendent compte de l'évolution des sols (chapitre 3). L'identification des facteurs chimiques responsables de la dispersion nous amènera à établir les lois entre sodicité et dispersion. Nous donnerons enfin les correspondances entre l'ID et les autres mesures de stabilité structurale (Is et K) (chapitre 4).

Chapitre 1. Caractéristiques et classification pédologique.

1. Les caractéristiques des sols de marais

1.1 - Les caractéristiques communes de ces sols :

Texture et nature minéralogique des argiles.

Les sols sont issus de sédiments fluvio-marins. Le «bri», nom local de la terre argileuse de marais ressemble beaucoup aux vases actuelles des schorres. En effet, les conditions de la sédimentation sont restées identiques au cours de la formation du dépôts, (Dupuis et al., 1969 ; Chevallier et al., 1984 ; Ducloux, 1989) ce qui confère au sol des caractéristiques texturales très proches. La granulométrie est très fine : 45 à 60% d'argile, plus de 95 % d'éléments fins (argile et limon), (Toulgoat, 1983). La composition minéralogique de l'argile est, elle aussi, constante. L'argile est riche en illite (50 à 60%) mais aussi en kaolinite et en montmorillonite (20 à 25 %) (Lafon et Verger, 1965 ; Morizet et al., 1970 ; Collas, 1985). Texture et nature des argiles sont pratiquement constantes sur toute la profondeur du profil. De plus spatialement, il n'y a pas de variation significative (Tableau I-5).

Les conséquences chimiques :

La *capacité d'échange cationique* (CEC) du sol est élevée (25 et 30 meq/100g). De plus elle est saturée, CEC = T (capacité totale d'échange cationique). Le *pH* est toujours supérieur à 7 et souvent à 8. Nous avons donc des sols chimiquement riches par rapport aux exigences des plantes : Ca, K, Mg sont abondants. P l'est aussi (Studer et al., 1980).

Les conséquences physiques :

La texture argileuse du matériau d'une part, la nature des minéraux argileux d'autre part confèrent au sol un certain nombre de propriétés physiques et de comportement. Monnier et Stengel (1982) proposent une grille de prévision des propriétés physiques en fonction de la composition granulométrique. Ils pronostiquent un grand risque d'asphyxie et une portance faible à la capacité au champ, une aptitude excellente à la fissuration par gonflement et retrait dans la couche labourée et dans les sous-sols, une stabilité structurale (si on s'en tient aux seuls aspects texturaux) élevée. Cependant ces pronostics supposent des sols ayant une CEC de 40 à 60 meq/100g d'argile granulométrique (ce qui est le cas ici), rendues monoioniques Ca^{++}, pauvres en sels solubles donc ni salées, ni sodiques ; enfin, les conditions de validité concernant la matière organique ont été testées en évaluant séparément l'incidence du taux d'argile d'une part et du taux de matière organique d'autre part sur les propriétés physiques.

Les conséquences hydriques :

La capacité au champ se situe aux environ de pF = 2.8, ce qui correspond à des humidités pondérales de 35 à 40% selon la densité apparente du matériau. Le point de flétrissement permanent (pF = 4.2) correspond à une humidité de 18% à 25% environ (Morizet et al., 1970). Ainsi ces sols possèdent une forte réserve en eau utilisable estimée à 180 mm pour un mètre de profondeur.

1.2 - Les caractéristiques qui différencient les sols.

Les sols diffèrent essentiellement par leur âge [dont la couleur est un indicateur (Garnier, 1975)] et les conditions d'évolution (drainage essentiellement). Ceci se manifeste globalement par des teneurs variables pour la salinité, le sodium échangeable, les taux de calcaire et de matière organique à l'intérieur du profil et spatialement.

Aussi la grille de prévision des propriétés physiques proposée par Monnier et Stengel (1982) devra être revue puisque sodicité, salinité de la solution, teneurs en calcaire et en matière organique sont fortement variables dans les sols des Marais de l'Ouest.

2. Classification et cartographie pédologiques, valeur agronomique.

Les cartographies et études pédologiques des marais réalisées par Callot et Favrot (1965), Dupuis et al. (1969), INRA St Laurent (1969), Wilbert (1978), Salin (1983), Ducloux (1989), reposent sur l'ancienneté du matériau dont les indices sont la couleur, la teneur en calcaire et en matière organique et la salinité. Ces inventaires ont permis d'individualiser trois types de sols : le «bri» gris vert ou «bri» ancien, le «bri» beige ou «bri» récent et le «bri» intermédiaire.

Elles n'ont pu rendre compte de la valeur agronomique des terres. Les causes en sont multiples : densité d'observations, multiples paramètres physico-chimiques, certains ayant des actions antagonistes par rapport à la valeur agronomique des sols : le sodium peut jouer à la fois sur la salinité et la sodicité, le pH peut remettre en cause un équilibre physico-chimique. Enfin les observations d'états structuraux généralement réalisées sur fosse, ne peuvent être multipliées comme les sondages à la tarière.

King (1984) fait un essai de classification des sols par rapport aux variables de comportements spécifiques du marais (stabilité structurale, perméabilité) en intégrant 3 niveaux d'échelle d'analyse : des observatoires pour l'étude fine des comportements, des fosses pour la caractérisation morphologique et analytique des sols et des sondages où seuls quelques caractères rapidement perceptibles sont relevés sur un grand nombre de sites. Il en arrive à une cartographie des comportements correspondant à 3 classes de perméabilité : perméable, peu perméable, imperméable qui correspondent respectivement à un diagnostic fiable, incertain, et très variable à cause de la variabilité spatiale. King signale que pour 60% des sondages on retrouve les références établies sur fosses, mais pour le reste, il existe une grande variabilité de caractères tels que le calcaire total, la salinité qui sont certainement liés aux conditions de sédimentation (multitudes des chenaux, sédimentations temporaires, évolution du littoral...). *Ainsi, sous une apparente homogénéité, le marais est en fait un milieu pédologique très*

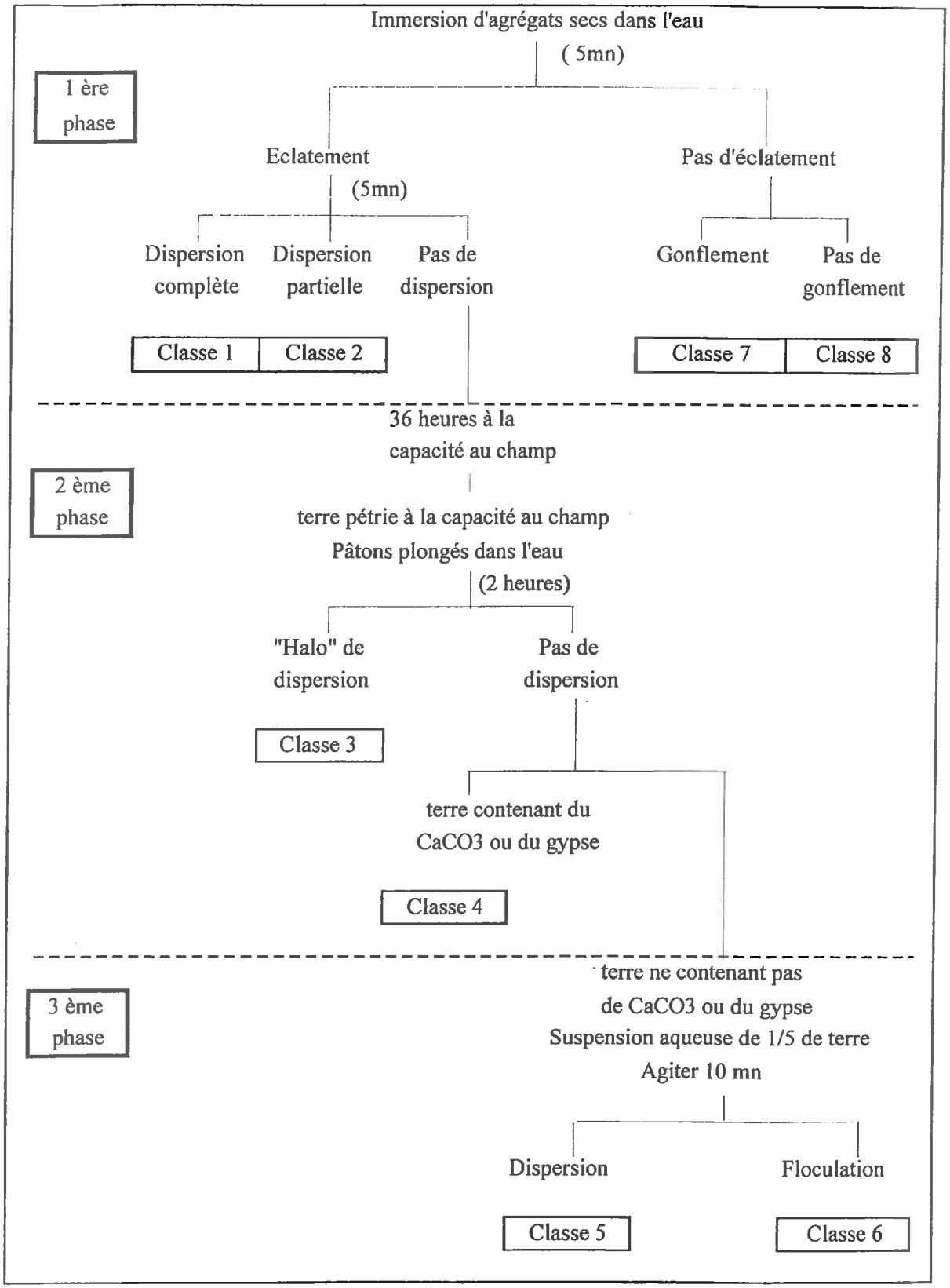


Fig. II-1. Description générale du test d'Emerson.

diversifié lorsqu'on cherche à le caractériser finement (Tournade, 1993).

La tentative d'utiliser la cartographie pédologique pour pronostiquer la valeur agronomique des terrains n'a pas permis de déduire des unités pédologiques identifiées des unités fonctionnelles vis-à-vis du drainage et de la mise en culture. On peut simplement conclure en terme de risque : si le sol a une forte teneur en matière organique, en CaCO3, est peu salé, a une structure polyédrique et si la maîtrise de l'eau est possible, alors le drainage et la mise en culture semblent peu risqués. Par contre si un de ces éléments est défavorable on ne sait plus répondre. Enfin les méthodes d'analyse chimique doivent être adaptées aux sols sodiques (Servant, 1975) sinon, il y a incohérence entre mesure de la CEC et la somme des cations échangeables.

La difficulté de caractériser la stabilité structurale des sols à partir des valeurs prises par les paramètres chimiques nous a amené à mettre au point un test.

Chapitre 2. Mise au point d'un test d'évaluation de la stabilité structurale. L'Indice de Dispersion.

Le but du test est de classer rapidement et simplement les sols par rapport à leur stabilité structurale, sans entrer dans le détail des processus de la stabilité structurale.

1. La mesure de la stabilité structurale par le test d'Emerson.

1.1 - Présentation du test d'Emerson.

Principe et description générale du test.

Ce test est décrit par W.W. Emerson (1967) pour classer les agrégats de sol à partir de leur cohésion dans l'eau. Il a été utilisé par Greenland et al. (1975) pour déterminer les classes de stabilité structurale des sols anglais et gallois. Il se déroule en trois phases (Figure II-1). "Six agrégats de 3 à 5 mm de diamètre, pris au hasard sur un échantillon de sol <u>séché à l'air</u>, sont séparés en deux lots de trois et chaque lot est plongé dans 20 ml d'eau distillée dans un petit bocal de verre ou de plastique à fond plat. Les sols dont les agrégats éclatent sont mis

dans les classes 1 à 6 ; ceux dont les agrégats restent entiers sont dans les classes 7 à 8. Si après cinq minutes les agrégats sont intacts et manifestent un gonflement visible, le sol est en classe 7 ; s'il n'y a ni gonflement ni éclatement, il est en classe 8. Si la dispersion de l'argile est manifestement complète (5 minutes après l'éclatement), le sol est dans la classe 1. Si la dispersion est incomplète, le sol est dans la classe 2." Les échantillons dont les agrégats éclatent mais ne dispersent pas immédiatement sont soumis pendant 72 heures à une tension de 100 cm de succion dans une enceinte. "L'échantillon humide est ensuite pétri avec une spatule, puis on forme des cubes grossiers d'environ 4 mm de côté que l'on plonge dans l'eau distillée comme auparavant. Si après deux heures on peut détecter un "halo" d'argile dispersée autour du matériau du sol, on classe ce sol en 3. Si on ne voit pas de dispersion, on prépare une suspension de 1 pour 5 de sol pétri dans de l'eau distillée que l'on agite circulairement pendant 10 minutes et que l'on laisse reposer pendant 5 minutes. Si la dispersion apparaît après ce traitement plus vigoureux, le sol est classé en 5. S'il reste floculé et ne possède ni CaCO3 ni gypse, il est en classe 6. S'il y a présence de carbonate de calcium ou de gypse, ces sols sont en classe 4."

Prélèvements et conditionnement des échantillons et agrégats

Les prélèvements de sol se font en période hivernale (décembre à avril), lorsque le sol est dans un état humide peu variable (état de gonflement). Ils sont extraits du profil sans lissage, ni compression, ni malaxage. Le séchage du sol se fait à l'air libre à la température du laboratoire pendant un mois environ et le test n'est jamais réalisé dans un délai de plus de 3 mois après le séchage. Il est possible que l'oxydation des sels ferreux en sels ferriques modifient quelque peu les propriétés physiques du matériau.

Les agrégats de 3 à 5 mm sont prélevés au hasard dans les mottes, mais ne doivent pas s'écraser sous les doigts ni comporter d'arêtes trop vives qui se délitent plus facilement et qui peuvent fausser le test d'éclatement. Simultanément, on prélève une motte de 30 à 40 mm au hasard pour évaluer la présence de CaCO3 et observer la présence de gypse cristallisé.

Tableau II-1. Origine des échantillons pour la mise en oeuvre du test d'Emerson et la mise au point de l'Indice de Dispersion.

Bassins de marais :	Poitevin	Charente -Seudre	Marais de Gironde	Autres Marais	Total
Horizons (cm)					
0 - 30	186	184	23	3	396
30 - 60	121	167	16	3	307
60 - 90	79	141	15	2	236
Total	386	492	54	8	939

1.2 - Quelques modifications mineures dans le déroulement du test.

Des modifications ont été apportées au déroulement du test pour des raisons de rapidité, simplicité et de matériel réduit. La technique est décrite par Pons et Martineau (1983).

- L'humidification à la capacité au champ se fait en posant les échantillons 36 heures sur un bloc de mousse imbibé d'eau distillée. Nous prélevons les échantillons dans la zone non saturée de la motte. Ainsi, nous humectons pendant moins de temps et avec une plus faible énergie l'échantillon avant son malaxage.
- La présence de calcaire est estimée par l'intensité de l'effervescence de HCl (N/10) sur une petite motte de terre, la présence de gypse est déterminée par l'observation de sulfate de calcium cristallisé se présentant sous forme de veinules blanches réticulées entre les éléments structuraux.
- On précise l'ampleur des phénomènes par des notes de 0 à 3 pour l'éclatement et de 0 à 4 pour la dispersion pour chaque lot de 3 agrégats.

La mise en oeuvre est simple, facile, rapide, réclamant un matériel peu coûteux. Le test permet dix minutes après la plongée des agrégats dans l'eau de différencier les grandes catégories de comportement des sols par l'observation de l'éclatement, du gonflement et de la dispersion : classes 7 et 8, classes 1 et 2, classes 3 à 6.

2. Premiers résultats du test d'Emerson appliqués aux sols de marais.

Les 939 tests réalisés proviennent d'échantillons prélevés à l'occasion de prospection pédologique en vue de réaliser une carte (Salin, 1983), d'un projet de drainage ou d'études hydrauliques et agronomiques de parcelles mises en culture récemment. La plus grande partie des échantillons viennent des Marais Poitevin et de Charente-Seudre, quelques-uns des Marais de Gironde (Tableau II-1).

Les figures II-2 montrent la répartition des échantillons selon les classes de stabilité pour les horizons 0-30, 30-60, 60-90 cm. Les échantillons étudiés appartiennent à toutes les classes. Cependant on remarque qu'un *très grand nombre d'échantillons sont dans les classes*

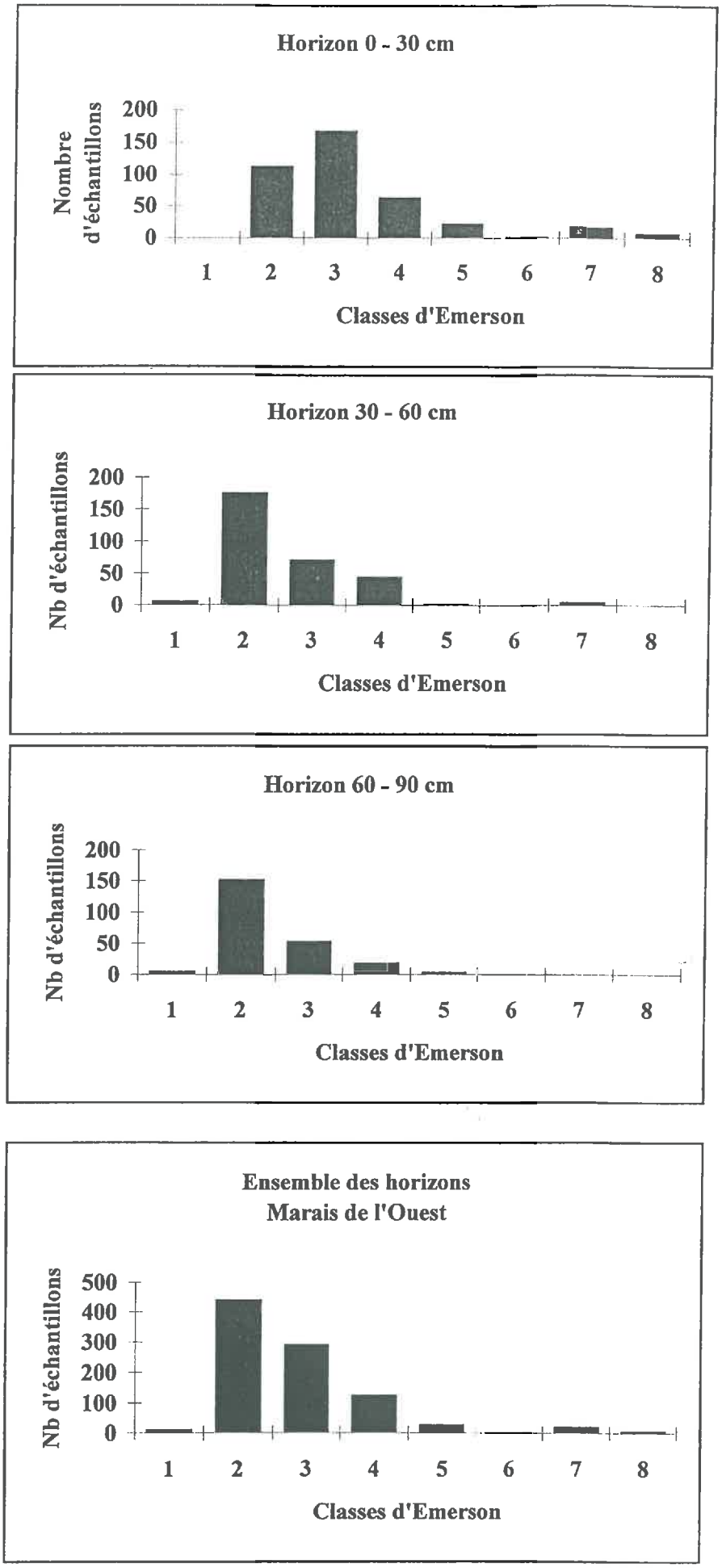


Figure II-2. Histogramme des classes de stabilité structurale pour 939 échantillons de sols de marais.

2 et 3 et donc que la discrimination est faible pour ces deux classes.

Or la limite comportement défavorable/favorable passe entre les classes 3 et 4, ou à l'intérieur de la classe 3. En effet, Greenland et al. (1975) et Emerson (1967) donnent la correspondance entre classes et comportements agronomiques : classes 1 et 2, le drainage-taupe s'effondre ; classe 3, problèmes de stabilité structurale ; classes 4 et 5, "moyennement stables"; classe 6 a un comportement agronomique de sol acide ; classes 7 et 8, vieilles prairies.

Le test divise les sols en larges classes et à l'intérieur de chacune il peut y avoir de grandes différences de stabilité. Ces différences sont probablement importantes dans le comportement des terrains de la classe 3 (Greenland et al., 1975).

3. Discussion sur les résultats du test (Pons, 1983).

- ***Le test présenté par Emerson est dichotomique.*** Les comportements répondent de façon claire et sans aucun doute aux observations d'éclatement, de dispersion et de gonflement. Les réponses sont du type oui/non. Or lorsqu'on réalise les différentes observations, on est conduit à pondérer les phénomènes par des notes pour rendre compte de leur intensité (éclatement et dispersion en particulier), Pons et Martineau (1983).

- ***Le test hiérarchise*** implicitement les phénomènes observés par rapport à un gradient de stabilité structurale supposé. Dans l'ordre du plus stable au plus instable : (1) pas d'éclatement (2) éclatement sans gonflement ni dispersion ; (3) gonflement sans dispersion ; (4) dispersion après traitement de plus en plus vigoureux de l'échantillon .

- ***Vérification de la fidélité du test. Concordance du comportement des deux lots de 3 agrégats.***

En 1 ère phase, sur 2732 lots pour l'éclatement et 1328 pour la dispersion, nous avons trouvé une concordance dans 99.3 et 99.5 % respectivement. Pour le jugement de la dispersion de la deuxième phase, il y a concordance dans 99.3 % des cas. Les comportements observés (éclatement, dispersion) entre deux lots d'agrégats sont remarquablement identiques. On peut dire que la réponse des 2 répétitions est sans ambiguïté dans 99.5% des cas.

- Vérification du classement dichotomique.

Existe-t-il des échantillons qui dispersent en 1 ère phase et ne dispersent pas en 2 ième phase ?

En principe, si la note de dispersion est faible lors de la 1 ère phase, la dispersion devrait être forte lors de la 2 ième phase. Ceci est vrai dans 96% des cas (184 lots étudiés). De plus lorsqu'on note une très faible dispersion lors de la 1 ère phase (voile laiteux autour de petite miettes issues de l'éclatement), on devrait trouver une dispersion significative à la 2 ième phase. Ceci n'est vrai que dans 83 % des cas.

Il est nécessaire de continuer le test lorsque la note de dispersion de la 1 ère phase est très faible à faible pour éviter toute erreur. Dans le cas contraire, on risque de classer des échantillons en classe 2 au lieu de la classe 3 dans 4 à 17% des cas selon que la dispersion dans la 1 ère phase est respectivement très faible ou faible. Nous verrons que l'on peut tenir compte de ces comportements particuliers en introduisant le paramètre "Indice de Dispersion". Est ce que le non éclatement des agrégats exclut obligatoirement la dispersion des 1 ère et 2 ième phases ?

D'après le test, si un lot d'agrégats n'éclate pas 5 minutes après l'immersion, il appartient aux classes 7 ou 8. Ces agrégats ne devraient donc en principe ne jamais disperser. Or pour 18 échantillons classés en 7 et 8 à l'issue de la 1 ère phase, on a fait subir toutes les phases du test. Tous ont dispersé à une phase plus ou moins avancée du test. Ainsi on hésite entre les classes 7-8 et respectivement la classe 2 dans 5 cas sur 18, la classe 3 dans 8 cas sur 18, et les classes 4-5 dans 5 cas sur 18. Ces comportements entraînent une indétermination de classement entre les classes 7,8 et 2/3/4 et 5. Greenland et al. (1975) signalent ce cas et proposent de classer l'échantillon dans la classe la plus basse.

Autant on peut accepter d'hésiter entre deux classes adjacentes, autant il est grave de le faire entre des classes aussi éloignées que 2 et 7-8. Ceci conduit à remettre en cause la dichotomie et la hiérarchie proposée par Emerson.

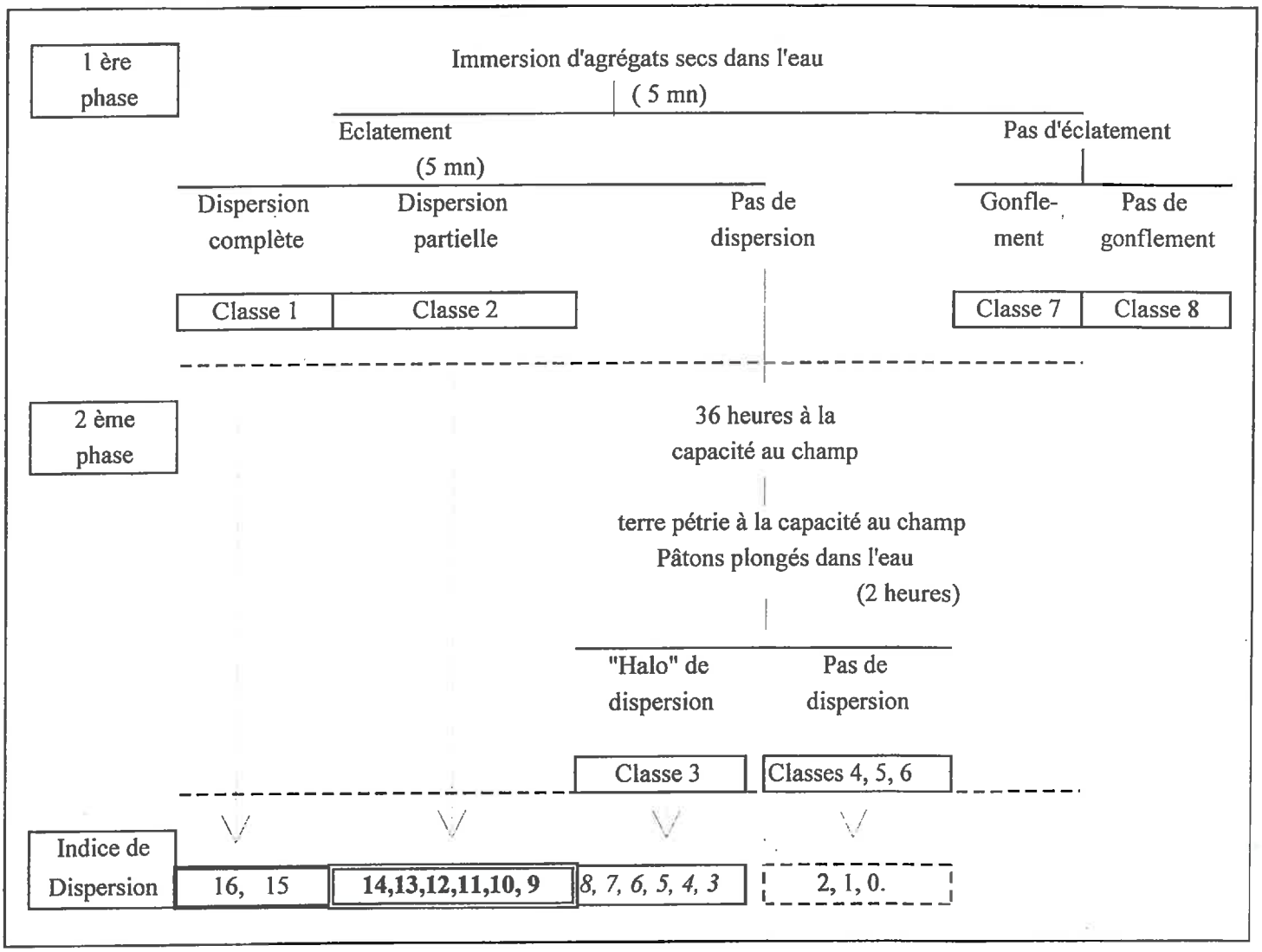


Figure II-3. Correspondances les plus probables entre l'Indice de Dispersion et et les classes du test d'Emerson.

4. L'Indice de Dispersion.

Compte tenu de ces remarques, nous proposons lors de la réalisation du test -a- de distinguer les phénomènes d'éclatement/gonflement, de ceux de dispersion ; -b- d'améliorer la différenciation des comportements des classes 2 et 3, la classe 3 pouvant être la classe charnière entre comportement "stable" et "instable" ; -c- de noter l'intensité de la dispersion dans les phases 1 et 2 du test.

Nous définissons un Indice de Dispersion inspiré de Loveday et Pyle (1973). On juge la dispersion par la note 0, 1, 2, 3 ou 4 selon qu'elle est nulle, très faible, faible, forte, très forte et ceci, pour chaque phase 1 et 2 et chaque lot de trois agrégats. L'Indice de Dispersion peut varier de 0 à 16 maximum. Ainsi, ID = 16 correspond à : en 1 ère phase [4 (note de dispersion max.) x 2 (lots)] + en 2 ième phase [4 (note de dispersion max.) x 2 (lots)] = 16. Ceci définit la classe 1 d'Emerson. ID = 0 correspond à : en 1 ère phase [0 (note de dispersion nulle) x 2 (lots)] + en 2 ième phase [0 (note de dispersion nulle) x 2 (lots)] = 0. C'est la définition des classes 4 ou 5/6 d'Emerson selon la présence ou non de $CaCO_3$ et de $CaSO_4$ dans l'échantillon.

Si la hiérarchie du test d'Emerson est respectée, la figure II-3 montre les correspondances les plus probables entre les classes et l'Indice de Dispersion.

5. Conclusion

Le test conduit à une double classification des échantillons. L'une fondée sur les phénomènes d'éclatement et de gonflement et l'autre sur un Indice de Dispersion allant de 0 à 16. Ce n'est que lorsque nous saurons faire correspondre avec suffisamment de précision les comportements standardisés du matériau avec les comportements au champ que nous pourrons préciser la hiérarchie de la classification. Pour l'instant nous utilisons provisoirement celle d'Emerson et nous fondons le test de comportement des sols à l'eau uniquement sur l'Indice de Dispersion. L'Indice de Dispersion ("ID") permet de classer rapidement et simplement les sols par rapport à leur stabilité structurale sur une échelle allant de 0 à 16 correspondant aux classes 1 à 6 d'Emerson.

Tableau II-2. Les échantillons de sol pour l'étude statistique.
Horizon 1, 2, 3 : profondeur 0-30, 30-60, 60-90 cm.

Nombre d'échantillons	
de l'horizon 1 (H1)	49
de l'horizon 2 (H2)	42
de l'horizon 3 (H3)	27
	118 échantillons issus de 49 profils

Chapitre 3. Typologie de familles de sols définies par leur Indice de Dispersion.

1. Introduction.

On vise à

- décrire la variabilité de l'état chimique des sols, la relier au comportement de dispersion et à la classification pédologique. On en déduira des types puis des familles de sol.
- déterminer les paramètres physico-chimiques les plus pertinents pour réaliser un pronostic de comportement du matériau. On cherche à expliquer le comportement de dispersion du sol par le minimum de paramètres.

2. Matériel et méthodes

2.1 - Choix des échantillons de sol (Tableau II-2).

118 échantillons ont été prélevés sur 49 profils. Ils représentent une large diversité géographique (marais de Gironde, Seudre et Charente, Rochefort, marais poitevin) et d'ancienneté de dépôts. Ils appartiennent à des situations de mises en culture récente et/ou à des études préalables au drainage. Les profils étant peu différenciés sont définis par des horizons de 30 cm désignés par (H1) : 0-30 cm, (H2) : 30-60 cm, (H3) : 60-90 cm. 7 profils comportent le 1 er horizon, 17 les deux premiers horizons et 25 les 3 horizons (et plus).

2.2 - Les variables utilisées pour la caractérisation chimique des sols sont au nombre de 15. Ce sont celles habituellement retenues pour l'analyse des sols salés ou sodiques[1] : pH, teneur en CaCO3, matière organique, conductivité électrique de l'extrait au 1/5 e en mS, le

---

[1] Dans les tableaux de résultats les variables chimiques sont désignées par pH, CaCO3 (teneur en CaCO3 en %), MO (teneur en matière organique en %), CE (conductivité électrique de l'extrait au 1/5 ième en mS), Nas, Ks, Mgs, Cas et Nae, Ke, Mge, Cae, (cations solubles et échangeables en meq/100g), S (somme des cations solubles), T = CEC (somme des cations échangeables), NaT (Nae/T en %), ID (Indice de Dispersion).

Tableau II-3. Démarche pour la recherche des familles de sols et pour la réduction du nombre de variables descriptives : échantillons, variables et techniques utilisés ; résultats et conséquences attendus.

Etapes et objectifs	Echan-tillons	Nbre de variables	Techniques statistiques	Résultats	Conséquences
Etape 1 : Etude de l'horizon H1.					
1- Définition de familles de sol	H1 (N = 49)	16	Matrice de corrélation A.C.P	Identification des variables liées	Définition de familles de sol par rapport à leur comportement et évolution.
2- Réduction du nombre de variables descriptives		8 à 2	Classification automatique sur les * échantillons * variables.	Répartition des échantillons dans plans indépendants. Classification des échantillons et des variables.	Choix des variables de caractérisation.
Etape 2 : Etude de l'ensemble des horizons H1, H2, H3.					
	H1, H2, H3. (N = 118)	16	Evolution de * la matrice de corrélation	Stabilité des corrélations	Généralisation : stabilité des échantillons dans les familles avec un nombre réduit de variables.
		8 à 2	* l'A.C.P , * la classification automatique sur les - échantillons - variables.	Stabilité des familles d'échantillons Stabilité des variables	
Etape 3					
Quantifi-cation	H1, H2, H3. (N = 118)	2 + ID	Régression linéaire multiple	Hiérarchie des variables explicatives.	Relation ID = f(v1, v2).

taux de sodium échangeable par rapport à la capacité d'échange, les cations solubles et échangeables, la somme des cations échangeables et solubles. Les analyses chimiques ont été faites au Laboratoire Centre Atlantique de La Rochelle, les méthodes sont présentées en annexe II-1. On ajoute à ces variables l'Indice de Dispersion, soit (15 + 1) variables.

2.3 - Traitement des données et démarche.

Diverses techniques statistiques ont été utilisées : matrice des corrélations, analyses en composantes principales (ACP), classifications automatiques sur les individus et les variables, régression linéaire multiple. Le logiciel utilisé est STATITCF.

Elles ont été mises en oeuvre dans la démarche résumée dans le tableau II-3. On fait l'hypothèse que la variabilité de l'état chimique du premier horizon H1 est du même ordre que celle rencontrée pour l'ensemble des horizons (H1, H2, H3). Une *première étape* utilise les échantillons de H1 pour définir des familles d'échantillons d'une part et pour réduire le nombre de variables descriptives d'autre part. Familles et variables doivent rendre compte le mieux possible de la dispersion du matériau et de la classification pédologique. Pour cela nous réalisons successivement *la matrice de corrélations, *une ACP et *une classification automatique sur les 49 échantillons de H1 et sur les 16 variables (15 variables chimiques et ID).

A partir de la matrice de corrélation, nous identifions et classons les variables les plus liées soit positivement soit négativement.

L'ACP sur les variables montre les liaisons, les oppositions et les indépendances entre variables à travers leur position dans les plans principaux. La projection des individus sur ces plans permet de positionner les divers échantillons de sol par rapport à la combinaison des variables dont les plans sont issus. On groupe alors par proximité les échantillons de sol.

La classification automatique classe les échantillons par rapport à leurs distances mathématiques. On peut regrouper par proximité les classes obtenues à partir de la troncature de la hiérarchie. *Ce regroupement est guidé par l'état chimique, le comportement de*

dispersion et l'origine (géographique et pédologique) des échantillons. Il aboutit à définir des familles de sol. Les familles d'échantillons peuvent elles même se rassembler en fonction de leur seul comportement de dispersion. On définit alors les types de sol : types instables, stables, intermédiaires.

Pour réduire le nombre de variables et garder les plus pertinentes nous les choisissons en fonction :

- des résultats de l'ACP concernant la formation des axes,
- des résultats de la classification automatique sur les variables qui permet de dégager les classes les plus indépendantes possibles,
- des résultats de la matrice de corrélations,
- des variables les plus faciles à mesurer ou à estimer.

On aboutit à tester la stabilité de la composition initiale des familles (obtenue avec 16 variables) avec 8 puis 6, 4, 3 et 2 variables.

Une *deuxième étape* vise à vérifier que la variabilité de l'état chimique de l'ensemble des horizons (H1, H2, H3) est du même ordre que celle trouvée pour les horizons H1 d'une part et que la réduction du nombre de variables n'a pas d'effet sur la stabilité des familles. Nous recommençons alors l'étude de la matrice de corrélations, puis des ACP suivies de classifications automatiques sur les 118 échantillons des horizons H1, H2, H3 et sur les 16 variables (15 variables chimiques et ID).

Les principaux résultats des calculs des étapes 1 et 2 sont respectivement en annexes II-2 et II-3.

On déduit de ces deux étapes des relations d'ordre existant entre les horizons d'un même profil. On définit alors des profils types classés par ordre de stabilité.

La *troisième étape* est de quantifier la relation entre ID et les variables les plus explicatives.

On utilise la régression linéaire multiple pour expliquer la variable ID par des variables

Tableau II-4. Corrélation entre les variables descriptives des échantillons (H1, N = 49). Classement par ordre décroissant et selon le signe de la liaison.

	Corrélation positive		Corrélation négative	
1	NaT et Nae	0.989	Cae et Ke	-0.709
2	Cae et T	0.985	CaCO3 et Mge	-0.681
3	MO et T	0.971	T et Ke	-0.652
4	MO et Cae	0.943	MO et Ke	-0.612
5	NaT et Nas	0.884	Cae et Mge	-0.602
6	Nas et Nae	0.883	Cas et Mge	-0.583
7	CE et Nae	0.798	Mge et T	-0.5
8	CE et Nas	0.792	Cae et ID	-0.484
9	CE et NaT	0.771	NaT et Cae	-0.458
10	Cas et S	0.759	Cas et ID	-0.447
11	ID et Nae	0.752	...	...
12	ID et Mgs	0.739	CaCO3 et ID	-0.4
13	ID et NaT	0.725		

Tableau II-5. Définition des familles de sol par regroupement des classes mathématiques selon l'Indice de Dispersion (ID) et la classification pédologique en utilisant les seuls horizons de surface (H1). Ci : ième classe mathématique issue de la classification automatique.

Classe mathématique		Stabilité structurale		Pédologie		Familles	
C i	Nb échant		% classe		% classe		
C5	2	Instable	100	bri récent	100	F1	Familles instables
C6	3	Instable	100	bri intermédiaire	100	F2	
C3	2	Instable	100	bri intermédiaire	100		
C17	1	Instable	100	bri intermédiaire	100		
C4	1	Instable	25	bri intermédiaire	25		
C1	4	intermédiaire	100	bri récent	100	F3	Familles intermédiaires
C4	2	intermédiaire	50	bri récent	50		
C16	2	intermédiaire	100	bri récent	67		
C7	1	intermédiaire	100	bri récent	50		
C16	1	intermédiaire	100	bri intermédiaire	33	F4	
C4	1	intermédiaire	25	bri intermédiaire	25		
C7	1	intermédiaire	100	bri intermédiaire	50		
C2	13	Stable	100	bri récent	81	F5	Familles Stables
C2	2	Stable	100	bri intermédiaire	13		
C8	2	Stable	100	bri ancien	100		
C2	1	Stable	100	bri ancien	6	F6	
C13	1	Stable	100	bri ancien	100		
C9	2	Stable	100	bri	100	F7	
C10	2	Stable	100	ancien	100		
C12	2	Stable	100	humifère	100		
C11	1	Stable	100	à	100		
C14	1	Stable	100		100		
C15	1	Stable	100	tourbeux	100		

explicatives (régresseurs). On réduit le nombre de régresseurs par la technique de régression progressive dans laquelle on introduit dans un premier temps les variables pas-à-pas en se donnant 100% de probabilité à l'introduction des variables. Il en résultera des variables classées par rapport au gain d'information qui explique l'ID. On peut alors montrer l'évolution du coefficient de détermination de ID avec l'ensemble des 15 puis 7, 5, 3 et 2 variables explicatives (les mêmes qui ressortent des étapes 1 et 2).

3. Résultats

3.1 - Horizon H1 : corrélations entre variables et classification des échantillons.

Corrélations entre variables.

L'étude de la matrice de corrélation aboutit au tableau II-4. Les variables qui sont positivement et fortement corrélées sont celles liées au sodium et à la salinité (NaT, Nae, Nas, CE), et celles liées à la capacité d'échange (MO et Cae). Enfin, de façon plus atténuée, le Cas est corrélé à la quantité de cations solubles (S).

Globalement, les valeurs des corrélations négatives sont plus faibles que celles des corrélations positives. Les valeurs des variables indicatrices du calcium (CaCO3, Cas) varient de façon opposée à celles du magnésium (Mge). De même les valeurs de Ke d'une part et de MO, CEC, Cae d'autre part.

L'ID est corrélé positivement au groupe des variables liées au sodium (0.752 et 0.752 respectivement pour Nae et NaT) et aux variables liées au magnésium de façon presque identique (0.739 et 0.635 respectivement pour Mge et Mgs).
Par contre, l'ID est corrélé négativement avec les variables liées au calcium (Cae, Cas, CaCO3).

On note que plus la teneur en MO est forte, plus les valeurs de la CEC et du Cae sont élevées et plus la teneur en Ke est faible. Ces relations proviennent des échantillons humifères à tourbeux des marais mouillés. Ces sols les plus anciennement formés, proches des rivières et fleuves, sont riches en MO, en CaCO3 et ont été fortement lessivés par les eaux douces. Ceci

Tableau II-6. Caractéristiques chimiques et Indice de Dispersion de l'horizon 1 (0-30 cm) pour les diverses familles de sols de marais.
m : moyenne ; e.t : écart-type

Com-porte-ment	Fa-mil-le		ID	Na/T %	CE 1/5 mS	Ca-CO3 %	MO %	pH	Sels solubles Ca++	Mg++	Na+	K+	Som-me solu	Bases échangeables Ca++	Mg++	Na+	K+	T	Emer-son classe
									meq/100g					meq/100g					
Instable	1	m	12.0	33.4	1.0	9.3	1.6	9.1	2.3	1.8	2.6	0.3	7.0	8.0	5.9	8.4	3.0	25.2	2
		e.t	0.0	3.3	0.2	1.8	0.1	0.1	2.0	0.5	0.7	0.0	1.8	0.3	1.9	0.4	0.0	1.2	
Instable	2	m	14.5	14.6	0.4	1.3	4.1	8.2	2.3	2.8	1.4	0.1	6.7	16.2	8.0	4.2	1.7	30.0	1 et 2
		e.t	1.8	5.4	0.1	2.3	1.7	0.6	1.6	0.9	1.6	0.1	3.7	4.5	1.6	1.2	0.2	5.1	
Instable à	3	m	9.0	9.7	0.3	8.1	2.4	8.4	1.6	1.2	0.4	0.2	3.3	18.2	6.4	2.3	1.9	28.7	2 et 3
		e.t	2.2	7.0	0.1	2.7	0.9	0.4	0.5	0.6	0.2	0.2	0.9	4.4	1.8	0.9	0.6	2.7	
inter-médiaire	4	m	7.2	2.9	0.2	0.7	3.7	7.8	2.3	0.8	0.1	0.1	3.2	17.1	7.6	0.8	1.3	26.7	3
		e.t	1.8	1.2	0.1	0.8	1.3	0.7	2.5	0.3	0.0	0.0	2.8	7.8	1.6	0.2	0.3	7.8	
Stable	5	m	0.8	1.5	0.2	6.5	2.6	8.1	3.3	0.7	0.0	0.0	4.1	24.8	4.7	0.5	1.5	31.4	4
		e.t	1.3	0.6	0.1	2.7	0.9	0.2	1.6	0.2	0.1	0.0	1.7	1.7	1.1	0.2	0.3	1.9	
Stable	6	m	0.7	1.8	0.2	15.7	5.3	8.3	3.8	0.6	0.0	0.0	4.5	34.9	2.3	0.7	0.6	38.5	4 ou +
		e.t	1.2	1.3	0.0	13.4	0.2	0.1	1.1	0.6	0.0	0.0	1.6	2.6	2.0	0.6	0.3	4.0	
Très stable	7	m	1.8	0.8	0.4	11.5	18.2	7.8	5.0	0.4	0.0	0.0	5.4	67.8	2.4	0.5	0.5	71.4	4 à 7
humifère à tourbeux		e.t	2.7	0.3	0.2	3.8	8.1	0.2	0.7	0.1	0.0	0.0	0.7	19.0	1.0	0.3	0.2	19.5	

Tableau II-7. Nombre et nature des variables retenues pour tester la stabilité de l'appartenance des échantillons (H1) aux familles de sols. En passant de 16 à 2 variables, les échantillons qui ont changé de famille sont au nombre de 8 soit 8/49 # 20 %.

Nombre de variables	Nature des variables retenues indicatrices de : la sodicité	de calcium et de la CEC	des conditions d' évolution.	Nbre d'échantillons ayant changé de famille (cumul %)
16	Na/T, Nae, Nas ID (Mge), (Mgs)	(CaCO3), Cae, Cas CEC, MO Ke, Ks, (Mge), (Mgs)	CE, pH, (CaCO3), S	
8	ID, Na/T	CaCO3, MO, Mge, Mgs	CE, pH	3 (6 %)
6	ID, Na/T	CaCO3, MO	CE, pH	1 (8%)
5	ID	CaCO3, MO	CE, pH	3 (14 %)
4	ID	CaCO3, MO	CE	0 (14 %)
3	ID	CaCO3	CE	3 (20 %)
3'	ID	CaCO3	pH	0 (20 %)
2	ID	CaCO3		0 (20 %)

explique notamment la réduction du taux de potassium échangeable avec la teneur en matière organique (Pons et al., 1989).

L'ACP (Annexe II-2) montre que le plan 1-2 explique 67 % de la variation. Il est défini surtout par la sodicité, la présence de calcium, les ions solubles et la salinité, ainsi que les caractéristiques de capacité cationique (T, MO). Le deuxième plan 3-4 qui représente 19 % de la variation, illustre l'influence du CaCO3 et du pH. On note que l'ID est fortement lié à l'axe 1 (-0.741) faiblement à l'axe 2 (-0.151), moyennement à l'axe 3 (0.300).

Classification des échantillons.

La projection des points sur les plans 1-2 et 3-4 permet de positionner les divers échantillons par rapport à la combinaison des variables dont les plans sont issus (Annexe II-2). Le tableau II-5 montre le regroupement des classes mathématiques selon le comportement de dispersion et la classification pédologique. On définit ainsi 7 familles dont les caractéristiques chimiques sont présentées dans le tableau II-6.

Effet de la réduction du nombre de variables sur les résultats de la classification.

On teste la stabilité de la classification initiale (obtenue avec 16 variables) avec 8 puis 6, 4, 3 et 2 variables (Tableau II-7). Les 8 variables sont : Na/T et ID indicatrices de la richesse en sodium ; MO, CaCO3, Mge, Mgs indicatrices de la capacité d'échange, de la richesse en calcium et de son "opposé" le magnésium ; enfin pH et CE indicatrices des conditions d'évolution chimiques. On élimine le Mge et le Mgs pour obtenir 6 variables, puis le Na/T pour 5, puis le pH pour 4, puis la MO pour 3, puis la CE pour 2.

Le tableau II-7 précise le nombre d'échantillons qui ont changé de familles à chaque réduction du nombre de variables. En passant de 16 à 2 variables, le % cumulé d'échantillons ayant changé de famille est de 20. Plus précisément, lorsqu'on passe de 16 à 8 variables, il est de 6 % ; de 8 à 6 variables, il est de 2 % ; de 6 à 5, il est de 6 % ; 5 à 4, il est de 0% ; 4 à 3, il est de 6% ; 3 à 2, il est de 0%. Ce sont les échantillons qui sont à la limite de deux familles qui passent aux familles adjacentes.

3.2 - Les familles de sol (Tableaux II-5 et II-6).

Les familles représentent une classification des sols qui tient compte à la fois de la classification automatique, du comportement de dispersion, de la classification pédologique (Tableau II-5) et de l'état chimique (Tableau II-6).

- Familles de sol et dispersion.

On regroupe les familles en trois grands *types de sol* vis-à-vis du comportement de dispersion.

Type instable. Ce sont les familles 1 et 2. Elles ont un taux de sodium élevé à très élevé (Na/T >10%) et des taux de calcaire très variables. La famille 1 est marquée par une sodicité et un pH très élevé (>9), un taux de calcaire élevé (9%), un taux de MO faible (1,6%), une salinité élevée (1 mS). La famille 2 a une sodicité élevée (15%) mais un taux de calcaire faible à nul (1%). La salinité est faible (0,4) alors que la somme des sels solubles est élevée (6,7). Les valeurs de Mgs et Mge sont souvent élevées. *L'ID est supérieur ou égal à 12.*

Type stable. Ce sont les familles 5, 6 et 7. Elles ne sont pas sodiques (Na/T < 2%) et ont toutes un taux de calcaire moyen à élevé (6%). Deux de ces familles (6 et 7) sont marquées par le taux élevé de matière organique (5%). La classe 5 a une teneur moyenne à faible de la matière organique (2,8%). *L'ID est toujours inférieur à 4.*

Type intermédiaire = risque important de dispersion. Ce sont les familles 3 et 4. Elles ont un taux de sodium inférieur à 10%. La famille 3 se trouve proche de la 1 mais avec un taux de sodium plus faible (de l'ordre de 10 %). La famille 4 est proche de la 2 avec un taux de sodium très faible (3%) et une teneur en calcaire nulle. Ce sont des sols fragiles qui ont de fort risque de dispersion. La famille 3 a des risques plus grands (ID>= 8) que la 4 (ID>= 6).
Les familles sont ordonnées par rapport à leur degré de dispersion :
familles 1 # 2 > 3 # 4 > 5, 6, 7.

- Familles de sol, classification pédologique et état chimique.

La *famille 1* appartient aux «bris» récents isolés depuis peu de temps de l'influence de la mer et ayant un drainage aléatoire. Les échantillons sont très sodiques et salés [(Na/T > 30%, CE = 1, Nae très élevé, somme des sels solubles élevée (due à l'importance du Nas)], pH

très élevé (> 9), calcaires (9%), MO faible à très faible (1,6%), ID élevé (12), sols à comportement dispersant à très dispersant, classe 2 d'Emerson.

La *famille 2* appartient aux «bris» dits "intermédiaires" : dépôts plus anciens mais situés dans des zones géographiques à assainissement et drainage naturels difficiles (Vendée nord des îles, Rochefort nord). Les échantillons sont sodiques (Na/T > 10 %), non salés (mais la somme des sels solubles est élevée), peu ou pas calcaire (1%), MO assez élevée (> 3,5%), teneurs en Mgs et Mge souvent élevées (2,8 et 8 respectivement), ID très élevé (15), sols très dispersants, classes 1 et 2 d'Emerson.

La *famille 3* appartient aux «bris» récents après protection des eaux salées, assainissement et drainage modéré. Les échantillons sont faiblement sodiques (Na/T # 10%), non salés (0,3 mS), calcaires (8%), MO moyenne à faible (2,4%), ID élevé (9), sols avec risques importants de dispersion, classes 2 et 3 d'Emerson.

La *famille 4* appartient aux «bris» intermédiaires soumis à des conditions d'assainissement et de drainage moyennes à médiocres. Les échantillons sont très faiblement sodiques (Na/T # 3%), non calcaires (1%), Mgs et Mge représentant 25 % de la somme des solubles ou des échangeables, MO pouvant être élevée (3,7), ID moyen (7), sols fragiles, risque de dispersion, sols intermédiaires (entre dispersants et stables). Classe 3 d'Emerson.

La *famille 5* appartient aux «bris» récents (pour la majeure partie des échantillons) après protection contre les eaux salées, assainissement et drainage efficace (Polders de la baie de l'Aiguillon) et aux «bris» anciens (pour quelques échantillons) après avoir bénéficié de conditions d'évolution en eau plutôt douce et de situations d'assainissement et de drainage efficaces. Les échantillons sont non sodiques (Na/T = 1,5%), calcaires (7%), MO moyenne (2,6%), dominance des sels ou des cations calcium, ID nul, sols stables (non dispersants), classe 4 d'Emerson.

La *famille 6* appartient aux «bris» enrichis en matière organique par les conditions d'hydromorphie particulières qui se sont développées le long des fleuves. Ce sont les zones actuelles ou anciennes de marais mouillé. Les échantillons sont non sodiques (Na/T = 1,8%),

calcaires (16%), MO élevée 5% environ ce qui entraîne une CEC élevée (38 meq/100g), forte proportion de Ca dans les sels solubles et échangeables, ID nul, sols non dispersants donc stables, classe 4/5 d'Emerson.

La *famille 7* appartient aux «bris» anciens humifères à tourbeux ; ces sols inondés en hiver lors des crues des rivières sont caractéristiques des marais mouillés. Les échantillons sont non sodiques (Na/T = 1%), calcaires (12%), MO très élevée(MO >10%), ID faible à nul, sols stables non dispersants. Ils appartiennent pour la presque totalité des échantillons à la classe 7 d'Emerson (les agrégats secs n'éclatent pas dans l'eau bien qu'il y ait parfois faible dispersion ID = 0 à 6).

- Familles de sol et évolution pédologique.

Ces familles peuvent être comparées en terme de conditions de formation et d'évolution c'est-à-dire en *trajectoire d'évolution.*

Trajectoire 1. La famille 5 est issue de la 3 qui elle même est issue de la 1 [ancienneté famille 1 < famille 3 < famille 5]. C'est la trajectoire des «bris» récents soumis à des conditions d'assainissement et de drainage de plus en plus favorables après isolement de la mer (Cas des Polders de la baie de l'Aiguillon). Elle se traduit au point de vue chimique par une *dessalinisation*, une forte *désodisation*, une chute importante du pH (9 à 8,1), dans un matériau *riche en calcaire*. Les autres paramètres évoluent plus modestement : augmentation de la teneur en matière organique (et donc de la CEC), réduction du taux de calcaire.

Trajectoire 2. Les familles 2, 4 et 5 sont issues de dépôts plus anciens [ancienneté famille 2 < famille 4 < famille 5]. C'est la trajectoire des «bris» intermédiaires qui aboutit aux «bris» anciens. Elle se manifeste uniquement par la *désodisation* dans un matériau *pauvre en calcaire*, dessalé où le taux de matière organique est assez élevé. Selon la qualité des conditions d'assainissement, de drainage et d'ambiance plus ou moins saumâtre des eaux en excès, elles ont consommé plus ou moins totalement leurs réserves calciques dans les échanges avec le sodium. Le résultat est donc fonction de l'histoire des conditions d'assainissement et de drainage.

Trajectoire 3. Les familles 5, 6, 7 représentent la trajectoire des «bris» anciens évoluant dans un confinement de plus en plus important d'hydromorphie en eau douce [ancienneté famille 5 < famille 6 < famille 7]. Elle se traduit essentiellement par une forte *augmentation des teneurs en matière organique* (et donc de la CEC) et en calcaire dans un matériau dessalé et désodé. Elle est particulière au marais mouillé (actuel ou ancien). L'hydromorphie saisonnière en eau douce (crues hivernales) conduit à un enrichissement en matière organique (pouvant aller jusqu'à des formations tourbeuses) et à un lessivage des cations les plus mobiles (sodium et potassium notamment). De plus l'apport possible de calcium issu des formations géologiques proches aboutit à un taux de calcaire parfois élevé.

La famille 5 est commune aux trois trajectoires, elle est le stade final de l'évolution des «bris» récents et le stade initial des «bris» anciens et tourbeux.

Le caractère essentiel des trajectoires 1 et 2 (marais desséché) est la *désodisation,* celui de la trajectoire 3 (marais mouillé) est *l'humification.* Ceci confirme les hypothèses de Nijs (1968) et de Ducloux (1989) quant à la formation et l'évolution des sols de marais. On montre aussi le parallélisme étroit entre classification-évolution pédologique d'une part et état-évolution chimique d'autre part. La classification pédologique n'est pas prédictive par rapport au comportement de dispersion (type de sol).

- Discussion et conclusions.

L'étude réalisée sur 49 échantillons de l'horizon 1 montre de fortes liaisons entre variables chimiques : liaisons entre variables indicatrices de la richesse en Na (Nae, Nas, CE) d'une part, et entre variables indicatrices de la teneur en Ca d'autre part. On constate de plus, que la teneur en magnésium devient importante lorsque la teneur en calcaire ou en Ca est faible.

Les relations entre T et la teneur en MO d'une part, et la teneur en Cas et Ke d'autre part, s'expliquent par le nombre relativement important d'échantillons provenant de diverses zones du marais mouillé.

Tableau II-8. Evolution de la valeur des corrélations avec la profondeur.
Encadré : maintien de la liaison avec la profondeur.

	Valeur de la corrélation pour les échantillons des horizons			
		H1	H2	H3
Corrélation entre				
> 0 r > 0,700	Na/T et Nae	**0,989**	**0,957**	**0,976**
	Cae et T	**0,985**	**0,923**	**0,862**
	MO et T	**0,971**	**0,925**	**0,952**
	MO et Cae	**0,943**	**0,877**	**0,833**
	Na/T et Nas	**0,884**	**0,765**	0,631
	Nas et Nae	**0,883**	**0,800**	0,630
	CE et Nae	**0,798**	**0,774**	0,550
	CE et Nas	**0,792**	**0,866**	**0,920**
	CE et Na/T	**0,771**	**0,726**	0,519
	Cas et S	**0,759**	0,395	0,313
	Nae et ID	**0,752**	**0,769**	**0,838**
	Mgs et ID	**0,739**	**0,796**	**0,834**
	Na/T et ID	**0,725**	**0,790**	**0,880**
< 0 r > 0,450	Cae et Ke	**-0,709**	**-0,651**	**-0,689**
	CaCO3 et Mge	**-0,681**	**-0,620**	**-0,646**
	Ke et T	**-0,652**	-0,441	-0,297
	MO et Ke	**-0,612**	-0,364	-0,310
	Cae et Mge	**-0,602**	**-0,546**	**-0,543**
	Cas et Mge	**-0,583**	-0,353	-0,272
	Mge et T	**-0,500**	-0,336	-0,144
	Cae et ID	**-0,484**	**-0,549**	**-0,634**
	Na/T et Cae	**-0,458**	**-0,605**	**-0,678**
	CaCO3 et ID	**-0,400**	**-0,713**	**-0,645**

Enfin, on met en évidence la liaison positive entre l'ID et les teneurs en Na et Mg d'une part, et la liaison négative entre l'ID et les indicateurs de richesse en Ca.

L'étude descriptive réalisée par l'ACP et la classification automatique aboutit à une agrégation plus "objective" des échantillons ; cette classification combinée à une connaissance géographique et pédologique d'une part et au comportement de dispersion des sols d'autre part, permet de définir des familles d'échantillons. Celles ci peuvent être regroupées par rapport au comportement de dispersion en types de sol : types stables, intermédiaires, instables. Elles peuvent être comparées entre elles en terme de conditions de formation et d'évolution du matériau c'est-à-dire de trajectoires d'évolution. Ceci nous permet d'établir le parallélisme entre classification-évolution pédologique d'une part et état-évolution chimique d'autre part et de montrer la liaison médiocre voire mauvaise entre classification pédologique et comportement de dispersion des sols.

On peut réduire de 16 à 8 et même à 6 (ID, Na/T, CaCO3, MO, CE, pH) le nombre de variables sans que la distinction en familles ne soit remise fortement en cause. En réduisant au delà de 6, les familles perdent quelque peu leur spécificité pédologique au profit du comportement de dispersion. On aboutit alors à mélanger des échantillons ayant un même degré de dispersion alors que les causes sont différentes : ID = 13 peut être dû à un taux moyen de Na ou à un taux élevé de Na dans un milieu salé ; ID = 0 peut être dû à une sodicité nulle ou faible associé ou pas à un taux de MO élevé (mélange dans les sols stables de sols tourbeux). On perd un peu de précision dans la classification pédologique. Avec simplement 2 variables (ID et CaCO3), nous conservons encore une bonne distinction des familles (20 % des échantillons ont changé de famille, mais seulement 6% ont changé de type de comportement).

3.2 - Les résultats obtenus avec H1 sont ils vérifiés lorsque on utilise les autres horizons des profils ?

- Evolution de la matrice de corrélation avec la profondeur.

Certaines corrélations mises en évidence avec les échantillons de surface se maintiennent avec

Tableau II-9. Caractéristiques chimiques et Indice de Dispersion pour les diverses familles de sols de marais. Ensemble des horizons (N=118).
m : moyenne ; e.t : écart-type ; n : nombre d'échantillons par famille

Com-porte-ment	Fa-mil-le		ID	Na/T %	CE 1/5 mS	Ca-CO3 %	MO %	pH	Sels solubles Ca++	Mg++	Na+	K+	Som-me solu	Bases échangeables Ca++	Mg++	Na+	K+	T
										meq/100g					meq/100g			
Instable	1	m	11.8	33.0	1.5	6.3	0.9	8.9	1.8	2.4	4.9	0.5	9.5	6.6	8.5	8.5	2.3	25.9
	n=22	e.t	2.8	6.8	1.3	3.5	0.4	0.3	1.7	0.9	5.2	0.4	6.0	3.1	2.2	2.0	0.6	3.4
Instable	1'	m	9.0	21.1	1.1	12.3	1.0	8.7	2.4	1.4	1.8	0.1	5.7	12.5	6.5	6.0	1.6	26.6
	n=6	e.t	1.5	5.1	0.8	1.6	0.4	0.4	1.7	0.8	1.1	0.1	2.8	2.4	2.1	1.8	0.9	0.9
Instable	2	m	15.1	18.3	0.7	1.3	2.7	8.5	2.8	3.1	1.2	0.1	7.3	13.6	7.5	4.9	1.7	27.8
	n=11	e.t	1.4	9.9	1.8	3.9	2.0	3.5	9.0	1.9	1.5	1.0	11.5	7.7	4.7	1.9	1.9	5.0
inter-	3	m	7.7	8.9	0.4	8.3	2.0	8.4	2.4	1.3	0.4	0.1	4.2	17.6	6.8	2.5	1.5	28.3
médiaire	n=11	e.t	3.4	4.1	0.3	3.9	1.1	0.3	1.4	0.5	0.2	0.2	1.7	3.8	1.7	1.1	0.5	2.4
inter-	4	m	7.3	3.4	0.2	1.6	3.3	7.9	2.2	0.9	0.1	0.1	3.2	15.4	8.3	0.9	1.3	25.8
médiaire	n=6	e.t	1.6	1.6	0.0	2.3	1.5	0.7	2.3	0.4	0.0	0.0	2.5	8.2	2.2	0.3	0.3	7.3
Stable	5	m	0.7	2.5	0.3	9.2	1.8	8.3	3.3	0.8	0.1	0.1	4.2	22.7	5.4	0.7	1.3	30.1
	n=36	e.t	1.2	1.6	0.2	3.6	1.0	0.2	1.5	0.2	0.1	0.0	1.6	3.0	1.8	0.5	0.4	2.6
Stable	6	m	1.0	1.8	0.2	17.4	3.8	8.2	4.0	0.4	0.0	0.0	4.5	34.3	1.8	0.7	0.5	37.2
	n=7	e.t	1.5	1.3	2.1	7.7	9.3	3.9	1.7	1.9	0.4	0.1	17.1	17.8	17.0	1.3	0.5	3.0
Très stable humifère	7	m	1.3	1.3	0.4	12.8	13.8	7.9	4.7	0.5	0.0	0.0	5.3	55.3	2.9	0.7	0.5	59.4
à tourbeux	n=19	e.t	2.2	0.8	0.4	5.8	10.8	0.4	1.9	0.3	0.1	0.0	2.1	24.1	1.4	0.5	0.2	24.8

Tableau II-10. Evolution de la composition des familles lorsqu'on passe de 16 à 6 variables (N = 118 échantillons)

Compor--tement	Famille avec 16 variables		Echantillons ayant changé de famille avec 6 variables	
		Nb	Nb	cumul %
Instable	1	22	2	2
	2	11	0	2
	1'	6	1	3
intermé--diaire	3	11	0	3
	4	6	0	3
Stable	5	36	1	3
	6	7	6	8
Stable humifère à tourbeux	7	19	1	11
Total		118	13	11

les échantillons des horizons plus profonds (Tableau II-8). Les corrélations positives qui se maintiennent sont Na/T x ID, Na/T x Nae, CE x Nas, MO x T, MO x Cae, Mgs x ID, Cae x T, Nae x ID. Les négatives sont Na/T x Cae, CaCO3 x Mge, Cae x ID, Cae x Mge, Cae x Ke.

La liaison positive et forte entre sodium échangeables et solubles qui se décline en Na/T x Nas, CE x Nae, CE x Na/T en H1 devient beaucoup plus faible pour les horizons profonds ; de même la liaison Cas x S disparaît. Les corrélations négatives qui disparaissent sont celles qui font intervenir Ke d'une part et MO et T d'autre part. On ne trouve plus en profondeur une aussi forte richesse en MO et des teneurs faibles en Ke. De même disparaissent les liaisons mettant Mge et T d'une part et Cas d'autre part.

- Stabilité des familles.

Les caractéristiques moyennes des familles sont très voisines (Tableau II-9) de celles trouvées pour le 1 er horizon. S'il y a variations, elles sont peu marquées et se manifestent par -a- une augmentation de la salinité (CE et S) pour les familles 1 et 2, de Na/T pour la famille 2 ; -b- une diminution de la teneur en MO et donc de T pour toutes les familles.

L'élément nouveau c'est l'apparition d'une classe 1' intermédiaire des familles 1 et 3 que nous inclurons dans les familles à comportements dispersants.

- Incidence de la réduction du nombre variables sur la stabilité des familles.

Les résultats sont proches de ceux obtenus avec H1. Le nombre d'échantillons qui change de familles est de 13 (soit 11%) lorsqu'on passe de 16 à 6 variables (Tableau II-10). La réduction à 6 variables ne remet pas fortement en cause la distinction en familles. S'il y a changement de famille, il se fait pour une famille adjacente. La famille 6 éclate et se répartit à peu près à égalité entre les familles 5 et 7. Ce sont les échantillons à la limite de plusieurs familles qui passent aux familles adjacentes.

- Caractéristiques des familles de sol issues des 118 échantillons.

On peut répéter ce que nous avons fait pour les échantillons de l'horizon 1 (Tableau II-9). On est amené à définir une famille supplémentaire 1', intermédiaire entre 1 et 3. Les valeurs des paramètres sont intermédiaires en ce qui concerne le Na/T (#21%), la salinité (CE

Tableau II-11. Familles de sols (1, 1', ..., 7) et stabilité (S : stable ; i : intermédiaire ; I : instable) des horizons constituant les 42 profils étudiés.

Type de profil	Stable															Intermédiaire						Instable		
Nombre	2	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	1	2	3
H1	7 S	7 S	7 S	7 S	7 S	7 S	6 S	5 S	5 S	6 S	6 S	5 S	4 i	3 i	4 i	1 I	1' I	2 I	2 I
H2	7 S	7 S	7 S	7 S	6 S	5 S	6 S	5 S	5 S	5 S	3 i	[illegible]	3 i	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
H3	7 S	6 S	5 S	5 S	7 S	5 S	6 S	5 S	?	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Tableau II-12. Profils types obtenus par combinaison de 3 horizons, avec stabilité structurale de H1 >= H2 >= H3. S : Stable, i : intermédiaire ; I : Instable.

Profils types n° :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Stable						Intermédiaire			In-stable
Horizons										
H1 0-30 cm	S	S	S	S	S	S	i	i	i	I
H2 30-60 cm	S	S	S	i	i	I	i	i	I	I
H3 60-90 cm	S	i	I	i	I	I	i	I	I	I

= 1,1 mS et sels solubles = 5,7), le pH (8,7), l'Indice de Dispersion (9). La MO est faible (échantillons issus des horizons 2 et 3). Le taux de CaCO3 est élevé (#12%) ; les sols appartiennent aux classes 2 et 3 d'Emerson. La famille 1' peut être intégrée à la trajectoire 1 dans la succession des familles 1, 1', 3 et 5.

- Définition des types de profils.

Parmi les 118 échantillons, 111 appartiennent à 42 profils constitués de deux horizons au moins (H1 et H2 au moins). On constate (Tableau II-11) que tous les profils sont constitués de la superposition d'horizons ayant une relation d'ordre par rapport au comportement de dispersion des horizons à savoir :

ID de la famille de H1 <= ID de la famille H2 <= ID de la famille H3.

Aussi, on peut imaginer tous les types de superpositions H1, H2, H3 théoriques possibles soumis à la condition [stabilité de H1 >= stabilité de H2 >= stabilité de H3] (Tableau II-12). Nous classons à priori ces diverses combinaisons par rapport à un gradient d'instabilité croissante du profil. Nous obtenons 10 profils types n° 1 à 10. Les profils de types "stables" sont définis par un premier horizon stable (familles 5, 6, 7) ; ils sont représentés par les profils types n°1, 2, 3, 4, 5, 6. Les profils de types "intermédiaires" sont définis par un premier horizon de stabilité intermédiaire (familles 3 et 4) ; ils sont représentés par les profils types n°7, 8, 9. Enfin les profils de types "instables" sont définis par un ensemble de 3 horizons instables (familles 1, 1', 2) et sont représentés par le profil type n°10.

4. Discussion et conclusion sur la typologie des sols.

On a défini les familles de sol en classant les échantillons en fonction de leur comportement de dispersion, de l'état chimique et de la classification pédologique. Les types de sol ont été caractérisés en classant les échantillons en fonction du seul comportement de dispersion. Les types de profil de sol sont obtenus par superposition de 3 horizons de 30 cm (H1, H2, H3), superposition qui respecte la relation : stabilité structurale de H1 >= H2 >= H3.

Ainsi huit *familles de sols* rendent compte de la variabilité de l'état chimique, de la dispersion et de l'évolution pédologique. Elles mettent en évidence aussi bien la variabilité de l'horizon 1 (différenciation latérale selon la position géographique et hydraulique) que celle

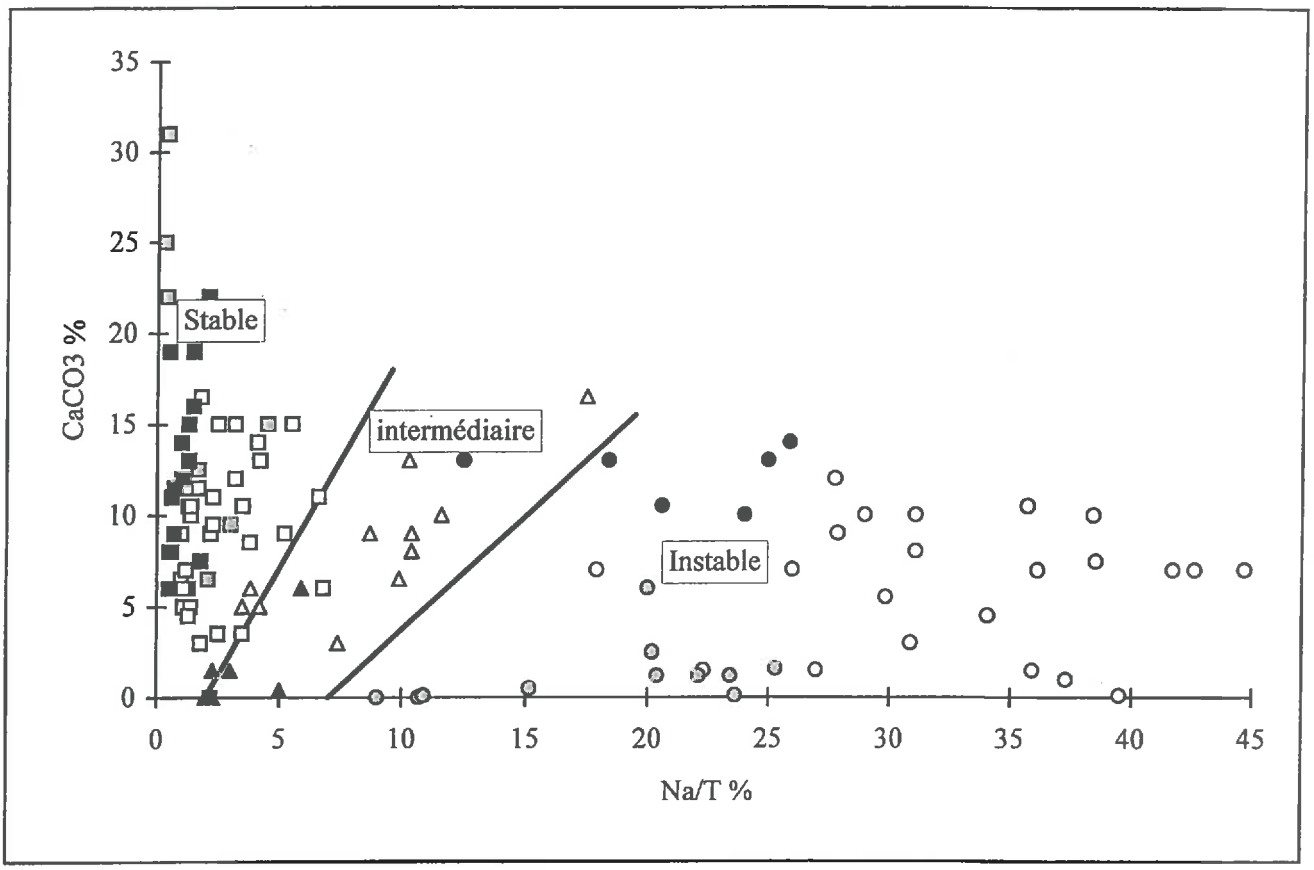


Figure II-4. Familles et types de comportement en fonction de Na/T, CaCO3, ID. Familles instables 1, 2, 3' (ronds clairs, gris, noirs) ; familles intermédiaires 3, 4 (triangles clairs, noirs) ; familles stables 5, 6, 7 (carré blanc, gris, noirs).

des horizons plus profonds. Les variables en jeu dans cette double différenciation sont les mêmes : Na/T, salinité, CaCO3, MO. Ces familles peuvent être comparées entre elles en terme de conditions de formation et d'évolution du matériau c'est-à-dire de trajectoires d'évolution. Elles peuvent être regroupées en fonction du comportement de dispersion (et donc l'état chimique que cela suppose) et on caractérise alors des *types de sol.*

A l'échelle du profil, on peut penser que selon l'intensité du drainage, les sols ont évolué de façon plus ou moins profonde. Ainsi les horizons sont superposés par rapport à l'ancienneté du dépôt (ancienneté H1 <= H2 <= H3), mais aussi selon l'état chimique et le comportement de dispersion (ID H1 <= H2 <= H3). On définit ainsi des *types de profil* de sol obtenus par superposition de 3 horizons de 30 cm (H1, H2, H3), superposition qui respecte la relation : stabilité structurale de H1 >= H2 >= H3.

Nous montrons ainsi le parallélisme étroit entre classification-évolution pédologique d'une part et état-évolution chimique d'autre part et la liaison médiocre voire mauvaise entre classification pédologique et comportement de dispersion des sols (classification agronomique).

L'étude de la hiérarchie des variables et des corrélations entre variables nous donne la possibilité de réduire et de choisir la nature et le nombre de variables selon l'objectif visé. Si on souhaite mener une double approche agronomique et pédologique, 6 variables peuvent suffire (Na/T, salinité, CaCO3, MO, pH, ID). On garde encore une bonne précision avec les 4 variables (ID, le CaCO3, la MO et la salinité). Si nous ne voulons plus nous soucier de problèmes d'évolution de sol ou de filiation, on peut regrouper les familles en 3 grands types de comportement : instable (familles 1, 1', 2), stable (familles 5, 6, 7) et intermédiaire (familles 3 et 4). La figure II-4 illustre ces regroupements en utilisant 3 variables (Na/T, CaCO3, ID).

Ces résultats justifient les méthodes de diagnostic préconisées par Damour (1981), Damour et Pons (1987). On peut à l'aide de variables estimées très simplement sur le terrain prévoir la valeur agronomique d'un sol par la mesure de l'ID, l'estimation de CaCO3 (test à l'HCl), la teneur en MO (couleur), la salinité (goût ou mesure de la CE).

Tableau II-13. Evolution du coefficient de détermination de ID en fonction du nombre et de la nature des variables caractérisant les échantillons. Résultats des régressions multiples.

Nombre de variables explicatives	N° étape de la régression 1	2	3	4	5	6	7	8	...	12	13	.....
15	Mgs	Cas	Nae	CaCO3	SOLU	Nas	NaT	Ph		MO	CE	
	0.618	0.844	0.865	0.877	0.881	0.884	0.885	0.887	0.887	0.890	0.890	0.890
7	Mgs	NaT	CaCO3	CE	Mge	Ph	MO					
	0.618	0.836	0.856	0.866	0.867	0.867	0.868					
5	NaT	CaCO3	CE	MO	Ph							
	0.574	0.823	0.838	0.839	0.839							
3	NaT	CaCO3	CE									
	0.574	0.823	0.838									
2	NaT	CaCO3										
	0.574	0.823										

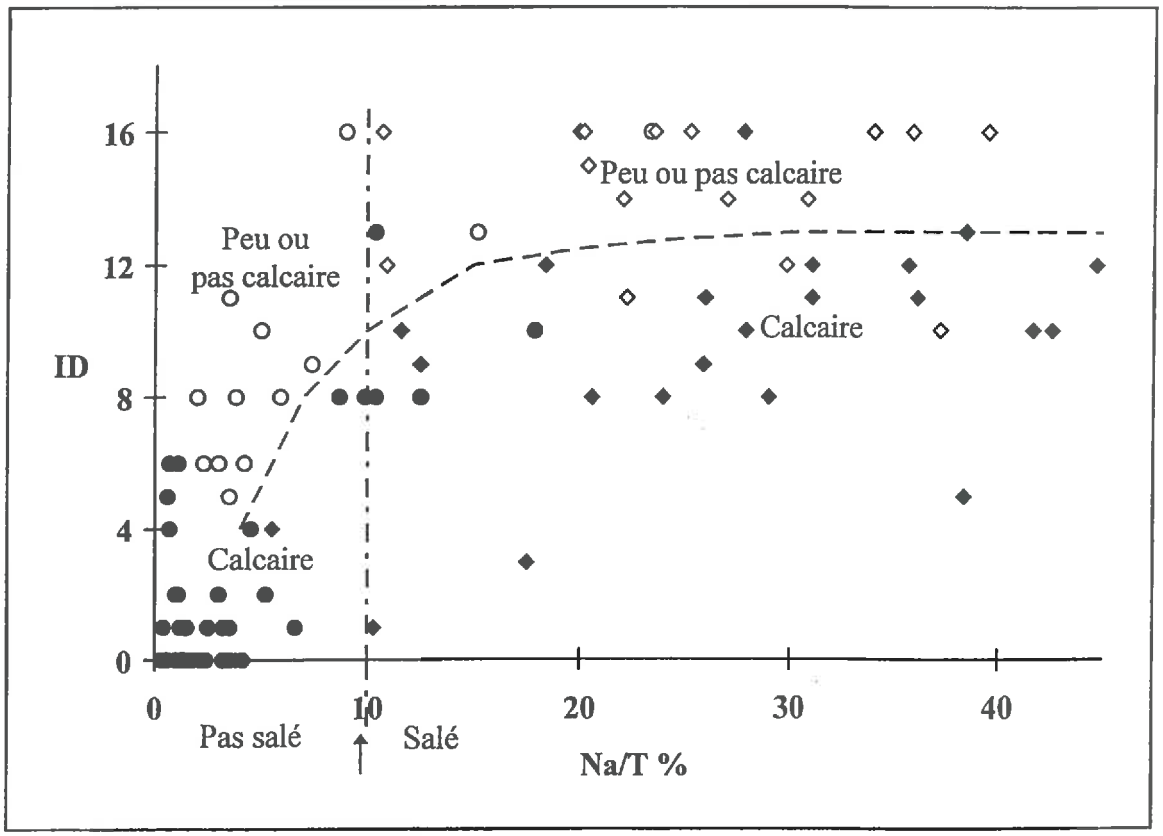


Figure II-5. Indice de Dispersion, taux de calcaire et salinité. "Calcaire" : CaCO3 % > 6 (noir) ; "Peu ou pas calcaire" : CaCO3 % < 6 (blanc) ; "Pas salé" : CE < 0.4mS (rond) ; "Salé" : CE > 0.4 mS (losange).

Chapitre 4. Etude quantitative. Les facteurs de la dispersion et les relations entre l'Indice de Dispersion et les autres mesures de la stabilité structurale (Is et K).

L'objectif est d'établir la relation ID = f(facteurs chimiques).

Le choix des variables pour la relation ID = f(v1,v2,..,vn) se fait en partant des résultats précédents et de ceux de la régression multiple. Le tableau II-13 montre l'évolution du coefficient de détermination de ID avec l'ensemble des 15 puis 7, 5, 3 et 2 variables explicatives. Avec les 15 variables, le coefficient de détermination maximum est de 0.890 ; il ne varie plus à partir du 12 ième pas. La 1e variable qui explique le plus fortement l'ID est Mgs (0.618), puis Cas (0.844), puis Cae, CaCO3, S, ... Lorsqu'on réduit de 15 à 7, puis à 5, 3, et 2 le nombre de variables, le coefficient de détermination de l'ID passe de 0.890 à 0.868, puis 0.839, 0.838, 0.823. On perd au maximum 4.2% de détermination (0.890 - 0.838 = 0.042) quand on passe de 15 régresseurs à 3 (NaT, CaCO3, CE). Enfin l'ID est expliqué à 82% par seulement deux paramètres Na/T et CaCO3. On confirme que la MO et le pH n'interviennent pas de façon importante comme variable explicative de l'ID.

1. L'étude de la relation ID = f(Na/T).

- Etude générale.

La figure II-5 illustre la relation ID = f(Na/T). Le nuage de points est caractérisé par une forte dispersion. On distingue deux zones par rapport à la sodicité. Lorsque Na/T< 10-15%, l'ID augmente très fortement (de 0 à 16) avec la sodicité. Lorsque Na/T>15%, l'ID est élevé (ID >= 8) et la valeur évolue peu ou pas lorsque la sodicité augmente.

Si on identifie les échantillons selon leur richesse en calcaire (CaCO3 < 6% et > 6%), et en sel (CE < 0.4 mS et > 0.4 mS), les points représentatifs se répartissent dans le plan [ID, Na/T] de façon particulière. Les échantillons à faible teneur en CaCO3 constituent la partie supérieure du nuage de points, ceux non salés se situent dans la zone de salinité < 10 - 15 %.

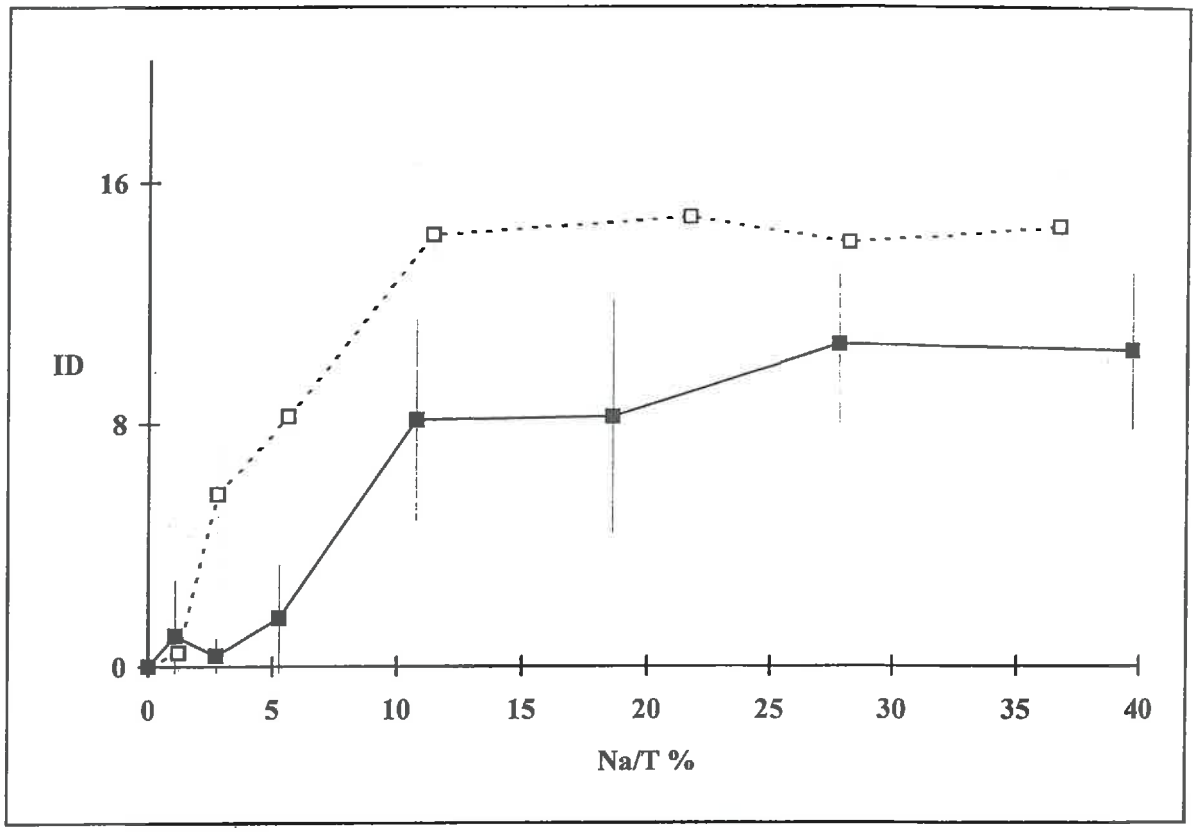


Figure II-6. Relation entre l'Indice de Dispersion, la sodicité et la teneur en calcaire. CaCO3<6% (clair, pointillé),>6% (foncé, continu)

Tableau II-14. Domaine de validité des relations ID = f(Na/T) selon les valeurs de sodicité et la teneur en CaCO3 des échantillons de sol.

	Na/T	<=10%	10 - 18%	>18%
CaCO3	< 6 %	ID = 1.48 NaT+ 0.02	ID = 14.4	ID = 14.4
CaCO3	> 6 %	ID = 0.56NaT-0.06	ID = 0.56NaT-0.06	ID = 0.05 NaT+8.8

Ainsi, on montre que :

- pour un niveau donné de sodicité, les échantillons peu calcaires sont plus dispersants que les échantillons calcaires ;
- l'indice de dispersion atteint une valeur maximum de 15 dès 10-12% de Na/T pour les échantillons peu ou pas calcaires, alors que pour les calcaires, il n'atteint que 10-11 et ce, même pour des valeurs élevées de Na/T (28-30%) ;
- la salinité est élevée (CE >= 0.4 mS) lorsque le Na/T atteint et dépasse 10 à 15 %.

- Etude quantitative ID = f(Na/T, CaCO3).

On regroupe les individus en 7 intervalles de Na/T : 1- <2%, 2- [2, 4], 3- [4, 8], 4- [9, 15], 5- [18, 24], 6- [25, 31], 7- [34, 39] et on distingue les échantillons faiblement et fortement calcaires. La figure II-6 représente la moyenne et l'écart-type de chacun de ces groupes dans le plan [Na/T, ID].

Selon le taux de calcaire, on obtient deux courbes qui évoluent de façon parallèle. La courbe représentant les échantillons peu ou pas calcaires est décalée de +3 à +6 unités de dispersion par rapport à la courbe représentant les échantillons calcaires : l'ID passe de 6 puis 8, et >12 respectivement pour 3, 6 et 9% de Na/T. Par contre, pour les échantillons calcaires, l'ID est < 6 lorsque la valeur de Na/T est < 8%, 8 pour une large plage de sodicité Na/T=10 à 20%, > 10 pour Na/T>25%. L'étude statistique montre que pour un taux de Na/T donné, l'ID est significativement plus élevé pour les sols peu ou pas calcaires que pour les sols calcaires (Tableau 1 en annexe II- 4).

Ces courbes sont proches de courbes en S et peuvent être approchées par 2 droites correspondant aux deux parties de la courbe dont les équations sont données dans le tableau II-14.

- Effet de la salinité sur la relation ID = f(Na/T, CaCO3).

Le fait de considérer la salinité ne change pas fondamentalement la relation ID = f(Na/T, CaCO3), (Figure 1 en annexe II-4). Il y a une légère modulation de l'ID dans l'intervalle de sodicité où coexistent des sols salés et non salés, c'est-à-dire entre 9 et 20 % de Na/T. Dans cet intervalle et pour des sols peu ou pas calcaires, la salinité ne réduit

pratiquement pas l'ID. Par contre, on note une plus forte diminution de la dispersion dans les cas des sols calcaires. Cependant, l'effet de la salinité semble à la limite de la signification statistique faute d'un nombre suffisant d'échantillons (Tableau 2 en annexe II- 4).

- Discussion conclusion.

C'est dans l'intervalle 7 et 15 % de sodicité que l'effet du calcaire (et dans une moindre mesure de la salinité) va être déterminant sur le degré de dispersion. C'est ici que la différence de dispersion entre échantillons peu calcaires et calcaires (salés/pas salés) est la plus élevée (elle atteint 6 à 9 unités). Les sols calcaires sont stables puis intermédiaires alors que les non calcaires sont dispersants à très dispersants.

Lorsque la sodicité dépasse 15%, le taux de calcaire (et peut être la salinité mais presque tous les échantillons sont salés) réduit trop faiblement la dispersion pour entraîner une modification de comportement. Les sols calcaires dispersent, les sols peu calcaires dispersent plus fortement.

2. Les relations entre l'Indice de Dispersion et les mesures classiques de la stabilité structurale (Is et K).

L'estimation de la stabilité structurale se fait habituellement par la mesure de l'indice d'instabilité structurale (Is) et par la mesure de la perméabilité (K). Hénin et al. (1958, 1969), Hénin (1977) montrent qu'il existe une relation log 10 Is = f(K) pour tous les sols sauf pour les sols sodiques.

Nous établissons les relations ID = f(log 10 Is) et K1 = f(ID) à partir d'une gamme de sols correspondant aux familles 1 à 5 (marais desséchés) et aux horizons H1, H2, H3. Cependant, nous n'avons pas mesuré simultanément les trois paramètres de stabilité structurale sur les mêmes échantillons. Nous disposons de 30 échantillons avec le couple ID x Is et de 42 autres échantillons pour le couple ID x K.

La figure 1 en annexe II-5 illustre la relation log 10 Is = f(ID). Elle montre un nuage de points très dispersé ; le coefficient de détermination $R^2 = 0.43$ (n = 30) est faible ; la

régression linéaire qui en résulte n'a pas beaucoup de signification si ce n'est la tendance générale de la relation. L'instabilité structurale (Is) augmente avec l'Indice de Dispersion (ID).

La figure 2 en annexe II-5 illustre la relation K = f(ID). Elle montre une diminution de la perméabilité en fonction de l'ID. Le coefficient de détermination R^2 est de 0.66 (n = 42), la régression linéaire a pour équation K = - 0.11 ID + 1.7. Autour de cette tendance moyenne, il y a une dispersion assez importante des points.

Ainsi les deux mesures sont faiblement corrélées à l'ID. Celle qui est la mieux liée à l'ID est la perméabilité K1. L'Is n'a qu'une liaison très lâche et ne permet pas de dégager une relation. Nous confirmons par ces résultats, la difficulté de mesurer par les méthodes classiques la stabilité structurale de sols plus ou moins sodiques. Seules des bornes peuvent être proposées. Nous nous cantonnerons à donner une grille de correspondance approximative entre les valeurs de l'ID, de Is et de K.

pour les sols stables (familles >= 5), l'ID <= 4, log 10 Is < 1.5 et K1 > 1 ;
pour les sols intermédiaires (familles 4), 5 < ID <= 8, log 10 Is # 1.5 et K1 # 1 ;
pour les sols instables (familles 1, 1', 2), ID >= 9, log 10 Is > 1.8 et K1 < 0.5.

Conclusion sur les caractéristiques et la stabilité structurale des sols dans les Marais de l'Ouest.

Les sols de marais présentent des traits communs : modalités de formation, profil peu différencié, taux d'éléments fins, minéralogie et teneur d'argile. Le matériau diffère essentiellement par certaines caractéristiques chimiques (sodicité, taux de calcaire, salinité taux de matière organique) et par le degré de dispersion dans l'eau. La mise au point d'un test permet d'évaluer la stabilité du matériau puis de classer les sols par type de comportement : stable, intermédiaire, instable. Les paramètres chimiques qui caractérisent les sols de marais ont la particularité d'être généralement corrélés entre eux. Les indicateurs de richesse en sodium sont très liés à la sodicité et à la salinité, les indicateurs de richesse en calcium au calcaire. On note aussi une opposition entre les indicateurs de richesse en magnésium et en calcium. On peut expliquer cette relation de la façon suivante. L'évolution des sols sodiques se fait en consommant des ions Ca^{++}. En effet, le sodium, cation le plus faiblement lié au complexe, est le premier à s'échanger si les conditions d'échange s'établissent (par drainage plus ou moins temporaire par exemple). Si le taux de calcium est suffisant, c'est Ca^{++} qui se substituera à Na^{+}. Sinon, ce sera le Mg^{++} cation qui a la plus forte force de liaison après le Ca^{++}.

On voit donc que le potentiel d'évolution des sols vis-à-vis de la sodicité (aspect chimique) d'une part et l'aptitude des sols à disperser (aspect physique) pour une sodicité donnée d'autre part se trouve dans sa réserve en calcaire.

Huit familles rendent compte aussi bien de la variabilité des états chimiques, du comportement de dispersion, de l'évolution pédologique pour les horizons de surface et des autres horizons du profil. Les variables en jeu dans cette double différenciation sont les mêmes : Na/T, salinité, CaCO3, MO. On peut penser que selon l'intensité du drainage, les sols ont évolué de façon plus ou moins profonde. Ceci nous permet de montrer le parallélisme entre classification-évolution pédologique d'une part et état-évolution chimique d'autre part et la liaison médiocre entre classification pédologique et comportement de dispersion des sols.

Au point de vue méthodologique, comme les paramètres chimiques sont corrélés entre eux, un faible nombre de variables bien choisies suffit pour caractériser les sols. On peut réduire à 6 (ID, Na/T, CaCO3, MO, CE, pH) le nombre de variables descriptives pour une double approche agronomique et pédologique. Si nous privilégions la stabilité structurale, on regroupe les familles en 3 grands types de comportement : instable (familles 1, 1', 2), stable (familles 5, 6, 7) et intermédiaire (familles 3 et 4). Cette classification simplifiée (6 variables, 3 types de comportement) sera retenue pour caractériser les sols que nous étudierons dans cette thèse. On peut à l'aide de variables estimées très simplement sur le terrain prévoir la valeur agronomique d'un sol par la mesure de l'ID, l'estimation de CaCO3 (test à l'HCl), la teneur en MO (couleur), la salinité (goût ou mesure de la CE).

On a quantifié la relation entre l'Indice de Dispersion et Na/T et évalué le poids que joue l'état calcique (et dans une faible mesure la salinité) du sol sur la dispersion. Il semble que c'est dans la fourchette de 6 à 15 % de sodicité qu'on observe en même temps : -a- un accroissement très important de l'indice de dispersion, -b- le plus important effet de la teneur en CaCO3 sur la réduction de l'ID, -c- un effet de la salinité qui réduit légèrement la dispersion dans les sols calcaires. Enfin cette relation nous permet de juger la "distance nécessaire à parcourir" pour parvenir à une stabilité structurale suffisamment élevée (ID< 6 par exemple) pour qu'il n'y ait pas de dégradation physique. Ceci nous permettra de mieux raisonner les techniques et leur combinaison pour atteindre ce résultat.

Enfin, on peut reconstituer des profils de sol par superposition de 3 échantillons de sol (H1, H2, H3) en respectant les 2 règles suivantes

(1) N° de famille H1 >= N° de famille H2 >= N° de famille H3.

(2) ID de la famille de H1 <= ID de la famille H2 <= ID de la famille H3.

Compte tenu de son coût et de son aspect pratique d'une part, des relations établies avec les variables chimiques descriptives d'autre part, l'Indice de Dispersion évalue de façon plus satisfaisante que les autres mesures la stabilité structurale des matériaux rencontrés dans les Marais de l'Ouest.

Partie III

Comportement physique au champ

Les chapitres précédents nous ont permis de classer les échantillons des horizons H1, H2, H3 selon 8 familles. Nous avons défini des types de profil ordonnés par rapport à la stabilité structurale. Le comportement physique au champ ne résulte pas uniquement de celui du matériau, mais d'un assemblage ordonné d'horizons qui s'exprime par le profil. De plus, il dépend des conditions de milieu et de culture : hydraulique générale (marais desséchés, marais mouillés), modes de drainage, conditions climatiques, conduite de la culture.

Ici, nous abordons le comportement de parcelles cultivées récemment (en général moins de 5 ans). Aussi nous ne retenons que des situations où il y a maîtrise de l'eau au niveau de la parcelle ce qui correspond au marais desséché et aux 6 familles (1, 1', 2, 3, 4, 5). En effet dans le marais mouillé, l'eau ne peut être maîtrisée et la prairie est l'utilisation privilégiée de ce milieu (Pons et al., 1990).

Nous étudions l'effet des types de profil de sol sur deux révélateurs du comportement au champ : la circulation de l'eau dans le sol et l'enracinement. Nous choisissons une large gamme de "situations de références" cultivées en blé qui diffèrent par la qualité du profil de sol, les modalités de drainage et les années climatiques.

Nous montrons que la variabilité de comportement du matériau (dispersion) rend compte de la variabilité du comportement physique du milieu aménagé, drainé et cultivé. Nous définissons le comportement physique du profil en hiver par sa perméabilité que nous évaluons par une note de porosité pour les horizons travaillés (comportement de la couche travaillée) et par la profondeur de nappe pour les horizons du sous sol (comportement hydraulique).

Nous présentons successivement :

-A- Le comportement hydraulique et la profondeur d'enracinement du blé (chapitres 1 et 2).

-B- Le comportement de la couche travaillée (chapitre 3).

-C- Une synthèse sur le comportement physique du profil (chapitre 4)

. Les situations de référence étudiées. Caractéristiques des parcelles : types de profil, classes pédologiques, modes et caractéristiques du drainage, années d'étude et particularité des parcelles.

Type de profil N°	Ancienneté du dépôt	Mode de drainage D=drains R=rigoles	Ecarte--ment (m)	Année	Profondeur de l'élément drainant (cm)	Parcelles N°		Particularités
1	bri ancien	D	18	1981	120	1	MB30	
1	bri ancien	D	20	1981	110	2	DeG	
1	bri ancien	D	20	1981	110	3	OI	
1	bri ancien	D	18	1982	110	4	MIG	
1	bri ancien	R	18	1981	50	5	MC50	
2	bri ancien	D	12	1981	100	6	PF	semis direct
2	bri récent	D	20	1981	110	7	BUL	
2	bri récent	D	15	1981	100	8	MEN	ancien marais salants
2	bri récent	D	20	1982	110	9	BUL82	
2	bri récent	D	13.5	1983	110	10	BUL83	
4	bri récent	D	15	1982	100	11	MEN	ancien marais salants
4	bri intermédiaire	R	18	1981	45	12	GAR	
4	bri intermédiaire	R	18	1982	45	13	GAR	
5	bri ancien	D	12	1982	100	14	GAT82	
5	bri ancien	D	12	1983	70	15	GAT83	amont de drain
6	bri ancien	D	20	1981	120	16	GH	
6	bri ancien	D	12	1981	100	17	GAT	
6	bri récent	D	20	1981	90	18	A7	
6	bri ancien	R	18	1981	45	19	LS	
8	bri récent	D	15	1981	100	20	A6	
8	bri intermédiaire	R	18	1981	65	21	CC10	Rigoles profondes
8	bri intermédiaire	R	17	1983	40	22	BES83	gypsée
8	bri récent	R	18	1982	45	23	A8	
9	bri récent	D	10	1982	90	24	A7F	
9	bri récent	D	10	1982	90	25	A7B	
9	bri récent	D	10	1983	90	26	A7	
9	bri intermédiaire	R	18	1981	65	27	A70	Rigoles profondes
9	bri intermédiaire	R	18	1981	65	28	A80	Rigoles profondes
9	bri intermédiaire	R	16	1982	45	29	OUV	
9	bri intermédiaire	R	17	1982	65	30	DGF60	Rigoles profondes
9	bri intermédiaire	R	17	1982	40	31	BES82	
9	bri récent	R	18	1981	45	32	A8	
9	bri intermédiaire	D	15	1982	100	33	GG	apport de gypse
10	bri intermédiaire	D	15	1982	100	34	G0G	Témoin sans gypse
10	bri récent	D	15	1983	80	35	BG	apport de gypse
10	bri récent	D	15	1983	80	36	BT	Témoin sans gypse
10	bri intermédiaire	R	18	1981	65	37	F20	Rigoles profondes

III-A. LE COMPORTEMENT HYDRAULIQUE ET LA PROFONDEUR D'ENRACINEMENT DU BLE.

Nous étudions le comportement hydraulique de divers modes de drainage dans la gamme de types de sol définie dans la partie précédente.Nous validons ensuite le comportement hydraulique par l'étude de l'enracinement. En effet le système racinaire représente l'interface entre le sol et plus généralement les conditions pédoclimatiques et le comportement de la culture (Boiffin et al., 1981).

Nous choisissons le blé car il est cultivé sur tous les sols de marais desséchés ; de plus son cycle végétatif est soumis à la période saturée hivernale qui entraîne des conditions plus ou moins hydromorphes selon les années et les milieux. On teste la pertinence de la typologie des profils en mettant en parallèle le degré d'instabilité des profils avec d'une part l'efficacité du drainage et d'autre part l'enracinement du blé (profondeur et dynamique).

Nous caractérisons les situations de référence puis étudions le comportement hydraulique et la profondeur de l'enracinement du blé dans un premier chapitre. Dans le second, nous testons les méthodes et résultats obtenus dans le cas particulier d'un hiver sec (campagne 1987).

Chapitre 1. Types de profils de sol, comportement hydraulique et enracinement du blé.

1. Dispositif et conditions expérimentales.

1.1 - Caractéristiques des parcelles de référence.

Les 37 parcelles sont caractérisées par *le profil de sol dont on a spécifié le type, l'ancienneté du dépôt (classification pédologique), *les modalités de drainage et les aspects particuliers d'aménagement ou d'amendement (Tableau III-1). L'éventail des profils est

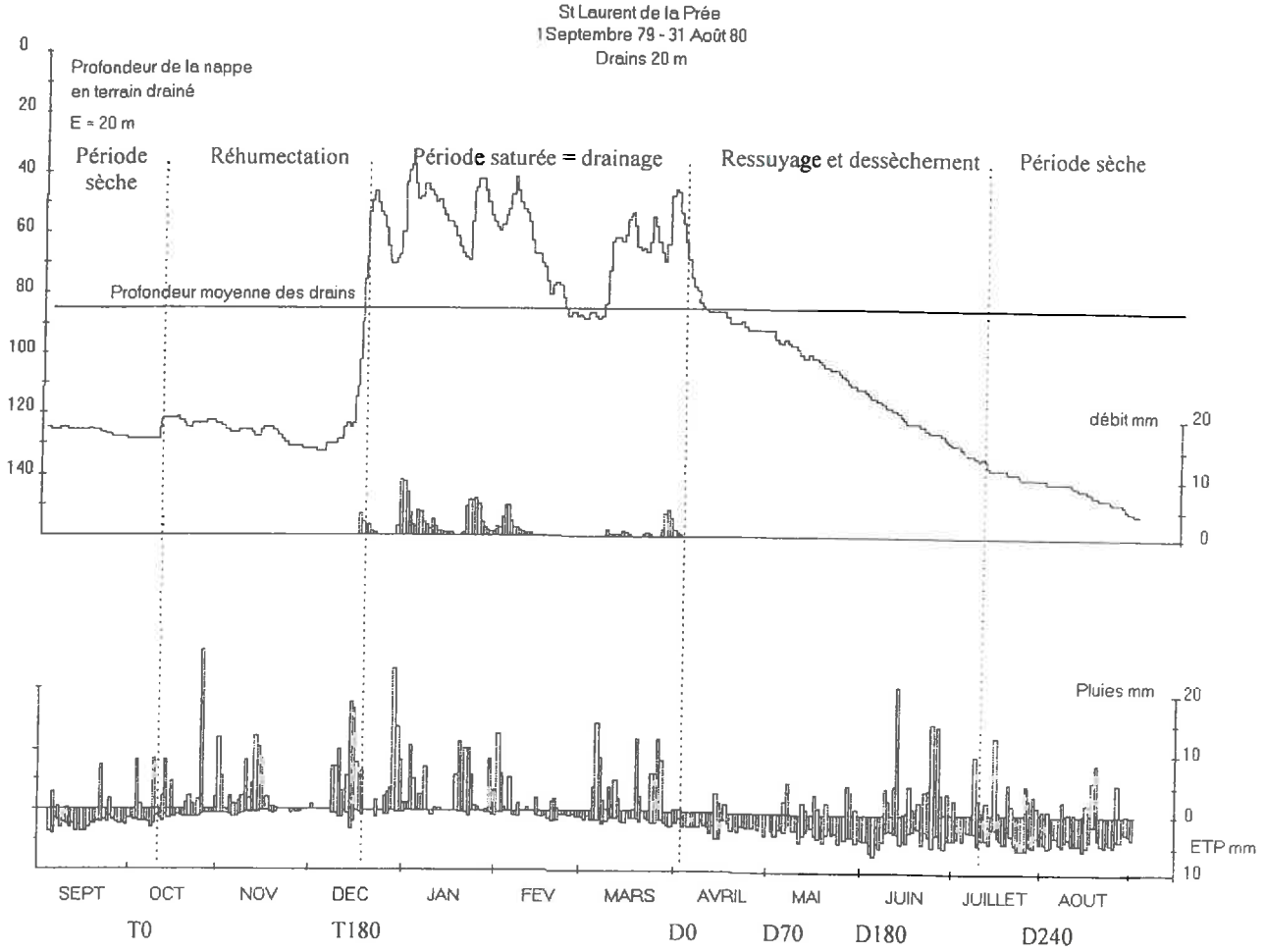


Figure III-1. Chronique du bilan climatique, de la profondeur de la nappe et du débit de drainage.
T0, T180, D0, ... sont les décades où commencent les périodes caractéristiques des états hydriques annuels, voir les définitions en annexe I.

représenté : 19 stables (types 1, 2, 4, 5, 6), 14 intermédiaires (types 8 et 9) et 4 instables (type 10). Les modalités de drainage sont diverses. Les rigoles sont distantes de 18 m ; leur profondeur est généralement de 0,40 à 0,50 m ; certaines sont profondes (0,65 m) ; la planche est plus ou moins bombée en ados. Les drains sont distants de 10 à 20 m ; leur profondeur se situe entre 0,75 et 1,20 m selon la position par rapport au réseau (la pente de pose est de 2 à 3 pour mille).

Parmi ces 37 parcelles semées en blé d'hiver, 33 ont fait l'objet d'un essai "fertilisation azotée". Ces dernières sont semées avec la variété TOP, sauf 3 situations en TALENT en 1982 ; elles ont été suivies au nombre de 17 en 1981, 10 en 1982 et 6 en 1983. Les comportements hydraulique et agronomique ont été suivis conjointement en 1981, 82, 83.

1.2 - Mesures.

- Mesures du comportement hydraulique.

On mesure l'efficacité du drainage et donc le comportement hydraulique des parcelles par la mesure de la profondeur de nappe.

Choix de la période de mesure de la profondeur de la nappe.

La figure III-1 présente un exemple de l'évolution synchronique du bilan climatique (pluies et évapotranspiration) et du fonctionnement du drainage (profondeur de la nappe, débit) au cours d'une année agricole. Il s'agit de la parcelle A7 (n° 18, drains à 20m) de profil de type 9 étudiée par Collas (1983). On entend par nappe, la présence d'eau libre dans un piézomètre. Sa profondeur est définie par la distance entre la surface du sol et le niveau de l'eau libre dans le piézomètre.

Cette chronique présente 2 grands épisodes : une période saturée en hiver et une période sèche en été. En hiver, quand le sol est saturé, le drainage fonctionne et le débit varie en fonction des quantités de pluie, l'évapotranspiration est pratiquement nulle ; la nappe, peu profonde, fluctue au-dessus du niveau des drains. Au printemps, en été et automne, l'évapotranspiration est supérieure aux précipitations. Le sol s'assèche, le drainage ne

fonctionne plus, la nappe est de plus en plus profonde et se maintient au-dessous du niveau des drains.

On note deux périodes de transition : une période de ressuyage au printemps et une période de réhumectation en automne.

Lors du ressuyage, la nappe baisse plus ou moins rapidement selon les valeurs du bilan hydrique de printemps ; il y a alors tarissement du drainage.

La réhumectation. A l'automne le retour des pluies (période où les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration) n'a d'effet immédiat ni sur la profondeur de la nappe ni sur le fonctionnement du drainage. Il faut attendre un cumul de pluies efficaces[1] [(P - ETP) décadaire] d'environ 180 mm à partir de la date de retour des pluies (voir définition en annexe I) pour assister à une *très brusque remontée de la nappe* et au début du drainage. Cette *valeur seuil* de 180 mm doit être modulée (voir chapitre 2) par le type de profil, le mode de drainage, et la nature de la culture qui interviennent dans la profondeur d'assèchement du profil pendant la période sèche.

En conséquence, la période pertinente pour apprécier l'efficacité du drainage est la période saturée qui s'achève lors du ressuyage s'amorce c'est-à-dire au début du déficit climatique. Au point de vue calendaire, la période la plus probable qui répond à ces caractéristiques est comprise entre la mi janvier et la fin du mois de mars soit une durée d'environ 10 semaines (voir étude fréquentielle dans l'annexe I). C'est cette période que nous retiendrons pour mesurer et calculer la "profondeur moyenne de la nappe en hiver".

Mesure, calcul et définition de la profondeur de nappe en hiver.

Les travaux sur le comportement hydraulique de divers modes de drainage dans les différents sols de marais (Damour et al., 1972 ; Pons, 1980 ; Collas et al., 1984 et Collas, 1985) montrent que :

a - la forme de la nappe peut être considérée comme quasiment plate ;

---

[1] En automne et hiver, les pluies (P) sont supérieures à l'évapotranspriration potentielle (ETP). Les pluies efficaces sont définies par le bilan (P - ETP).

Tableau III-2. Périodes climatiques, état du profil et stade probable du blé.

Périodes climatiques	Etat hydrique probable du profil	Stade probable du blé
(1) Automne-début hiver (01/09 au 31/01)	* reconstitution de la réserve utile du sol * établissement de l' excès d'eau permanent	* établissement du peuplement * début tallage
(2) Hiver (01/02 au 31/03)	* sol saturé	* tallage * début montaison.
(3) Printemps (01/04 au 31/05)	* ressuyage du profil	* montaison * épiaison

Tableau III-3. Bilan climatique (P-ETP) des campagnes 1981, 1982, 1983 pour trois périodes : automne-début hiver, hiver, printemps.

		1981	1982	1983
Automne-début hiver	(1/09/ au 31/01)	213	359	435
Hiver	(1/02 au 31/03)	37	49	36
Printemps	(1/04 au 31/05)	-2	-159	90

b - en position d'interdrain, la profondeur de la nappe semble peu sensible à la profondeur et à l'écartement des drains dans les profils intermédiaires et instables (Annexe III-1).

C'est pourquoi on mesure la nappe grâce à un tube piézométrique positionné dans le sol à 1,20 m de profondeur à équidistance de deux éléments drainants. On définit la profondeur de la nappe en hiver par la moyenne des niveaux piézométriques hebdomadaires en période de saturation du sol (mi janvier à fin mars).

- Choix des périodes d'observation de l'enracinement.

Les études sur le développement du système racinaire ont été faites généralement en l'absence de conditions limitantes (Weaver, 1926 ; Baldy, 1973 ; Welbank et al., 1973). Elles montrent une évolution parallèle de la matière sèche racinaire et de la profondeur d'enracinement qui atteint son maximum après la floraison. L'enracinement est observé début montaison et post floraison car à ces stades, le rapport poids de racines / poids des parties aériennes est caractéristique. Il est maximum (0.5) début montaison et minimum (0.1) à la floraison pour rester ensuite constant (Gregory et al., 1978). Les observations ont été faites à partir d'un profil creusé à égale distance de deux éléments drainants.

1.3 - Les conditions climatiques.

Pour comparer les conditions climatiques des trois campagnes avec pertinence, on les analyse du point de vue hydraulique et hydrique (pertinence de la hauteur de nappe) d'une part et des états probables de croissance et de développement de la culture (étapes de l'élaboration du rendement et de la croissance racinaire) d'autre part. De plus il est nécessaire que ces périodes s'inscrivent dans des périodes calendaires les plus probables (Tableau III-2).

C'est pourquoi on caractérise les trois campagnes 1981, 1982, 1983 par le bilan climatique mensuel (P-ETP) pour les périodes d'automne-début hiver, d'hiver et de printemps qui correspondent à des états hydriques du profil et à des stades du blé les plus probables (Tableau III-3).

Une étude fréquentielle permet de situer les résultats par rapport à 19 années (1966-

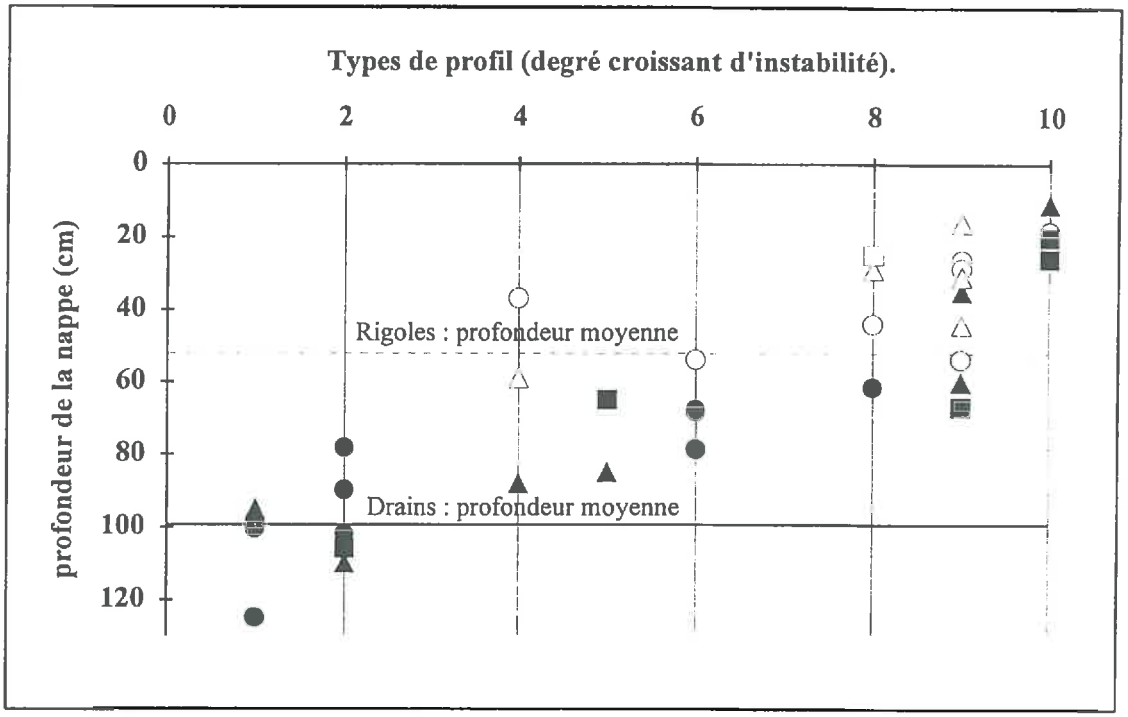


Fig. III-2 : Profondeur de nappe, types de profil et modes de drainage. Rigoles (en clair), drains (noir) ; 1981 (rond), 1982 (triangle), 1983 (carré).

1984) au Domaine Expérimental de Saint Laurent de la Prée (Annexe I). La campagne 1981 représente une année modale vis-à-vis du bilan climatique d'automne et d'hiver ; elle est relativement humide au printemps ; 1982 est très humide pendant l'automne-début hiver puis normale en hiver ; le printemps est exceptionnellement sec ; 1983 est très humide à l'automne-début hiver, normale en hiver et exceptionnellement humide au printemps. Ainsi, les trois années d'étude sont très contrastées. Elles représentent la quasi totalité de la variabilité observée pendant 19 ans pour les périodes d'automne-début hiver et de printemps. Par contre, P-ETP en hiver est très proche pour les trois campagnes et représente 7 années sur 19.

2. Les résultats.

2.1 - Le degré de stabilité du profil, le mode de drainage et la profondeur de la nappe en hiver.

La figure III-2 indique que, quel que soit le mode de drainage et l'année climatique, la profondeur de la nappe augmente avec le degré de stabilité du profil jusqu'à ce qu'elle atteigne celle de l'élément drainant.

Pour les drains, la gamme de variation de la profondeur de la nappe est importante (de 1,20 à 0,10 m). Elle passe de 1,20 à 0,70 m, de 0,70 à 0,40 m et de 0,30 à 0,10 m pour les profils type 1 à 6 (stables), 8 et 9 (intermédiaires) et 10 (instables). Plus précisément, dans le cas des profils de 1 à 6 (stables), on note que la profondeur de la nappe s'abaisse de 0,70/0,80 à 0,95/1,20 m lorsqu'on passe de profils de type 4, 5, 6 à un de type 1. On peut faire la même remarque pour les profils intermédiaires mais le phénomène est moins net. La figure en annexe III-2 illustre la variabilité interne de la profondeur de nappe pour chaque type de profil. Elle montre que plus le degré de stabilité du profil augmente plus la profondeur de la nappe dépend de celle de l'élément drainant.

Pour les rigoles, la gamme de variation de la profondeur de la nappe est plus restreinte car il est très rare de trouver une nappe plus basse que le niveau de la rigole. La profondeur de la nappe diminue de 0,60 à 0,40 m, de 0,50 à 0,20 m et atteint 0,20 m pour les profils respectivement de types 4 et 6 (stables), 8 et 9 (intermédiaires) et 10 (instables).

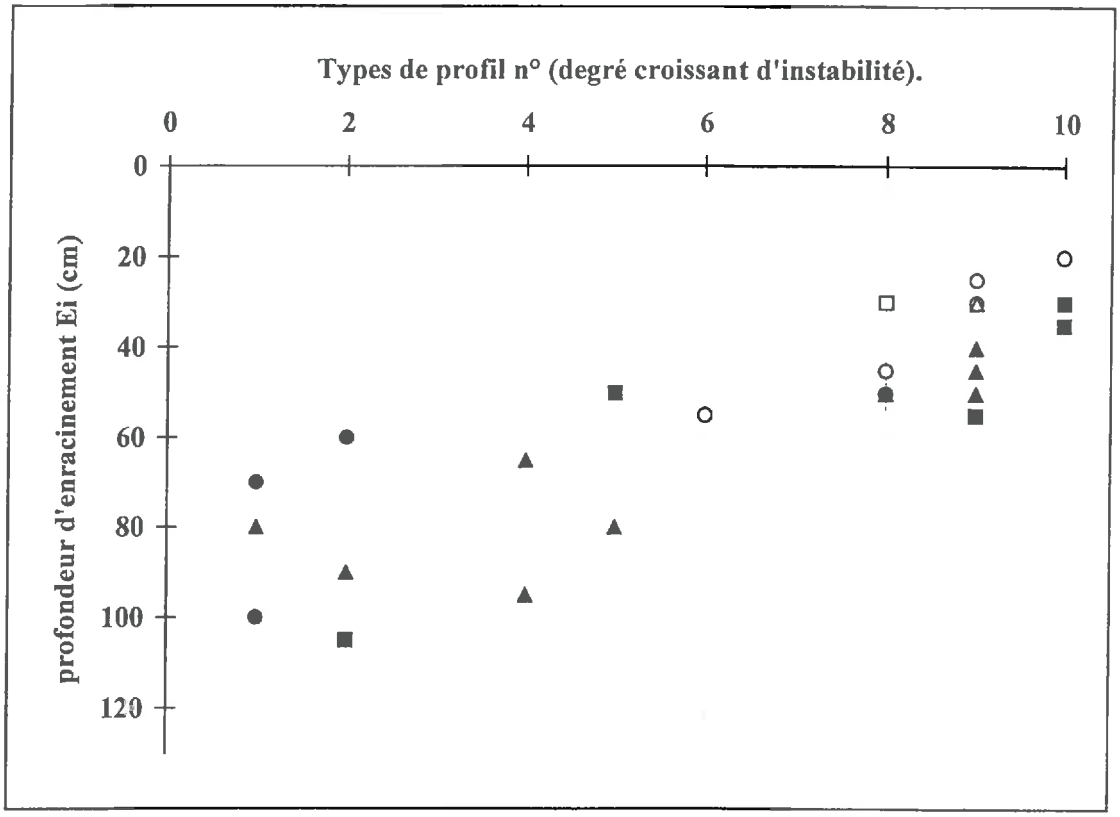


Figure III-3. Profondeur d'enracinement début montaison (Ei) : effet des types de sol, du mode de drainage et de l'année.
Rigoles (en clair), drains (noir) ; 1981 (rond), 1982 (triangle), 1983 (carré).

En ce qui concerne l'efficacité des modes de drainage, on constate que :

- dans le cas des profils de types 1 à 6 (stables), les drains abaissent plus la nappe (0,70 à 1,20 m) que les rigoles (0,40 à 0,60 m) ;
- dans le cas des profils de type 10 (instable), la nappe est peu profonde et se trouve dans la couche travaillée quels que soient les modes de drainage ;
- dans le cas des profils de type 8 et 9 (intermédiaires), la profondeur de nappe dépasse rarement 0,60 m. Les drains ont une efficacité légèrement supérieure à celle des rigoles. On note cependant que dans ces types de sol, la variation de la profondeur de nappe est élevée.

Enfin, il faut souligner que l'effet année climatique est peu marqué par rapport aux effets types de profil et modes de drainage.

2.2 - Profondeur d'enracinement début montaison (Ei).

- Profondeur d'enracinement, type de profil et mode de drainage.

Nous désignons par Ei la profondeur de l'enracinement au stade début montaison.

La figure III-3 illustre la relation entre type de profil et Ei. Elle montre que :

- à ce stade du blé, la profondeur atteinte par l'enracinement est extrêmement variable. Elle est de 20 à 105 cm et s'ordonne avec les types de sol. Les enracinements les plus profonds appartiennent à des situations de profil de type stable. De plus Ei différencie pour un type de profil de sol donné, les modes de drainage. Les situations drainées par drains ont un enracinement systématiquement plus profond que celles drainées par rigoles. Enfin, on ne distingue pas d'effet année. La profondeur d'enracinement du blé en fin d'hiver (début montaison) est un paramètre particulièrement sensible aux types de profil de sol et aux modes de drainage associés ; il ne semble pas sensible à l'effet année.

On note deux situations qui se classent mal par rapport à la relation : la première est un profil de type 5 en situation drainée (parcelle n° 15). Il se trouve qu'en 1983, l'observation de cette situation s'est faite en position amont du drain et du réseau (niveau du drain à environ 60/70 cm) ; la deuxième est un profil de type 2 drainé mais semée sans travail du sol après la récolte de maïs grain (parcelle n°6). Ces situations ne font plus exception si on utilise la

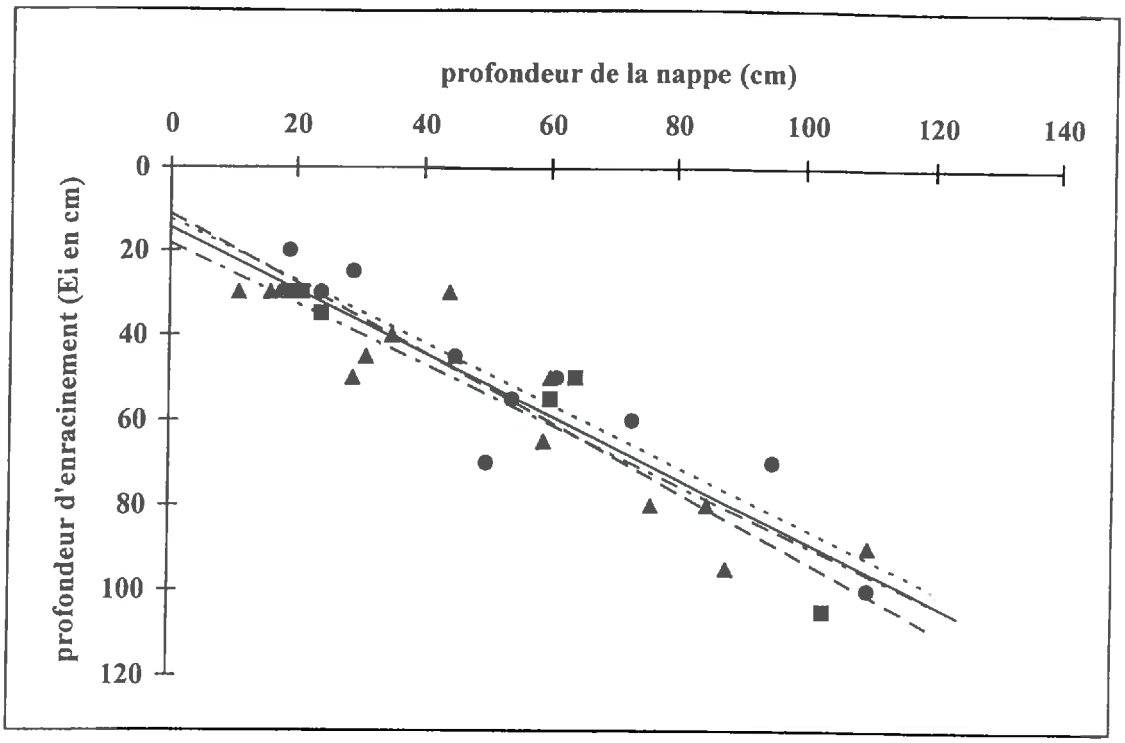


Figure III-4. Relation entre profondeur d'enracinement début montaison (Ei) et profondeur de nappe (cm).
Regression 1981, 1982, 1983, ensemble (pointillés, point tirets, tirets, continu) ; 1981 (rond), 1982 (triangle), 1983 (carré).

Tableau III-4. Régressions et équations de régression de la relation profondeur d'enracinement début montaison (Ei) X niveau piézométrique (Z). Valeur des paramètres de la régression : m = pente, b = ordonnée à l'origine, R^2 coefficient de détermination

		1981	1982	1983	Ensemble
	m	0.71	0.71	0.82	0.73
	b	11	18	11	15
	R^2	0.85	0.84	0.92	0.85
Nombre de parcelles		11	13	6	30

profondeur de nappe comme indicateur de l'état du milieu.

- Profondeur d'enracinement début montaison et profondeur de la nappe (Z).

La figure III-4 montre une proportionnalité stricte entre profondeur de la nappe et Ei. Le coefficient de régression (Tableau III-4) est de 0.85 pour l'ensemble des trois années, respectivement 0.85, 0.84, 0.92 en 1981, 1982, 1983. De plus les valeurs prises par les paramètres de la droite sont remarquablement voisins pour chaque année climatique : un abaissement de la nappe de 10 cm conduit à une augmentation de la profondeur d'enracinement d'environ 7 à 8 cm. On notera que lorsque le niveau piézométrique est inférieur à 30 cm, l'enracinement se cantonne à la couche travaillée.

- Profondeur d'enracinement maximum.

Nous désignons par Ef la profondeur de l'enracinement à la floraison qui est aussi la valeur maximum de la profondeur d'enracinement (Gregory et al., 1978). La figure III-5 illustre la liaison entre type de profil et Ef. Elle montre que :

- à ce stade du blé on trouve une profondeur atteinte par l'enracinement extrêmement variable. Elle varie de 40 à 150 cm et s'ordonne mais de façon plus grossière qu'avec Ei avec les types de sol. Les enracinements les plus profonds appartiennent à des situations de profil de type stable (types 1 à 6). Les situations drainées par drains ont un enracinement plus profond que celles drainées par rigoles mais uniquement pour les types de profil les plus favorables (types 1 à 8). Par contre pour les types de profil les plus défavorables (types 9 et 10) la profondeur de l'enracinement à la floraison ne différencie plus les modes de drainage. Enfin, et contrairement à Ei, on distingue un effet année sur Ef : la profondeur moyenne de l'enracinement, toutes parcelles confondues, augmente avec le déficit climatique de printemps. Ef est en moyenne plus profond en 1982 (printemps très sec), moyen en 1981 (printemps normal), et moins profond en 1983 (printemps très humide). *La profondeur maximum d'enracinement du blé dépend à la fois des types de profil de sol, des modes de drainage et de la valeur du bilan climatique de printemps.*

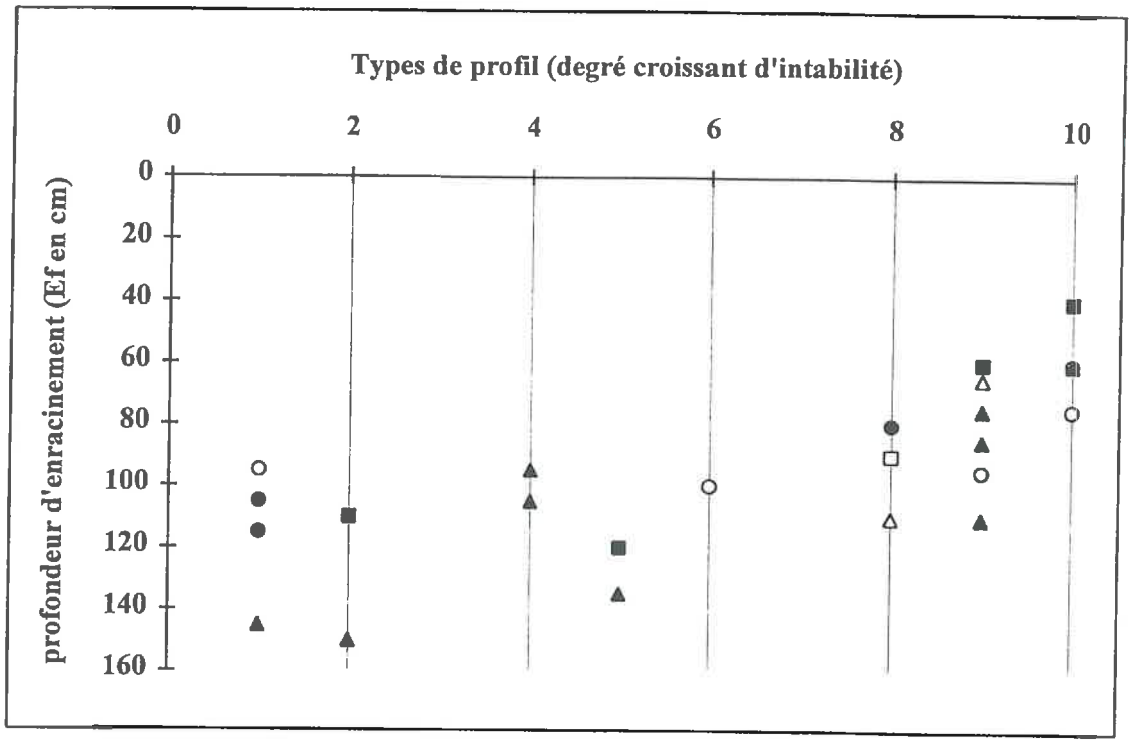


Figure III-5. Profondeur d'enracinement post floraison (Ef) : effet des types de sol, du mode de drainage et de l'année.
Rigoles (en clair), drains (noir) ; 1981 (rond), 1982 (triangle), 1983 (carré).

- Effet du bilan climatique de printemps sur l'allongement racinaire.

La figure III-6 et le tableau III-5 montrent la relation entre l'augmentation de la profondeur d'enracinement entre la montaison et la floraison d(E) et la profondeur d'enracinement début montaison Ei. La relation générale entre dE et Ei est dE = kEi + b où :

- k est négatif en 1981 lorsque le bilan climatique au printemps est nul (P = ETP). Il y a "rattrapage" ;
- k est nul en 1983 lorsque P >>> ETP. L'allongement des racines est pratiquement nul quelle que soit la profondeur atteinte début montaison ;
- k est positif en 1982 lorsque P << ETP. La croissance est homothétique.

Ces conclusions sont valables pour 11 situations sur 11 en 1981, 12 sur 13 en 1982, et 4 sur 6 en 1983.

- Situations particulières

Trois situations ne suivent pas les tendances observées. En 1982, sur une parcelle (n° 11), l'allongement racinaire est nul car apparaît dans le profil un niveau salé à 1 mètre. Cette parcelle est un ancien marais salant nivelé récemment. En 1983, deux parcelles n'ont pas eu une évolution "nulle" mais un rattrapage de la profondeur d'enracinement. L'un des sites a un profil de type 5 (n° 15), mais le drain est à faible profondeur 0.60 m (amont de drain) ; l'autre site (n° 22) est sur un profil de type 8 (intermédiaire), drainé par rigole où le sous-sol semble plus perméable que la couche travaillée (travail du sol fait dans de mauvaises conditions). Pour toutes les autres situations, les profils sont normaux quant à l'absence d'obstacles mécaniques ou chimiques.

3. Discussion - conclusion.

◆ La *profondeur de nappe* mesurée en période saturée classe bien les comportements hydrauliques des différents types de profils et modes de drainage sans être très sensible à l'effet année. Ce classement se révèle être le même que celui des types de sol obtenus a priori par combinaison de 3 horizons respectant un gradient d'instabilité.

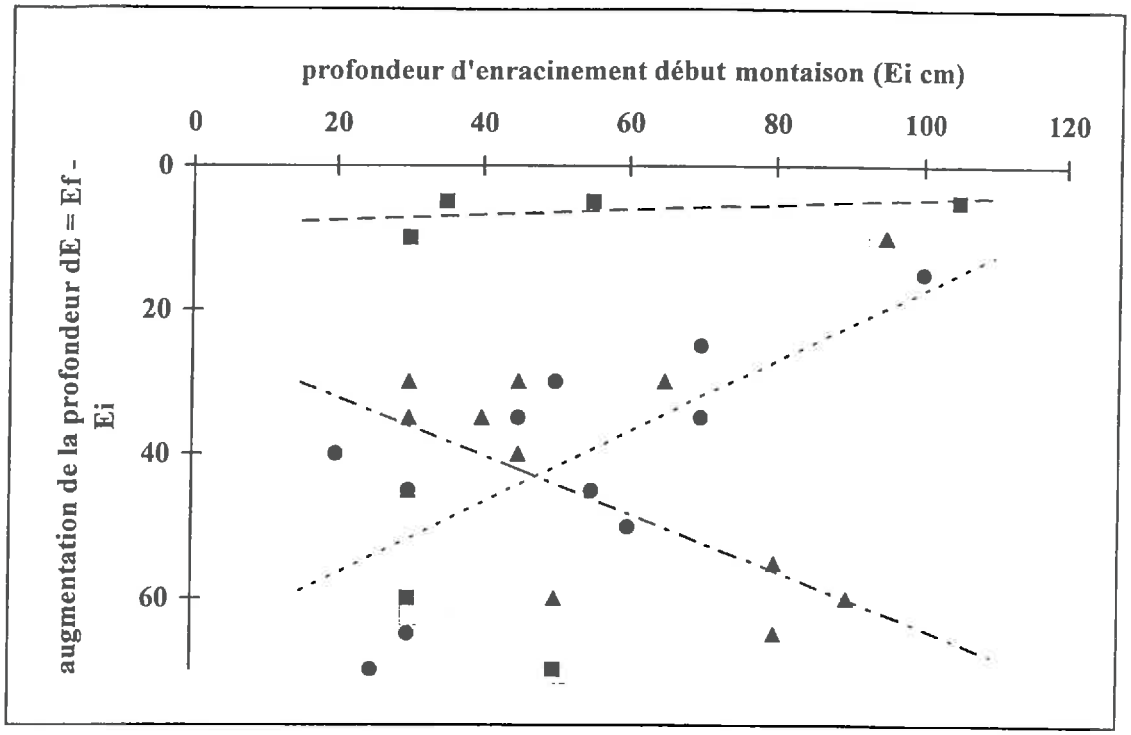


Figure III-6. Augmentation de la profondeur d'enracinement au printemps (dE) en fonction de celle atteinte en début montaison (Ei).
Regression 1981, 1982, 1983 (pointillés, point tirets, tirets, continu) ;
1981 (rond), 1982 (triangle), 1983 (carré). Les cas particuliers sont encadrés.

Tableau III-5. Régressions et équations de régression. Evolution de la profondeur d'enracinement (dE = Ef - Ei) en fonction de la profondeur atteinte montaison (Ei). Effet du bilan climatique au printemps.

		1981	1982	1983
Nombre de parcelles		11	12	4
Bilan climatique au printemps (mm)		-2	-159	90
	R^2	0.53	0.38	0.26
	dE	- 0.49Ei + 66	0.40Ei + 24	- 0.04Ei + 8.3
	k = dE/Ei	-0.44	0.40	# 0
		"rattrapage"	Croissance homothétique	Croissance nulle

La profondeur de la nappe en hiver est très variable et dépend du degré d'instabilité du profil et de la profondeur de l'élément drainant. Lorsque le profil a un degré de stabilité élevé (type 1, 2 et 3), la profondeur de la nappe est égale à celle de l'élément drainant ; à l'intérieur des types de profils qu'on peut qualifier de stables (type 1 à 6) le gradient de stabilité (1 > (2 et 3) > (4, 5, 6) paraît bien suggéré par le gradient de comportement hydraulique du drainage enterré. A l'opposé, lorsque le profil est instable (type 10), la nappe "évolue" dans la couche travaillée (H1) et au sommet du 1er sous-sol (H2). Dans ces situations, ce n'est pas la profondeur de l'élément drainant qui détermine celle de la nappe mais celle de l'horizon imperméable du profil. *Le drain ne présente donc ici aucun avantage décisif par rapport à la rigole pour la maîtrise de l'excès d'eau* à la parcelle.

Entre ces deux extrêmes, les profils types 8 et 9 dits "intermédiaires" représentent les situations dont l'imperméabilité se situe au niveau de l'horizon H2. Ici, les variations de profondeur de nappe sont les plus fortes aussi bien pour les drains que pour les rigoles, ce qui suggère une dépendance particulière de ces types de profil à un paramètre non pris en compte jusqu'alors à savoir le travail du sol.

En résumé, le comportement hydraulique est mesuré par la profondeur de la nappe en hiver qui rend compte de la combinaison mode de drainage x qualité des profils de sol. Plus précisément, la profondeur de la nappe en hiver s'aligne sur :
- la profondeur de la couche imperméable si celle ci se trouve au dessus de l'élément drainant,
- la profondeur de l'élément drainant si celui-ci se trouve au dessus de l'horizon imperméable.

Ces résultats confirment ceux trouvés pour trois autres années climatiques 1978, 79, 80 dans un réseau de parcelles enquêtées (Pons, 1985) et généralisent les études sur le drainage des sols des Marais de l'Ouest réalisées par Damour et al. (1972), Pons (1980), Collas (1983, 1985) et Collas et al. (1984).

La profondeur de la nappe en hiver telle que nous l'avons définie est un indicateur particulièrement intéressant pour caractériser le milieu aménagé. Peu sensible à l'effet année, cet indicateur permet de mesurer l'efficacité des divers modes de drainage dans des types de sol qui diffèrent par la stabilité structurale du profil. Réciproquement, le niveau piézométrique

peut être utilisé comme un outil de diagnostic de la qualité des sols sous réserve de respecter un certain nombre de règles : mesure de la nappe en période saturée à mi distance de 2 éléments drainants, estimation de la profondeur de drainage notamment dans les situations de profils stables. C'est pourquoi nous privilégions cet indicateur dans la suite de ce travail.

- On peut dégager *les facteurs et conditions qui jouent sur la dynamique de l'enracinement*. Jusqu'au début montaison, la profondeur de l'enracinement (Ei) est liée de façon étroite au niveau moyen de la nappe en hiver, qui lui même dépend du terrain (types de profil x modes de drainage). Ceci se traduit par une gamme de vitesses de pénétration de 2 à 7 mm/j (Gregory et al., 1978). La borne minimum correspond au profil de type 10 (instable) drainé par rigoles ou par drains, la borne maximum correspond au profil de type 1 (stable) drainé par drain. La profondeur maximum d'enracinement à la floraison dépend d'une part de la profondeur d'enracinement en début montaison et d'autre part, du bilan climatique durant le printemps (Ellis et Barnes, 1980). Ainsi, lorsque le bilan est positif, nul ou négatif, l'allongement racinaire est respectivement nul, diminue ou augmente avec l'augmentation de Ei.

- *L'analyse des situations particulières* nous montre la nécessité de contrôler la profondeur de la nappe en hiver et d'observer les profils de sol afin de vérifier s'il existe des conditions particulières qui limitent l'enracinement : hydromorphie, salinité, état structural de la couche travaillée. Enfin, si nous voulons mettre en évidence l'incidence de la qualité du sol sur le comportement hydraulique et le comportement du blé, il est nécessaire de traiter de façon synchronique les phases de croissance et de développement de la plante (parties aériennes et racines) et les périodes climatiques afin de mieux préciser la part qui revient à chaque élément dans les interactions plante x climat x sol.

- En l'absence d'autre facteur limitant, on peut proposer *un modèle de prévision de la profondeur d'enracinement* début montaison en fonction de la profondeur de nappe en hiver qui est directement lié au degré d'instabilité des profils de sol et au type de drainage. La profondeur d'enracinement maximum du blé dépendra de la valeur début montaison d'une part et de la valeur du bilan climatique au printemps. Ces modèles permettront de discuter des problèmes de nutrition du peuplement de blé et notamment de la nutrition minérale précoce (azote, P) ainsi que de l'alimentation hydrique en fin de cycle. Ils exprimeront aussi d'une

certaine manière la réaction de l'enracinement aux conditions d'hydromorphie de l'hiver et du printemps et/ou à l'état structural. Ils pourront être utilisés pour pronostiquer la profondeur asséchée d'un profil.

Il existe donc un parallélisme très étroit entre le comportement hydraulique, la profondeur d'enracinement et sa dynamique d'une part et la qualité des profils de sol modulée par les modes de drainage d'autre part.

On conclut que dans les terres de marais, c'est la profondeur de nappe qui apparaît première pour expliquer la profondeur de l'enracinement précoce. C'est donc un indicateur de *l'intensité de l'excès d'eau.* Celle ci est directement liée à l'interaction qualité de sol x mode de drainage, c'est-à-dire à la profondeur de la zone imperméable pour les profils instables et intermédiaires, et à la profondeur de l'élément drainant (c'est-à-dire aux modes de drainage) dans le cas des profils de sol stable. D'autres conditions renforcent ou au contraire réduisent cette dépendance : le bilan climatique de printemps et l'état structural de la couche travaillée et plus généralement les itinéraires techniques.

La typologie des profils réalisée à partir du degré de dispersion du matériau rend compte pour une large part du comportement au champ.

Bien qu'ils mettent en lumière un certain nombre de relations, ces résultats ne rendent pas précisément compte des mécanismes mis en jeu. En effet, les relations présentées ici associent des paramètres qui appartiennent à des domaines éloignés, ce qui réduit leurs valeurs explicatives. Cela nous conduit à poser la question : pourquoi la classification obtenue à partir de la combinaison de la stabilité structurale des échantillons de sols rend-elle compte d'un classement parallèle vis-à-vis de l'imperméabilité du profil et qui s'exprime par une profondeur de nappe caractéristique ?

Pour être explicatif, il s'agit :

1- de trouver les variables et liaisons intermédiaires entre propriétés de dispersion et profondeur de nappe d'une part, et profondeur de nappe et "profondeur d'enracinement" d'autre part ;

2- de mettre en relation la propriété de dispersion des sols (type de profil de sol) et la perméabilité du sol (circulation de l'eau dans le profil) par l'intermédiaire de l'état structural. En effet, nous postulons que c'est l'état structural du profil qui rend compte de l'imperméabilité in situ.

Est-ce l'eau (asphyxie) ou est-ce l'état structural du sol (contrainte mécanique) qui limite l'enracinement précoce du blé ? Nous tenterons de répondre en étudiant le cas d'un hiver où les pluies sont trop faibles pour saturer le sol. Dans ce cas quelle est l'incidence de l'absence de nappe sur la profondeur d'enracinement ?

Chapitre 2. Cas particulier de comportement lorsque l'hiver est peu humide.

1. Introduction.

Il existe des années où la quantité de pluie en l'automne et en hiver est trop faible pour qu'il y ait saturation et donc drainage. La nappe se trouve alors au-dessous des éléments drainants. Ce cas se présente-t-il souvent ? Que deviennent alors les relations qui associent profondeur de la nappe d'une part, efficacité du drainage, et profondeur d'enracinement début montaison d'autre part ?

Lors de la campagne 1986-1987 qui présente la particularité d'un hiver très peu humide, nous avons tenté d'extrapoler les différents résultats et modèles présentés plus haut afin de tester leur validité et les vulgariser auprès des agriculteurs. Pour cela, nous avons réalisé une enquête sur des parcelles de blé en liaison avec le Développement agricole. Il s'agissait pour les agriculteurs d'améliorer leurs résultats économiques grâce à une conduite de la culture de blé adaptée aux terres de marais.

Pour réduire notre propos, nous nous limitons aux résultats concernant la profondeur de la nappe et de l'enracinement début montaison. Les résultats plus complets ont été diffusés

Tableau III-6. Caractéristiques des situations enquétées en 1986-87. Types de profil et maîtrise hydraulique.

Maitrise hydrau--lique :	Isole--ment	OUI		NON	Total	
	Drai--nage	drains	rigoles	rigoles		
Types de profil						
S : stables		4		2	6	6/24
i : intermédiaires		9	4	3	16	16/24
I : instables		1		1	2	2/24
Total		14	4	6	24	

dans Pons et al. (1987).

2. Dispositif.

Nous avons utilisé l'enquête parcellaire comme support pratique et méthodologique de cette démarche. Chaque agriculteur suit une de ses parcelles de marais cultivée en blé. Le réseau est complété par 7 parcelles du Domaine expérimental. Nous avons suivi en tout 24 parcelles ayant des caractéristiques de milieu très variées (Tableau III-6) : types de profil, isolement hydraulique et modes de drainage. On note que 6 parcelles n'ont pas d'isolement hydraulique ; les situations enquêtées correspondent à des profils de type plutôt "intermédiaires" (les sous-sols ont des stabilités structurales faibles).

Les observations et enregistrements ont concerné outre l'état du peuplement végétal et le rendement, l'observation du profil cultural et racinaire début montaison. On a notamment observé sur le profil :

1- la structure du sol, et notamment le niveau de structure jugé massif (à porosité très faible),

2- la profondeur de l'enracinement,

Les relevés piézométriques ont été réalisés toutes les semaines. La profondeur moyenne de la nappe a été calculée sur 11 semaines à partir du 5 janvier.

3. Résultats.

3.1 - Les caractéristiques climatiques de la campagne 1986-87.

L'été 1986 est très sec : le déficit climatique (P - ETP < 0) cumulé est de 510 mm et se termine la deuxième décade d'octobre T0. Les pluies sont modestes en novembre et décembre, très faibles en janvier et en février : le cumul des pluies efficaces est de 85, 150, 170, 189 mm respectivement à la fin des mois de novembre, décembre, janvier et février. Le déficit climatique D0 commence dès la première décade de mars. La somme des pluies efficaces entre les deux dates T0 et D0 a été de 180 mm. Le déficit climatique atteint 100 mm dès le 10 mai. De l'automne 1966 à la fin 1993 (27 années) ont trouve deux campagnes hivernales qui

Tableau III-7. Effet de l' isolement hydraulique, du mode de drainage, de la qualité du profil de sol (S : types 1 à 6 ; i : 7 à 9 ; I : 10) et des précédents culturaux (P, A : cult print., autom.) sur la présence ou l'absence de nappe dans les parcelles. Les divers cas d'évolution de nappe pendant l'hiver 1986-87.

Maitrise hydrau--lique :	Isolement	OUI							NON		
	Mode de drainage	DRAINS				RIGOLES			RIGOLES		
	Précédent	P		A		P	A		P		A
	Types de profil	S	i et I	S	i et I	S	S	i	S	I	S
Nombre de parcelles :											
nappe présente		0	0	0	1	0	1	2	3	1	2
absente		2	8	2	1	1	0	0	0	0	0
Cumul de pluies efficaces pour le drainage (mm)											
		>180	170	>180	150	170	140	140	<140	<140	<140
Evolution de la nappe (voir fig. III-7)		Cas 5	Cas 4		Cas 3		Cas 2			Cas 1	

ont été plus ou aussi sèches : 1973, 1989. Ce cas se présente donc 1 année sur 10. (Annexe I, Tableau 3).

3.2 - Conséquences sur les niveaux de nappe.

L'hiver sec a entraîné une discrimination des parcelles par rapport à l'existence de la nappe (Tableau III-7). Sur 24 parcelles, il y a eu 9 parcelles où la nappe a été mesurée et 15 où la nappe a été trop basse pour être mesurée (Z au-dessous de 1,00 mètre). Dans la presque totalité des cas, la nappe a pu être mesurée dans les situations drainées par rigoles avec ou sans isolement hydraulique. Elle s'est révélée être trop basse ou mal établie pour être mesurée dans les situations drainées par drains. Seule la nappe d'une situation, de profil type 1, drainée par drain, a été mesurée grâce à un piézomètre posé à 2 m de profondeur.

La figure III-7 illustre l'évolution de la nappe en fonction du bilan climatique hebdomadaire dans les divers cas rencontrés.

Sans isolement hydraulique (cas 1) et malgré la présence de rigoles, la profondeur de la nappe atteint 15 cm aux premiers jours de janvier et s'y maintient jusqu'à la mi mars.
Avec isolement hydraulique sur rigoles (cas 2), le niveau moyen de nappe est bas (-70 cm), on note une brusque montée début février, puis une descente régulière due au bilan climatique déficitaire au cours du mois de mars.

Avec isolement hydraulique sur drains (cas 4), il y a très généralement absence ou présence fugace de nappe au-dessus des drains. On note cependant une exception (cas 3), sur un profil de qualité intermédiaire (type 9), et derrière blé, il y a nappe, alors que sur une situation de même type (cas 4), mais derrière tournesol la nappe n'est pas montée au-dessus des drains. De même le drainage n'a pas fonctionné (cas 5) sur une situation de profil type 1 : le niveau piézométrique mesuré grâce à un tube placé à 2 mètres de profondeur a varié entre 1,80 m et 1,60 m avec une légère montée début février.

Pendant l'hiver 1986-87, le drainage a fonctionné lorsque le cumul de pluies efficaces a atteint un certain seuil pour saturer le profil. Or ce seuil est variable selon les parcelles. On fait l'hypothèse que c'est l'état hydrique du profil lors de la réhumectation qui explique ces différences. Le tableau III-7 classe les situations par rapport au cumul de pluies efficaces

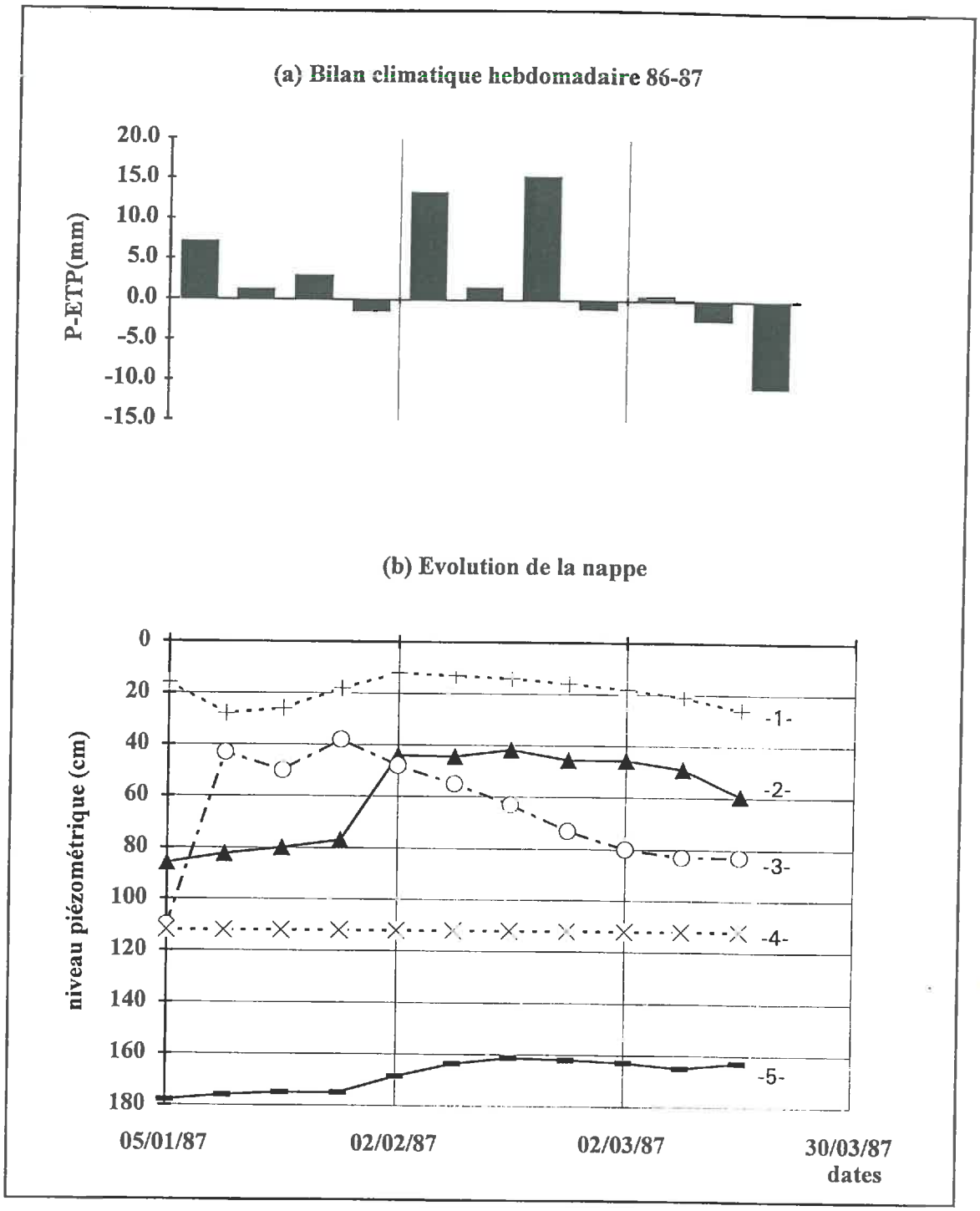


Figure III-7. Le bilan climatique (a) et l'évolution de la nappe (b) en 1987
Cas -1- pas d'isolement hydraulique, rigoles, profil type 10.
Cas -2- isolement hydraulique, rigoles, profil type 5.
Cas -3- isolement hydraulique, drains type 9 précédent blé.
Cas -4- isolement hydraulique, drains type 9 précédent tournesol.
Cas -5- isolement hydraulique, drains type 1 (prof. du piézo 2m).

nécessaires au fonctionnement du drainage. Il montre que l'état d'assèchement du profil en fin d'été est fonction de la maîtrise hydraulique (isolement hydraulique, mode de drainage), du type de profil et du précédent cultural (profondeur d'enracinement, place du cycle cultural par rapport à l'année climatique, intensité de la sécheresse).

3.3 - Profondeur d'enracinement.

- Cas où la nappe existe.

Dans les parcelles où la nappe s'est établie, la figure III-8 montre des situations où les intervalles de variation de Z (profondeur de la nappe) et de Ei (profondeur d'enracinement) sont faibles. C'est la raison pour laquelle la relation linéaire entre la profondeur d'enracinement et de nappe est médiocre ($Ei = 0.393\ Z + 41.7$, avec $R^2 = 0.270$, $n = 10$). Si nous associons une situation drainée de type 1 sur laquelle un piézomètre a été posé à 2 m de profondeur et où la nappe s'est maintenue autour de 160 cm, la relation prend la valeur $Ei = 0.792\ Z + 23.7$ avec $R^2 = 0.90$ et $n = 11$. Si la conclusion ne peut être tirée avec certitude compte tenu de la répartition des points, ces résultats ne remettent pas en cause la relation trouvée précédemment : $Ei = 0.73\ Z + 14.5$. La relation est parallèle au modèle : globalement, l'enracinement début montaison est d'une dizaine de cm plus profond en année sèche.

- Absence de mesure de nappe.

Par contre, le modèle est en défaut pour les autres situations (absence de nappe ou hauteurs de nappe mal établies). Si le modèle avait été explicatif et donc prévisionnel, les profondeurs d'enracinement observées auraient dû être supérieures à un mètre. Or, on constate que les profondeurs d'enracinement se cantonnent entre 45 et 80 cm. Il y a donc une contrainte autre que la profondeur de nappe qui a limité la profondeur d'enracinement.

Dans les situations où le modèle est pris en défaut (13 situations sont dans ce cas là), on constate que l'enracinement s'arrête quand l'état structural est massif et compact ce qui correspond à une densité forte du matériau (porosité très faible). La figure III-8 montre la relation linéaire entre la profondeur d'enracinement (Ei) et la profondeur où la structure est

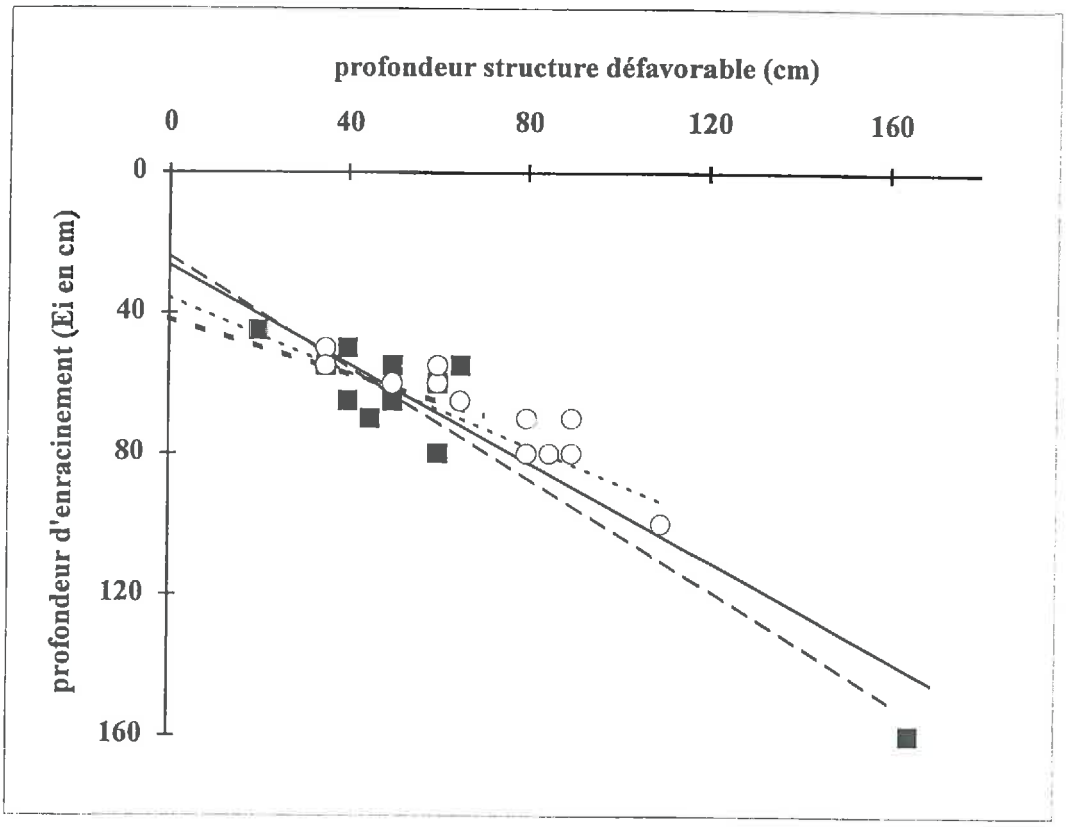


Figure III-8. Relation entre la profondeur d'enracinement début montaison (Ei) et la profondeur où la structure est défavorable.
Situations avec nappe (carré noir), sans nappe (rond blanc). Régression avec, sans nappe, ensemble : tirets, pointillés, continu

défavorable (poro). La relation a pour valeur : Ei = 0.53 x (poro) + 35.6, avec n = 13 et R^2 0.78. Une situation drainée de profil type 1 où la roche sous-jacente apparaît à 1 m (marais en bordure de terre haute) se rattache à ce cas là.

Pour résumer, on trouve que la profondeur de l'enracinement début montaison est limitée par la profondeur de la nappe pour 10 parcelles, le niveau de la roche pour 1 parcelle, et, lorsque la nappe n'a pu être mesurée par le niveau de structure défavorable pour 13 parcelles.

On peut réunir l'ensemble des diverses situations observées en liant la profondeur d'enracinement et le niveau de la première condition limitante. Ce niveau sera selon les situations, la profondeur de la nappe ou le niveau de porosité très faible (niveau de la roche). La relation entre la profondeur d'enracinement (Ei) et la profondeur de la 1ère condition limitante s'exprime par Ei = 0.70 Z + 26.5, avec Z profondeur moyenne de la nappe (si elle existe) ou niveau de porosité très faible, avec n = 24 et R^2 = 0.84. Le résultat ainsi obtenu est proche du modèle Ei = 0.73Z + 14.5 présenté précédemment.

4. Discussion.

Lors de l'hiver sec de 1986-87, la nappe n'existe que lorsque
- les parcelles n'ont pas de contrôle du niveau d'eau (absence d'isolement hydraulique),
- le drainage est superficiel et la qualité du sol moyenne.

La profondeur de l'enracinement est alors limitée par le niveau moyen de la nappe. Le modèle présenté précédemment se trouve vérifié.

Lorsque la nappe est trop basse pour être mesurée, c'est une structure défavorable décrite comme ayant une porosité très faible qui limite la profondeur d'enracinement. Pour la plupart des situations que nous avons examinées, on peut faire l'hypothèse que cet état défavorable est dû à la sodicité du matériau (dont rend compte la typologie des profils).
Cependant une hypothèse unifie l'ensemble des résultats. La *profondeur de la nappe en hiver est l'expression d'une imperméabilité dont l'origine est un état structural défavorable*. Cet état

structural défavorable est lié à la *sodicité du matériau* (type des profils). Or le niveau piézométrique ne peut révéler la profondeur d'un état structural défavorable que *si l'hiver est suffisamment humide pour saturer le sol pendant une période suffisante* qui permette de comparer toutes les situations entre elles.

5. Conclusion.

L'exploration d'une plus grande variabilité de milieux et de situations aménagées dans des conditions climatiques assez exceptionnelles nous permet d'émettre un ensemble d'hypothèses. Elles unifient les relations mettant en jeu la qualité des profils de sol, le comportement hydraulique, le comportement agronomique, la profondeur d'enracinement d'une part et le profondeur de la nappe d'autre part.

En l'absence d'isolement hydraulique, la profondeur de la nappe est réglée par le niveau hydraulique général du bassin de marais (généralement haut en hiver) et par les rigoles. Elle est relativement indépendante de la qualité du profil de sol.

Dans le cas d'une maîtrise hydraulique forte (isolement hydraulique et drains enterrés), le niveau de porosité très faible est assimilable à celui de la profondeur de la nappe en hiver. Il correspond à une structure "défavorable" à la circulation de l'eau qui génère l' indicateur "profondeur de la nappe en hiver".

Pour que cet indicateur existe, lorsqu'il y a maîtrise hydraulique, il est nécessaire que le profil soit saturé pendant suffisamment de temps pour établir un niveau moyen de la nappe. Ce niveau se révèle être le même que celui où la porosité du sol est jugée très faible.

Le cumul de pluies efficaces nécessaires à la saturation du profil dépend de l'état d'assèchement obtenu après la récolte du précédent, c'est-à-dire de la profondeur de l'enracinement qui est fonction du mode de drainage et du type de sol. Cet assèchement dépend aussi du système de culture : pour un même type de sol aménagé (type 9), 150 mm de pluies efficaces provoquent le drainage après un blé et 170 mm n'ont pas suffit après un tournesol.

La typologie des profils réalisée à partir du degré de dispersion du matériau rend compte pour une large part du comportement au champ. C'est l'interaction qualité de sol x mode de drainage qui détermine la profondeur de la nappe en hiver. Lorsque la maîtrise hydraulique est la plus forte (isolement hydraulique et drains), profondeurs de nappe et d'enracinement précoce se trouvent au niveau du premier horizon imperméable du profil. C'est H1 pour les profils instables (type 10), H2 pour les profils intermédiaires (types 9 et 8), H3 pour les types 6,5,4 et au delà de H3 pour les types 3, 2 et 1.

III-B. LE COMPORTEMENT DE LA COUCHE TRAVAILLEE.

Chapitre 3. Effet de la stabilité structurale et des modalités de travail du sol sur le comportement de la couche travaillée.

1. Introduction.

Nous avons déterminé la profondeur de la zone imperméable du sous sol grâce à la mesure de la profondeur de nappe en hiver indicateur du niveau ayant une structure défavorable. Nous voulons juger dans cette deuxième partie du degré d'imperméabilité de l'horizon travaillé car il commande la circulation des fluides dans le sol. Il s'agit donc de décrire, d'expliquer et de juger l'état structural de la couche travaillée.

La caractérisation de l'état structural et plus particulièrement de la couche travaillée initiée par Hénin et al.(1969) et développé par Manichon (1982a, b), Gautronneau et Manichon (1987), Manichon et Roger-Estrade (1990) a été complétée par l'étude de l'influence des systèmes de culture sur l'évolution de la fertilité du milieu. Ici la composante de fertilité qu'on étudie est la perméabilité du sol et l'objectif est d'évaluer cette grandeur à partir de la description de l'état structural. Or les difficultés sont nombreuses pour étudier son évolution. Elles tiennent à la forte variabilité dans le temps et dans l'espace des états du profil d'une part et d'autre part à la multiplicité des facteurs à considérer pour les expliquer. Nous tentons de relever le défi par un dispositif où on réduit la variabilité intra annuelle en choisissant un moment bien particulier (fin d'hiver), et où on dispose d'une gamme de stabilité structurale qui peut expliquer l'état structural observé.

L'état structural en fin d'hiver de la couche travaillée dépend non seulement de la stabilité structurale du matériau mais est aussi des modalités de travail du sol et du climat (Figure III-9). Cet état s'observe

- au stade ultime de l'évolution de l'état structural en situation d'excès d'eau (pendant la période de bilan climatique >0). Le dessèchement du profil qui succédera au ressuyage entraînera le retrait des argiles. Sous cette nouvelle contrainte un autre arrangement des éléments structuraux se développera et se superposera à l'ancien ;
- au début de la montaison du blé.

Notre but ici est de mettre en évidence pour la couche travaillée

- l'effet respectif de la stabilité structurale du matériau et des modalités de travail du sol sur l'état structural observé en fin hiver ;
- les conséquences sur l'enracinement.

Pour cela

- nous caractérisons l'état structural de la couche travaillée et l'état de surface ;
- nous classons les diverses modalités de travail du sol par rapport à la porosité prévisible créée.
- nous expliquons la porosité observée en fin d'hiver par la stabilité du matériau et les diverses modalités de travail du sol.

2. Matériel et méthodes.

2.1 - Le dispositif expérimental.

Les situations étudiées sont celles que nous avons retenues pour l'étude des comportements hydrauliques et de la profondeur d'enracinement du blé. Nous avons constitué un dispositif expérimental en combinant la stabilité structurale des situations et les diverses modalités de travail du sol pratiquées que nous désignerons par ITK. Les traitements sont constitués par une gamme de stabilité structurale de la couche travaillée, et par les divers ITK pratiqués. Les variables étudiées sont l'état structural de la surface et celui de la couche habituellement travaillée. Pour cette dernière, on note aussi la densité racinaire.

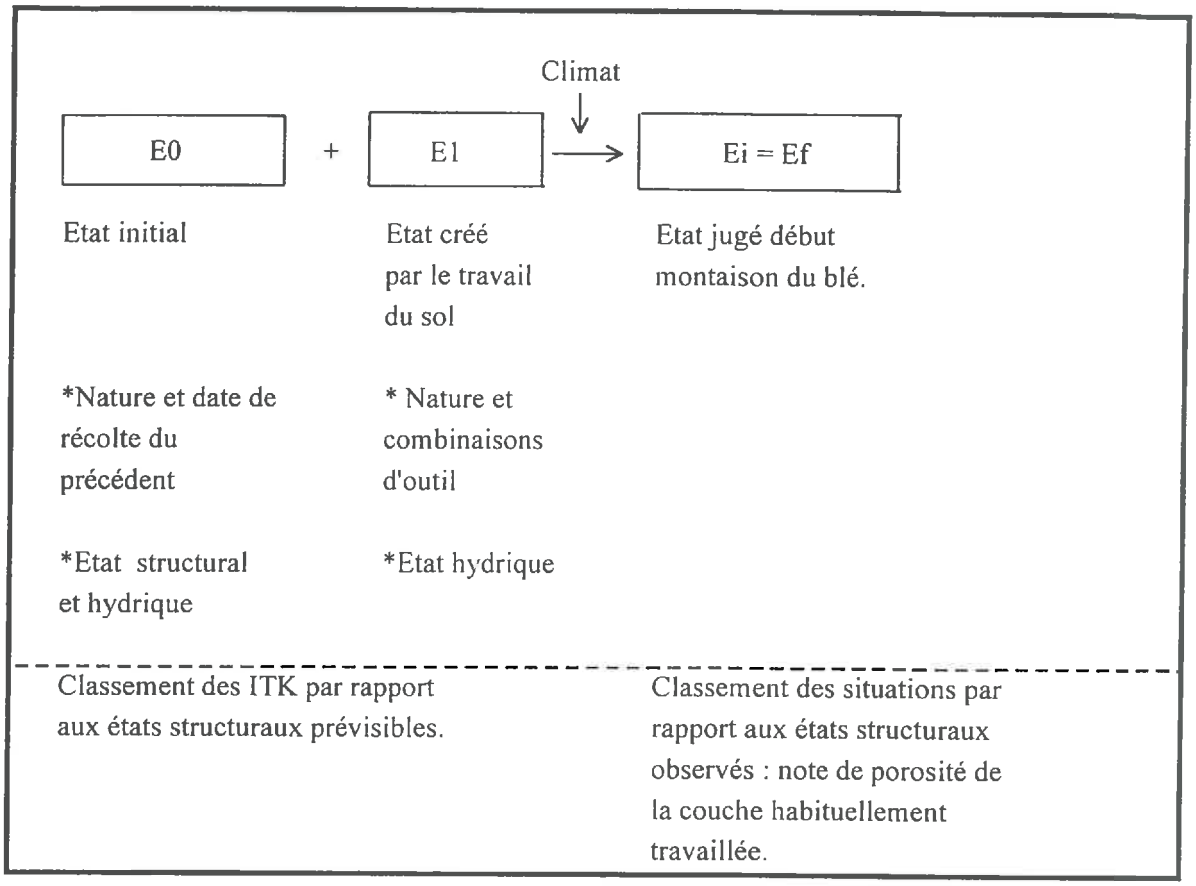


Figure III-9. Evolution de l'état structural en fonction de l'état initial, des conditions de milieu et du travail du sol.

2.2 - Les traitements.

- La stabilité structurale.

Elle est estimée par l'Indice de Dispersion de la couche habituellement travaillée (0-30 cm). Nous disposons de 12 situations "stables" avec ID <= 3 (profils type 1, 2, 4 et 6) ; 7 situations intermédiaires avec 4 <= ID <= 6 (profils type 8 et 9) ; 8 situations avec 7 <= ID <= 9 (profils type 8, 9 et 10) ; 3 situations avec ID >= 10 (type 10).

- Les modalités de travail du sol : inventaire et classement a priori par rapport à l'état structural E1 créé au semis.

Les modalités de travail du sol (nature et date des opérations culturales) ont été enregistrées entre la récolte du précédent et le semis de blé. A priori, l'état structural observé en fin d'hiver (Ei = Ef) résulte d'un état initial de la couche travaillée (E0) qui a évolué sous l'effet du travail du sol et du climat. On supposera les états structuraux et hydriques initiaux (E0) à peu près équivalents car il n'y a pas eu de conditions difficiles de récolte du précédent avant le travail du sol pour l'ensemble des parcelles. Par contre, les opérations culturales et les conditions hydriques ont été très variées et ont abouti à créer des états au semis E1 et en fin d'hiver Ei différents (Figure III-9).

Les pratiques (Annexe III-3).

Nous avons fait l'inventaire des pratiques en prenant comme hypothèse qu'une part importante de la *variabilité* est expliquée par la *date de récolte du précédent* et par les *conditions climatiques* (Collectif, 1980 ; Pellerin, 1984). Ces deux éléments conditionnent *l'état hydrique* du sol. Celui ci a un effet déterminant sur *l'état créé par le travail du sol* et va donc jouer sur le choix des opérations successives pour installer la culture et permettre une croissance optimale. Cette cohérence entre les différentes opérations définit le concept *d'itinéraire technique* (Sébillotte, 1978).

L'état hydrique a été estimé par le cumul du bilan climatique à partir du retour des pluies (T0). Nous avons défini (Pellerin, 1984) trois états : « sec » (avant le retour des pluies

T0), « réhumecté » [la somme des pluies efficaces à compter de T0 est inférieur ou égale à 60 mm (T60)], « humide » (la somme des pluies efficaces à partir de T0 > 60 mm).

L'inventaire des pratiques

Les tableaux 1, 2 et 3 de l'annexe III-3 donnent les pratiques en précisant la nature du précédent, la synchronie entre les dates d'interventions, les pluies et ETP journaliers, le cumul du bilan climatique à partir de T0 pour chaque parcelle et campagne. Le tableau de l'annexe III-4 rassemble l'ensemble des pratiques en 16 ITK différents.

* Après une récolte de culture d'automne, le *travail profond est toujours fait en condition sèche* (ITK n° 1 à 5 pour 14 parcelles). Les modalités de travail sont désignées par les *ITK N° 1 à 10*. La moitié des parcelles ont fait l'objet d'une reprise en condition sèche ou réhumectée [*ITK 1 et 3* : 2 en 1981 et 5 en 1982] suivie par 1 [*ITK n° 1* : 1 en 1981 et 3 en 1982] ou 2 reprises en humide [*ITK n° 3* : 1 en 1981 et 2 en 1982]. Les autres parcelles ont été reprises directement en condition humide 1 fois (*ITK n° 2* : 1 cas en 1981, 1 en 1982 et 2 en 1983), ou deux fois (*ITK n° 4* : 2 cas en 1983) ou trois fois (*ITK n° 5*, 1 cas en 1982). On a un seul cas de culture de printemps (maïs ensilage en 1981) où on a pu réaliser le travail profond en condition sèche.

* Les autres ITK (ITK n° 6 à 16, 16 parcelles) sont faits après récolte d'une culture de printemps (maïs ensilage, tournesol, maïs grain) suffisamment tardive pour amener les stratégies alternatives suivantes :

- *un travail profond en condition réhumectée (ITK n° 6 à 8)* suivi de 1 (ITK n° 6, 1 cas en 1983), 2 (ITK 7, 5 cas, 3 en 1981, 1 en 1982 et en 1983) ou 3 reprises en condition humide (ITK 8, 1 cas en 1981) ;
- *un travail profond en condition humide (ITK n° 9 et 10)* suivi de 1 (ITK 9, 1 cas en 1981) ou 2 reprises (ITK 10, 2 cas en 1982) ;
- *un travail superficiel en condition sèche (ITK n° 11)* suivi de 2 reprises (1 cas en 1982) ;
- *un travail superficiel en condition réhumectée (ITK n° 12 et 13)* suivi de 2 (ITK 12, 1 cas en 1981) ou 3 reprises (ITK 13, 1 cas en 1981) ;
- *un travail superficiel en condition, humide (ITK n° 14 et 15)* suivi de 1 (ITK 14, 1 cas en 1982) ou 2 reprises (ITK 15, 1 cas en 1982) ;

- *l'absence de tout travail* avec *semis direct (ITK n° 16)*, 1 cas en 1981.

Remarques sur l'effet du milieu sur les pratiques.

* On note un effet sol sur

- les précédents du blé (Annexe III-4). En sols stables les précédents sont des cultures de printemps (12 parcelles sur 12) et en sols intermédiaires et instables ce sont la plupart du temps des cultures d'automne ou d'hiver (14 cas sur 18). C'est pourquoi toutes les modalités de travail ne se retrouvent pas dans tous les types de sol : en sols instables (ID >= 10) et dans la plupart des situations intermédiaires, il y a absence de travail profond en condition humide ;
- la nature des outils de travail profond. Sur les sols stables c'est la charrue qui est plutôt utilisée. Sur les sols intermédiaires et instables, la charrue est remplacée par le chisel ou la charrue-bêche. C'est ainsi par exemple que la parcelle 21 dont l'antéprécédent est une prairie naturelle et le précédent un tournesol n'a pas été retournée et présente un épais mât de matière organique mal enfoui ;
- l'utilisation de gypse sur des parcelles instables et intermédiaires 35, 33.

* On note un effet année. En 1981 et 1982, la gamme des ITK est étendue. Par contre en 1983, les itinéraires techniques sont proches (travail profond en condition sèche suivi de 1 ou 2 reprises en condition humide).

Construction d'une typologie d'ITK.

Nous classons l'ensemble de ces pratiques grâce à une typologie dont la finalité est de pronostiquer l'état structural au moment du semis. Pour cela nous construisons un modèle qualitatif qui relie les ITK pratiqués et les états structuraux. Dans une première étape on estime * le bilan fragmentation-compaction des ITK pratiqués et * l'état de surface obtenu à travers le diamètre modal des mottes. Puis on ordonne et regroupe les ITK selon leur aptitude à favoriser la circulation de l'eau et la densité d'enracinement dans la couche travaillée.

Sa construction s'appuie sur les travaux de Damour et Pons (1979), Collectif (1980), Pellerin (1984, 1986), Laporte et al. (1984), Manichon (1988). Elle est détaillée en annexe III-5. Elle est fondée sur l'évolution des propriétés physiques du sol avec l'humidité. Le sol est mécaniquement très résistant, compact et peu sensible au tassement s'il est sec ; il se

fragmente lorsqu'il est réhumecté ; il devient très adhésif, plastique et très sensible au tassement lorsqu'il est humide (Tableau 1 de l'annexe III-5).

Ainsi, Pellerin (1984, 1986) montre que *le labour* a un effet de fragmentation faible en condition sèche (blocs de 20 à 30 cm) ou forte (mottes hétérogènes souvent inférieures à 10/15 cm) en condition réhumectée. L'effet de fragmentation disparaît en condition humide (bandes de labour moulées). Nous extrapollons ce résultat au *travail profond* réalisé avec chisel et charrue bêche en condition sèche ou réhumectée.

Les sols étant gonflants, l'évolution du travail profond se fait grâce au potentiel de fissuration du sol. Ce potentiel est fort, plus faible ou nul si le sol est respectivement sec, réhumecté ou humide (Tableau 2 de l'annexe III-5).

Dès cette étape, on peut pronostiquer l'effet des caractéristiques et des conditions de travail après récolte sur la circulation de l'eau et l'enracinement de la couche travaillée. En conditions sèche et réhumectée, la circulation de l'eau et l'enracinement seront favorisés par un travail profond et mais peu par un travail superficiel ; en condition humide les compactions et les lissages provoquent tassements et imperméabilité du fond du travail ce qui devrait être défavorable à la circulation de l'eau en profondeur et à l'enracinement. De même l'absence de travail devrait être, lui aussi, défavorable.

Compte tenu des états après travail profond, *les reprises* vont provoquer un tassement et un émiettement plus ou moins important (Tableau 3 de l'annexe III-5). Le *tassement* sera nul, réduit ou important selon que l'horizon à reprendre sera sec, réhumecté ou humide. Nous considérerons que le volume tassé par les reprises est * lié au rapport largeur de passage de roue / largeur de travail de l'outil, * proportionnel au nombre de passages en condition humide si on suppose qu'on ne repasse pas sur les zones tassées une première fois. S'il y a passage toujours au même endroit, le volume tassé est constant et égal à celui d'un passage. (Manichon, 1988). Ceci aboutit à classer puis à regrouper les ITK qui produisent des états prévus proches (Tableau 4 de l'annexe III-5).

Tableau III-8. Typologie des itinéraires techniques pratiqués entre récolte du précédent et semis de blé en fonction des états structuraux prévus au semis. En chiffre arabe n° d' identification de l'ITK (voir annexe III-1). |nombre de parcelles|.

-a- Groupes par rapport à la porosité prévue de la couche travaillée

I, II, III, IV, V : porosité forte, moyenne, faible (après travail profond), faible (après travail superficiel), très faible.

Travail après récolte :								
Profondeur :		profond (0-30 cm)			superficiel (0-15 cm)			pas de travail
Conditions hydriques :		Sec	Réhumecté	Humide	Sec	Réhumecté	Humide	
Reprises Conditions hydriques	Nombre de passages							
sèche suivie par humide	1							
	1	1 = I [5]						
	2	3 = II [3]						
humide	1	2 = I [4]	6 = I [2]	9 = II [1]			14 = IV [1]	16 = V [1]
	2	4 = II [1]	7 = II [4]	10 = III [2]	11 = IV [1]	12 = IV [1]	15 = V [1]	
	3	5 = III [1]	8 = III [1]			13 = V [1]		

-b- Groupes par rapport à la taille prévue des mottes en surface.

G, M, P : diamètre de mottes (cm) > 8, entre 8 et 4, < 4.

Travail après récolte :								
Profondeur :		profond (0-30 cm)			superficiel (0-15 cm)			pas de travail
Conditions hydriques :		Sec	Réhumecté	Humide	Sec	Réhumecté	Humide	
Reprises Conditions hydriques	Nombre de passages							
sèche suivie par humide	1							
	1	1 = G [5]						
	2	3 = M [3]						
humide	1	2 = G [4]	6 = M [2]	9 = G [1]			14 = G [1]	16 = P [1]
	2	4 = M [1]	7 = M [4]	10 = G [2]	11 = P [1]	12 = P [1]	15 = G [1]	
	3	5 = M [1]	8 = M [1]			13 = P [1]		

Les reprises vont aussi *émietter* le sol. Comme le potentiel de fissuration se réduit au fur et à mesure de la réhumectation, nous prévoyons une division importante de la première reprise (réduction de moitié de la taille des mottes en condition réhumectée ou humide) puis une division moins importante à la deuxième (réduction du 1/3) pour être pratiquement nulle à la 3 ème reprise en condition humide (réduction de 10 %).

Par rapport à la circulation de l'eau dans le sol et l'enracinement de la couche travaillée, nous aboutissons à 5 groupes d'ITK qui correspondent à 4 degrés de porosité prévue (Tableau III-8-a). Le groupe I a une porosité forte (ITK n° 1, 2, 6) ; il correspond au travail profond en condition sèche ou réhumectée suivi d'une reprise en condition humide. Le groupe II a une porosité moyenne (ITK n° 3, 4, 7, 9) ; il regroupe le travail profond en condition sèche ou réhumectée suivi de 2 reprises en condition humide ou 1 reprise suivant un travail profond en condition humide. Les groupes III et le IV ont des porosités faibles ; le III concerne les ITK avec travail profond (n° 5, 8, 10) en sec repris trois fois en humide ou travail profond humide repris deux fois ; le IV regroupe les ITK avec travail superficiel après récolte (ITK n° 11, 12, 14) soit en sec ou réhumecté suivi de 2 reprises soit en condition humide suivi de 1 reprise. Le groupe V rassemble les ITK (n°13, 15 et 16) qui entraînent des porosités très faibles : soit 3 reprises pour une façon superficielle faite en condition réhumectée soit 2 reprises après un travail superficiel fait en humide soit enfin l'absence de tout travail sauf le semis.

La présence et la taille des mottes en surface jouent sur la porosité et sur la qualité du lit de semence. C'est pourquoi, nous définissons 3 groupes d'ITK « P », « M », « G » qui produisent en surface des tailles modales de mottes en surface petites (< 4 : P), moyenne (compris entre 4 et 8 : M) ou grosses (> 8 cm : G) (Tableau III-8-b).

L'état de surface sera d'autant plus favorable à la circulation des fluides qu'il y aura de mottes en surface qui se maintiennent pendant la période saturée. Ce maintien dépend de la stabilité du matériau et de la taille des mottes. Aussi, l'état de surface sera d'autant plus favorable que les mottes seront grosses : G > M > P. Si nous jugeons l'état de surface par rapport à l'aptitude à la levée, le classement sera inverse : P > M > G. Ces hypothèses nous amènent à pronostiquer une contradiction (surtout pour les sols peu stables) entre assurer une bonne perméabilité de surface et réaliser un lit de semence favorable à la levée.

Tableau III-9. Description de l'état structural de surface pour les sols de marais. Définition des notes de porosité et de dispersion de surface en condition humide (fin d'hiver).

QUALIFICATIF DE LA STRUCTURE pour une zone homogène	note de porosité	note de dis--persion de sur--face
Massif dispersé Mottes fondues aucun relief sur la surface.	0	3
Massif dispersé et motteux 20% Mottes > 15 cm, soudées érodées, aplaties	1	2
Massif et Motteux 50%à 30% Mottes 5 à 15 cm, soudées arrondies, érodées, aplaties	2	1
Motteux 100% à 50% et Massif Mottes 1 à 5 cm, jointives anguleuses/arrondies	3	0
Motteux 100% Mottes 1 à 5 cm, individulisées anguleuses	4	0

Le groupe P (ITK n°11, 12, 13, 16) produit de petites mottes après deux ou trois reprises d'un travail superficiel réhumecté, soit après semis direct. Le groupe M (ITK n°3, 4, 5, 6, 7, 8) produit des mottes moyennes car il y a eu soit deux reprises ou trois reprises en condition humide après travail profond sec ou bien une ou deux après travail profond réhumecté. Le groupe G (ITK n°1, 2, 9, 10, 14, 15) produit de grosses mottes car soit il n'y a eu qu'une reprise en humide du travail profond ou superficiel fait en humide ou du travail profond fait en sec, soit deux reprises du travail profond ou superficiel fait en humide.

2.3 - Les variables.

Nous distinguons l'état structural de surface et celui de la couche travaillée.

- ***Etat structural de surface, note de porosité et de dispersion*** (Tableau III-9).

Le profil cultural est creusé à proximité du piézomètre dans une position hydraulique semblable, sur une longueur d'environ 2,5 m, perpendiculaire à la direction du travail du sol et qui représente un bon échantillonnage des zones de reprises et de tassement par les roues (la largeur du plus large outil est d'environ 4,50 m). L'observation de l'état de surface se fait parallèlement et à proximité du profil sur 2,50 m x 1 m.

En fin d'hiver, début printemps, ce sont les surfaces respectives de mottes et de zones d'argile dispersée qui caractérisent les états structuraux de surface. Le tableau III-9 donne l'inventaire des états structuraux observés en surface, les notations de porosité et de dispersion correspondantes. On remarquera la liaison partielle entre les notes de porosité et de dispersion. Lorsque la note de porosité est élevée 3 ou 4, il n'y a pas dispersion, par contre lorsque la note est inférieure ou égale à 2, il y a présence d'argile dispersée.

- ***Etat structural de la couche travaillée et note de porosité*** (Tableau III-10).

La description de l'état structural de la couche travaillée est inspirée de Manichon (1982 a, b), et Gautronneau et Manichon (1987) (Tableau III-10 et Annexe III-6). La

Tableau III-10. Description des états structuraux de la couche travaillée. Définition des notes de porosité dans les profils de sols de marais en fin d'hiver. Correspondance avec la description Manichon (1982a), Gautronneau et Manichon (1987).

Horizon	Profon--deur (cm)	QUALIFICATIF DE LA STRUCTURE pour une zone structurale homogène.	note de porosité	Sym--bole	Manichon Mode d' assem--blage	Manichon Etat interne
H20	0-6 à 0-15 cm	Fragmentaire poreux Mottes 3-5 cm petits agrégats individualisés, anguleux 0.2 à 10 mm.	4	Fp	SF F	Gamma ?
		Mottes soudées par terre fine. Sous structure : mottes, anguleuses, 2-5 cm. fissures e<1mm	3	SF	SF SF R<1mm	Gamma ?
		Massif fissuré Sous structure prismatique 5cm	2	Mf PR	Mf SD	Gamma Phi Delta
		Massif plastique Sous structure absente, homogène, pas fissuré.	1	Mpl	Mpl	Delta
H50	6 à 30 cm	Zone complexe correspondant à diverses situations : Zone peu dense de mélange : mat de prairie + petits agrégats 1-5 mm ou terre fine reprise en masse, origine : inter bande de labour, passage de sous soleuse.I.B labour, passage de SS	3	SF	F et SF + SD + vides	Gamma Phi Delta
		Dépôts de boue dans cette zone : bonne circulation de l'eau, entrainement de MO. Forte fissuration si sec, Vides	3	SF + V	F et SF + SD + vides	Gamma Phi Delta
		Massif Sous structure polyédrique 10 cm Fissuration interne forte	2	M	M SD	Gamma Phi
		Massif fissuré compact Sous structure difficile à dégager Compacité assez forte vides autour de la MO	1+	M PHI DELTA	Mf + vides	Phi (Delta)
		Massif plastique (très humide) Sous structure non visible Plus ou moins compact selon les tassements Vides rares	1	M C+V DELTA	Mpl	DELTA

profondeur observée est au moins celle de l'enracinement. La première étape consiste à déterminer les zones homogènes redevables d'un même état. Pour cela, on stratifie la face du profil horizontalement et verticalement, puis on pondère l'importance de chacune des zones. Ainsi, dans la couche travaillée, on distingue les divers horizons selon leur origine (travail du sol). Les premiers horizons désignés par H10 ou H20 ont une épaisseur de 6 à 15 cm et pour origine la ou les reprises de travail profond et les façons superficielles. L'horizon H50 est la partie non reprise du travail profond de l'année, sa profondeur atteint généralement 25 à 30 cm.

Chaque horizon peut être divisé latéralement en zones homogènes pour tenir compte des tassements. Chaque *zone homogène* fait l'objet d'une description structurale à laquelle on attribue *une note de porosité* et un volume concerné.

Le tableau 1 de l'annexe III-6 donne l'inventaire, la description et la note de porosité des états structuraux du profil. Le tableau III-10 concerne les seuls états de la couche travaillée. Dans l'horizon H20, les états structuraux varient de fragmentaire poreux à massif plastique et les notes de porosité correspondantes de 4 à 0. L'horizon H50 est caractérisé par un état hétérogène fait d'un mélange d'éléments structuraux variés. La gamme de variation de la note de porosité va de 3 à 1.

La note de porosité de la couche travaillée est obtenue par la somme des notes de porosité de chaque zone homogène pondérée par le pourcentage qu'elle représente dans l'horizon. Elle a pour valeur maximum possible 3.5 : pour une épaisseur de 30 cm de la couche habituellement travaillée, de 15 cm de l'horizon H20 et de 15 cm de l'horizon H50, la note moyenne est de (4x15 + 3x15) /30 = 3,5.

- ***Notation de l'enracinement*** (Annexe III-6).

Les racines sont observées sur une surface verticale plane du profil (1,5 à 2 mètres de largeur sur la profondeur de l'enracinement), selon la procédure mise au point par Tardieu (1984) et reprise par Meynard (1985). Après aplanissement de la face d'observation, les racines sont dégagées sur 1 cm à l'aide d'un couteau. La face d'observation est quadrillée grâce à une grille de maille carrée de 5 cm, et *une note de densité de racines* affectée à chaque carré selon la correspondance :

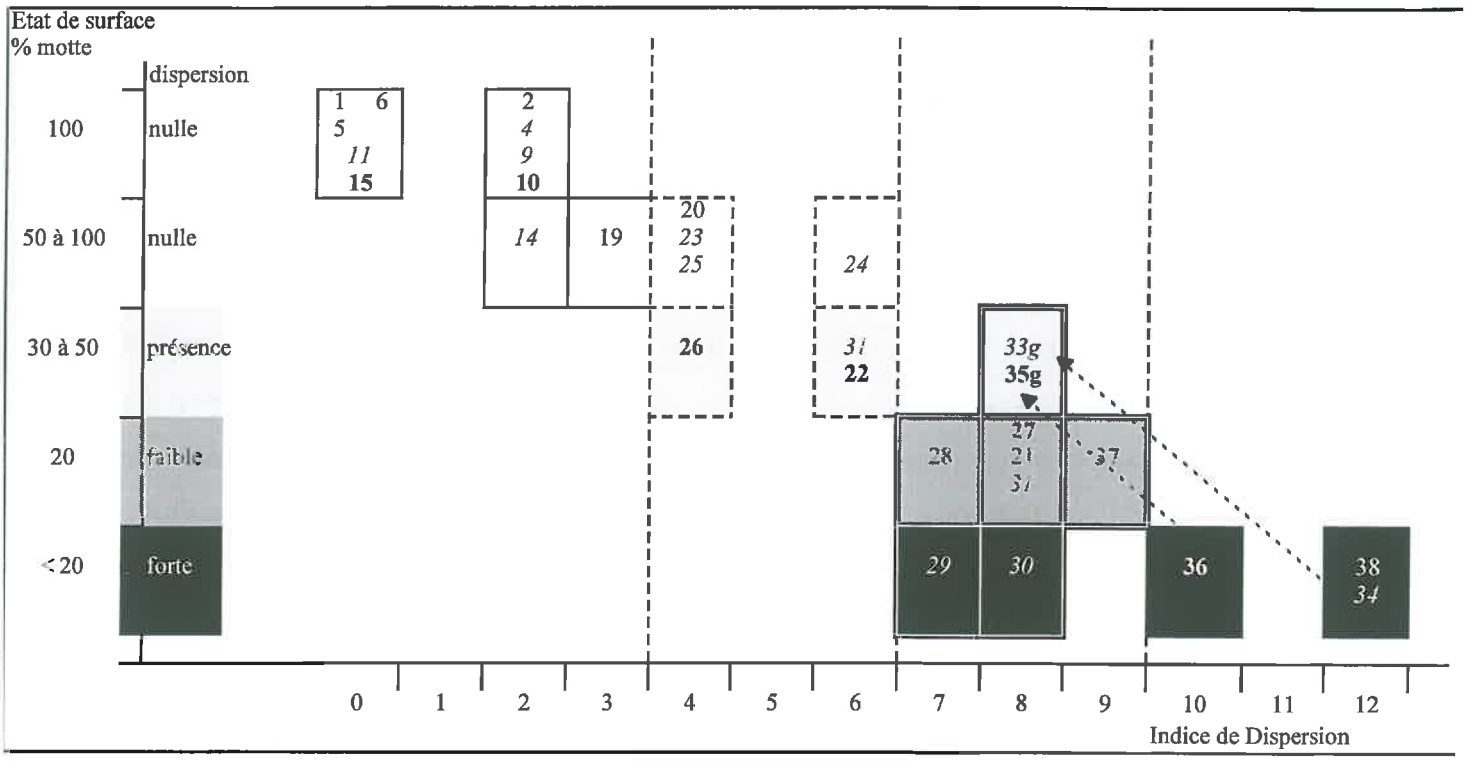


Figure III-10. Etat de surface (% de mottes en surface et note de dispersion) et Indice de Dispersion sur l'ensemble des parcelles (N°). Les flèches indiquent l'effet de l'apport de gypse.

Dispersion	nulle	présence	faible	forte
Année	1981	*1982*	**1983**	

Note de densité	Nombre de racines dans un carré de 5 x 5 cm
0	pas de racine
1	1 racine
2	2 à 4 racines
3	5 à 8 racines
4	9 à 20 racines
5	plus de 20 racines

3. Résultats.

3.1 - Effet de la stabilité structurale et des ITK sur l'état de surface.

Effet de la stabilité structurale.

La figure III-10 montre que globalement la porosité de surface diminue avec l'Indice de Dispersion. Elle compare le classement des parcelles fait à partir des états de surface et celui réalisé avec l'Indice de Dispersion. Si nous supposons que l'Indice de Dispersion du matériau explique seul l'état de surface des parcelles, les deux classements devraient être semblables. Il en est ainsi lorsque ID < = 3 et ID >= 10 : quels que soient l'année et les ITK pratiqués, l'état de surface présente une dispersion nulle dans le premier cas et forte dans le second.

Effet des autres conditions de milieu (Tableau III-11).

L'hypothèse semble insuffisante pour expliquer les états de surface des parcelles où l'ID est compris entre 4 et 9. Si la tendance à la réduction de la porosité de surface avec l'ID reste encore vraie, on trouve pour un ID identique ou voisin des parcelles qui ont des états de surface avec absence, présence, faible ou forte dispersion. Nous supposons alors que la pluviométrie et les modalités de travail du sol interagissent avec la stabilité du matériau pour expliquer l'état de surface observé en fin d'hiver.

En effet les trois campagnes donnent une large gamme de quantité de pluie du semis jusqu'à l'observation du profil : 280, 470 et 460 mm respectivement en 1980/81, 81/82, 82/83 ; aussi distinguera-t-on les années 1981 d'une part et 1982, 1983 d'autre part.

Tableau III-11. Etat de surface observé dans les parcelles (N°). Effets des ITK et de l'année climatique lorsque l'Indice de Dispersion du matériau >=4.

Dispersion	nulle	présence	faible	forte
Année	1981	*1982*	**1983**	

Indice de Dispersion		4 à 6			7 à 9				< = 10
Etat de surface									
note de porosité		3	2		2	1		0.5	0.5
mottes %		50 à 100	30 à 50		30 à 50	# 20		< 20	< 20
dispersion		nulle	présence		présence	faible		forte	forte
ITK/ porosité prévue		20							
	I	*23*	**26**	*31*	**35g**				**36**
de		*24/25*							38
moins	II		**22**		*33g*	27g	*31*		*34*
en						28			
moins	III = IV					37		*30*	
poreux								**29**	
	V					21		**?**	
ITK/ taille prévue des mottes									
de	P					27	21	*30*	
plus						37			
en	M			**22**	*33*	28	*31*		*34*
plus									
grosses	G	20			**35g**			**29**	**36**
		23	*31*						38
		24/25	**26**						

Les modalités de travail du sol sont regroupées selon la typologie présentée plus haut c'est-à-dire le degré de porosité pronostiqué au semis.

Lorsque l'ID est compris entre 4 et 6, la gamme d'état de surface observé est faible, elle varie d'un état motteux entre 50-100 % de mottes sans dispersion à 30-50 % de mottes avec présence de dispersion. Sept parcelles sont concernées : 1 suivie en 1981 (20), 4 en 1982 (23, 24, 25, 31) et 2 en 1983 (26, 22) ; l'état de surface est issu d'ITK pronostiqués comme produisant des états proches : porosité forte parfois moyenne et de grosses mottes en surface (groupes I et II). Compte tenu de l'échantillon, on ne peut mettre en évidence ni l'effet année, ni l'effet ITK.

On peut montrer l'interaction lorsque l'ID est compris entre 7 et 9. La dispersion en surface est très variable : elle est notée de présente à forte, la porosité de surface est jugée de moyenne à presque nulle.

a- Il y a simple présence de dispersion en surface pour 3 parcelles dont deux en 1982 et 1983 ont eu un apport de gypse (33g, 35g).

b- A l'opposé, il y a forte dispersion en surface pour 2 parcelles en 1982 (30) et 1983 (29) caractérisées par un ITK pronostiqué comme produisant un état tassé.

c- Entre ces extrêmes, 5 parcelles ont un comportement moyen avec faible dispersion. Trois en 1981 (28, 31, 37) et une en 1982 (31). Elles présentent des ITK produisant des tassements moyens à forts et des mottes moyennes à petites.

Une parcelle qu'on attendait fortement dispersée n'a présenté qu'une faible dispersion en 1981 (21). Il s'agit d'un précédent tournesol derrière prairie naturelle chiselée. L'épaisseur de matière organique et le non retournement de la prairie ont réduit de façon sensible les tassements et la dispersion.

Les risques de dispersion.

Ces résultats nous permettent de discuter des risques de dispersion et donc d'imperméabilisation hivernale de la surface dans la gamme de milieu et de techniques que nous avons explorée. Les bornes ID <= 3 et >= 10 déterminent les domaines pour lequel l'état

de surface est expliqué par la seule stabilité du matériau et donc semble indépendante des modalités de travail du sol et de la pluviométrie hivernale. Il n'existe aucun risque d'entraînement de particules solides lorsque l'ID est < 4. Au contraire lorsque l'ID >= 10, la dispersion est forte et les risques maximum quelles que soient les pratiques et les années (pluviométrie efficace > 250 mm).

Par contre dans les cas de stabilité intermédiaire (ID est compris entre 4 et 9) on note un effet des ITK et de la pluviométrie sur la porosité de surface : faible si 4<=ID<= 6, particulièrement important si 7<=ID<= 9. On peut identifier les conditions qui semblent intervenir favorablement sur l'état de surface et donc ici réduire l'importance de la dispersion : la faible pluviométrie hivernale, le travail du sol fait en condition sèche ou ressuyée, de grosses mottes en surface, l'apport de gypse, des quantités importantes de matière organique en surface.

3.2 - Effet de la stabilité structurale et des ITK sur la porosité de la couche travaillée.

Le modèle aboutissant au classement des ITK par rapport à la porosité prévue au semis est-il vérifié par la porosité observée en fin d'hiver ? Il y a identité entre les deux classements 1- si le modèle est pertinent, 2- si les conditions de milieu n'affectent pas l'état structural entre le semis et la fin de l'hiver, c'est-à-dire si le matériau est stable.

Pour vérifier le « modèle » comparons le classement des ITK et la porosité observée selon la stabilité des parcelles. Nous avons comparé les moyennes des notes de porosité en distinguant les parcelles selon les groupes d'ITK (I, II, III=IV, V, cas particuliers) et la stabilité (ID <= 3, 4 <=ID<= 6, et ID >= 7). Certaines modalités étant absentes ou peu représentées nous avons été conduit à en regrouper certaines. Nous l'avons fait après un premier test statistique (test t de Student) sur les moyennes (Annexe III-7). Il justifie notamment le regroupement des parcelles dont l'ID est inférieur ou égal à 3 et celles dont l'ID est compris entre 4 et 6, toutes étant conduites avec les ITK I (absence de différences significatives entre les notes de porosité).

Tableau III-12. Comparaison des porosités observées en fin d'hiver. Effet des modalités de travail du sol et de la stabilité structurale

Modalités de travail du sol (groupes d'ITK)	porosité prévue de plus en plus faible			Effet sol / ITK	
	I	II + III=IV	V	I	II + III=IV
Stabilité structurale					
Stable	2.67	2.37	1.98		
ID<=6	2.76	2.02	1.62		
	2.7	2.12			
	2.62	1.91			
	2.12	1.95			
	2.4	2.29			
	2.85	2.26			
		2.22			
		2.32			
moyenne	2.59	2.16	1.80		
Effet	HS				
ITK		HS			
			HS		
			Cas particulier gypse, PN		
intermédiaire	1.91	1.61	2.67		
et Instable	1.55	1.77	3.02	HS	HS
ID > 7		1.6	2.32		
		1.54			
		1.16			
		1.6			
		1.7			
moyenne	1.73	1.63	2.67		
Effet	NS				
ITK		S			
			HS		

Cas des parcelles à stabilité élevée.

Les parcelles qui ont le matériau le plus stable (ID <= 6) sont les plus aptes à distinguer les groupes d'ITK (Tableau III-12). On trouve effectivement une large gamme de valeurs de porosité observée en fonction des ITK pratiqués. Les deux classements prévu et observé concordent pour les groupes extrêmes d'ITK (I et V). Cependant les porosités observées ne confirment pas la distinction faite a priori entre les groupes II et III = IV : les moyennes ne sont pas significativement différentes. Nous sommes donc conduits à réduire à 3 le nombre de groupes d'ITK par rapport à la porosité attendue : tassement faible (ITK I), moyen à fort (ITK II, III=IV), fort (ITK V).

Cas des parcelles à stabilité intermédiaire et faible (ID >= 7).

Les parcelles montrent globalement une faible porosité et une étroite gamme de valeurs de porosité observée en fonction des ITK pratiqués. Même si le classement des ITK est respecté, les différences entre groupes d'ITK sont faibles et non significatives.

Ainsi pour un même groupe d'ITK, la stabilité structurale joue de façon déterminante sur la porosité observée en fin d'hiver. La note de porosité chute de 30 % environ lorsqu'on passe de parcelles stables (ID < 6) à des parcelles intermédiaires et instables (ID >= 7) : pour le groupe I, la note moyenne passe de 2,6 à 1,7 et pour le groupe II, de 2,2 à 1,6.

Effet particulier de l'apport de gypse et de l'antéprécédent prairie.

Seules se distinguent le cas de trois parcelles qui ont des porosités beaucoup plus élevées que ne le laissaient prévoir leur stabilité intermédiaire à instable. Pour deux d'entre elles, l'épandage de quantité importante de gypse en début de campagne a entraîné une note élevée de porosité par rapport aux situations qui n'en ont pas bénéficié. Une parcelle sur antéprécédent prairie naturelle non retournée, garde une porosité remarquablement élevée par rapport à l'ITK utilisé.

Ces résultats justifient la distinction de divers groupes d'ITK par rapport à la porosité observée : porosité groupe I > groupe II = groupe III=IV > groupe V. La distinction entre les groupes II et III=IV aurait pu être améliorée en repérant plus précisément les passages de

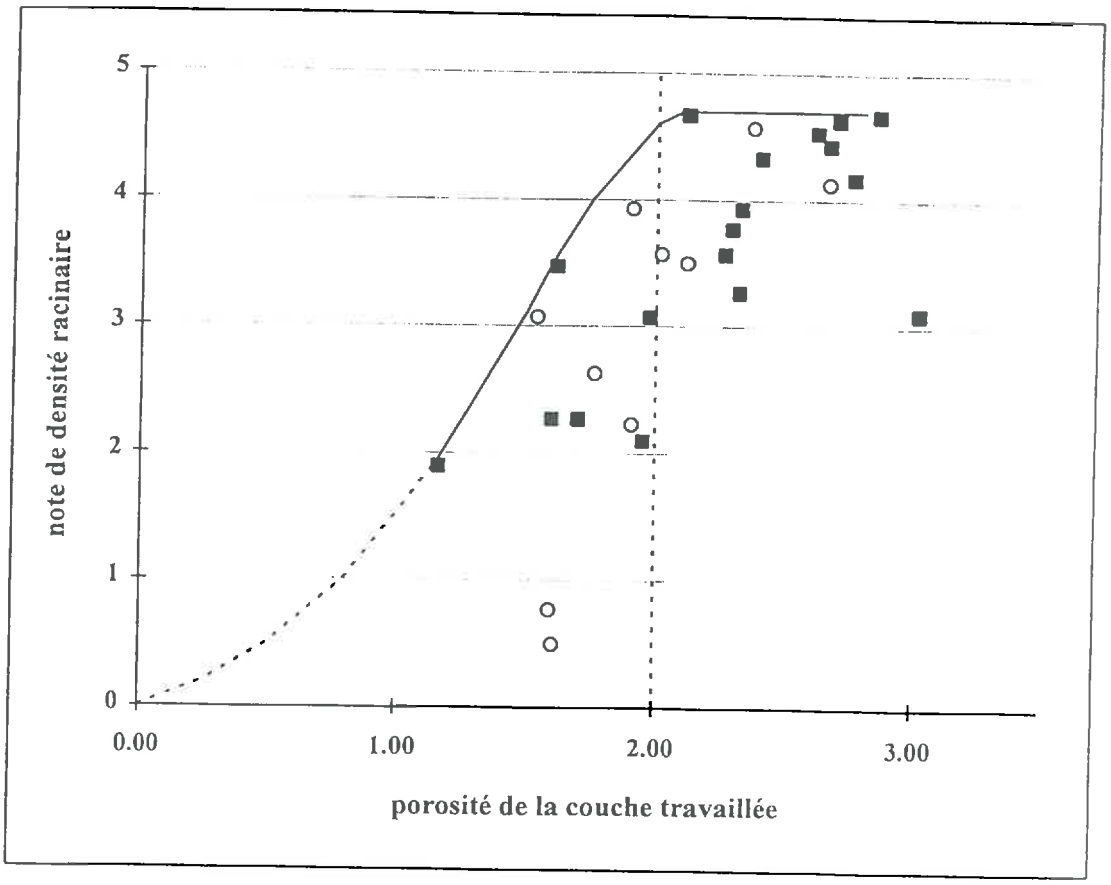


Figure III-11. Densité racinaire fonction de la note de porosité (horizon 0-30 cm). Courbe enveloppe en plein, courbe enveloppe hypothétique en tirets ; pieds/m² < 200 (rond clair), > 200 (carré foncé).

roues consécutifs aux différentes interventions et en notant les rapports largeur de roues / largeur d'outil (Manichon 1988) pour chaque parcelle.

Nous pouvons dégager de ces résultats trois séries d'éléments.

a - L'état de porosité en fin d'hiver vérifie *le classement des itinéraires techniques* construit sur le pronostic de la porosité prévue au semis.

b - Pour des parcelles redevables d'ITK identiques ou voisins on met en évidence *l'effet de la stabilité structurale sur l'état poreux en fin d'hiver.*

c - *L'apport de gypse et le non retournement de la prairie* entraînent des porosités beaucoup plus élevées que ne le laissaient prévoir leur stabilité intermédiaire à instable compte tenu des ITK utilisés.

3.3 - Effet de la porosité sur la densité d'enracinement dans la couche travaillée.

La figure III-11 illustre l'effet de la porosité sur la densité d'enracinement. Globalement, il y a augmentation de la densité d'enracinement avec la porosité jusqu'à atteindre une valeur maximum de densité racinaire. L'enveloppe supérieure des points représentatifs montre que la densité maximum d'enracinement est atteinte pour une note de porosité supérieure ou égale à 2 ; au delà, la porosité ne semble pas avoir d'effet sur la valeur maximum de la densité racinaire. Nous retiendrons la note seuil de 2 pour discuter de l'effet respectif de la stabilité structurale et des ITK sur la porosité de la couche travaillée.

3.4 - Synthèse.

La synthèse de ces résultats peut se visualiser sous la forme d'une zonation du plan "note de porosité de la couche labourée X Indice de Dispersion" (Figure III-12) pour présenter les effets respectifs des modalités de travail du sol et de la stabilité structurale sur l'état de la couche travaillée en fin d'hiver. On trace l'enveloppe des points représentatifs des groupes d'itinéraires techniques I, [II, III = IV] et V, et la droite représentant la note de porosité seuil de 2.

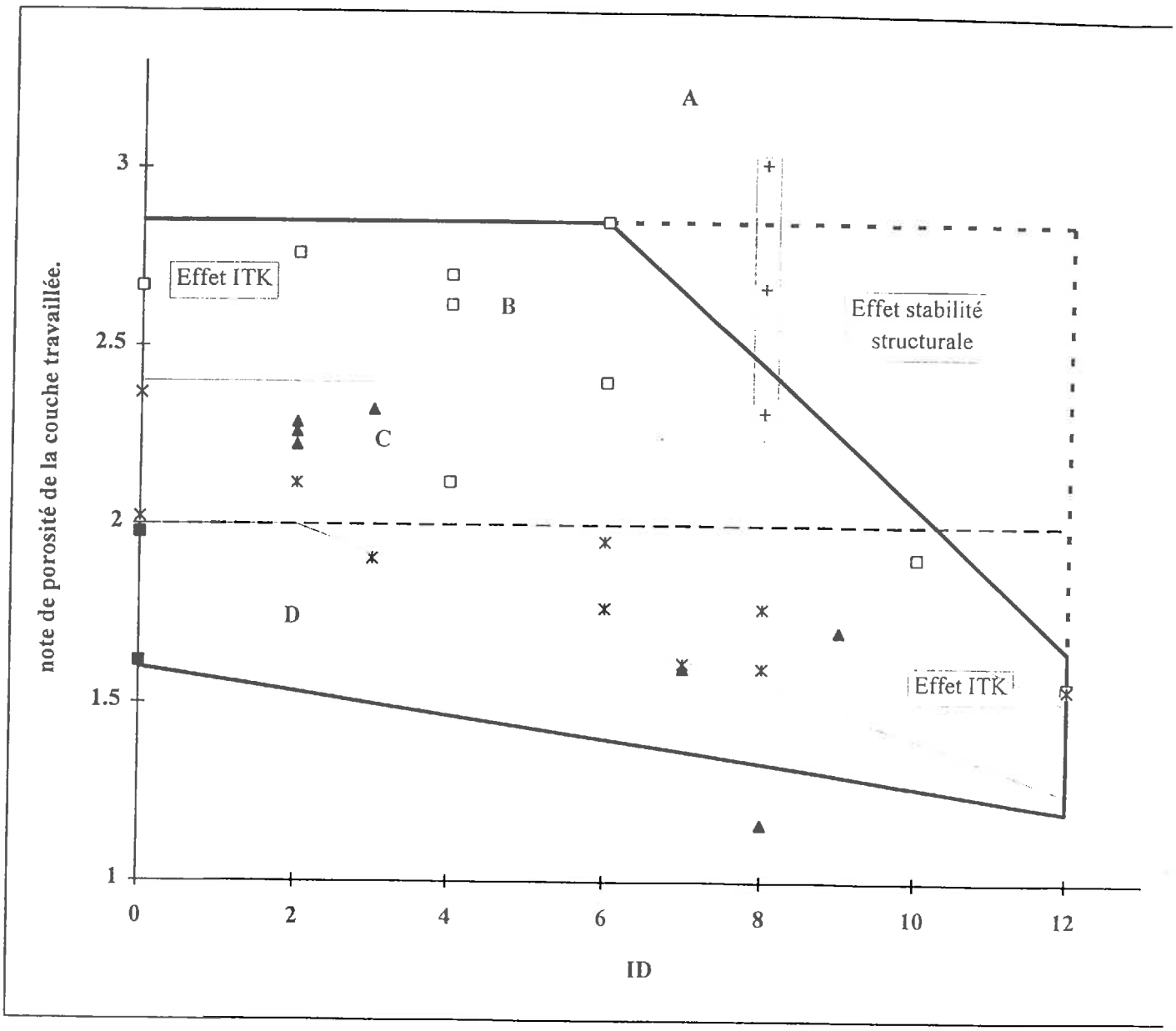


Figure III-12. Relation entre porosité de la couche travaillée en fin d'hiver et ID. Effet des modalités de travail du sol (ITK). Groupe d'ITK I (carré clair), II (étoile), III=IV (triangle foncé), V (carré foncé). Situations particulières (gypse et antéprécédent prairie) encadrées.

La zone A a la porosité la plus élevée par rapport à l'Indice de Dispersion. Elle représente les parcelles gypsées et d'antéprécédent prairie naturelle. La zone B représente les ITK qui produisent la porosité la plus élevée (groupe ITK I), la zone C ceux qui produisent une porosité moyenne à faible (groupe ITK II, III=IV), enfin, la zone D rassemble les situations les plus défavorables au point de vue porosité (groupe ITK V). L'effet « modalités de travail du sol » est le plus marqué sur les porosités des sols stables (ID<=4) et malgré cela, la plupart des parcelles ont une note de porosité > 2. Par contre les sols moins stables ID > 7 ont une note de porosité inférieure à 2 quelles que soient les modalités de travail du sol

La décroissance de la porosité avec l'augmentation de l'Indice de Dispersion illustre l'effet de plus en plus faible des ITK sur la porosité quand la valeur de la dispersion augmente.

4. Discussion - conclusion.

L'expression au champ de la stabilité structurale se manifeste par l'état structural de la surface et de la couche travaillée. L'état de surface et notamment la dispersion est fortement dépendant de l'ID du matériau, les ITK jouent un faible rôle pour les valeurs extrêmes de l'Indice de Dispersion. Par contre, les modalités de travail du sol semblent jouer un rôle non négligeable pour les ID intermédiaires ; de même, les quantités de précipitation (dans la gamme 250 à 525 mm) ne semblent pas être déterminantes sur l'état de surface pour les stabilités structurales extrêmes (forte ou faible) par contre pour les intermédiaires, on retient l'hypothèse qu'elles puissent agir (Boiffin, 1984). Des situations particulières ont montré que, l'apport de gypse, un antéprécédent prairie naturelle non retournée, augmentent fortement la porosité de surface des sols instables. De même, la porosité de la couche travaillée est fonction de l'ID et des ITK.

Si on a montré l'effet des modalités de travail du sol sur l'état structural, c'est qu'on a été capable de les classer (ici en 4 groupes) par rapport à la porosité pronostiquée au semis. Les modalités qui jouent un rôle essentiel sur le pronostic sont

- la réalisation ou non d'un travail profond ;
- l'état hydrique du sol lors des interventions culturales. Cet état peut être estimé à partir du cumul du bilan climatique à partir du retour des pluie (T0) ;

- l'apport de gypse et l'antéprécédent prairie.

Ces 3 éléments sont en interaction avec la stabilité structurale de l'horizon travaillé.

Pour les sols stables (ID < 4, types de profil <= 6), la dispersion est absente. Ce sont les modalités de travail du sol qui expliquent la porosité en fin d'hiver. Celle ci dépend uniquement de la réalisation et de la date du travail profond (date renseignant les conditions hydriques). Elle est élevée si le travail profond est réalisé à l'état sec, faible s'il est fait en condition humide.

Pour les sols instables (ID >= 10, profil type 10), la dispersion est forte quelle que soit l'année (pluviométrie hivernale observée > 250 mm). C'est l'instabilité structurale qui explique en très grande partie la porosité en fin d'hiver. Il y a une très faible « mémorisation » de la porosité créée. L'effet instabilité structurale est majeur. La porosité au printemps est faible même si les modalités de travail du sol sont favorables.

Pour les sols intermédiaires (7 <= ID <= 9, types de profil 8 et 9), les effets stabilité structurale, travail du sol et pluviométrie hivernale interagissent pour aboutir à un état de surface plus ou moins dispersé et une porosité plus ou moins forte de la couche travaillée. On dégage une sensibilité particulière à la dispersion de la surface et à la reprise en masse dans le cas de modalités de travail du sol défavorables (travail en condition humide).
Ce qui détermine la porosité de la couche travaillée en fin d'hiver sont, pour les sols stables, les modalités de travail du sol, pour les sols instables, l'instabilité du matériau et pour les sols intermédiaires, l'interaction stabilité structurale x travail du sol x précipitation.

La porosité de surface et la présence d'argile dispersée sont l'expression au champ de la propriété de dispersion du matériau. La note de porosité de surface indique si l'état de surface a été un obstacle ou non à l'infiltration des eaux de pluie. C'est un paramètre semi-quantitatif facile à évaluer, pratique et simple. Il peut être utilisé pour le diagnostic de la stabilité structurale et pour la comparaison du comportement d'un ensemble de parcelles en fin d'hiver pour une année donnée. Cependant les modalités de travail du sol et la pluviométrie hivernale modulent légèrement les classements dans le cas des stabilités structurales intermédiaires.

L'état de surface a des conséquences sur celui des couches sous-jacentes du profil. La présence de boue dans le profil est directement liée à la dispersion des argiles issue de la surface (dégradation par l'eau de pluie) ou de la couche travaillée (dégradation par la circulation de l'eau), ces 2 phénomènes étant corrélés. Cette boue s'accumule dans les zones de circulation de l'eau : les creux, les fissures, les galeries de vers de terre. Elle contribue donc par les volumes mis en jeu, au colmatage de la porosité sous-jacente (couche travaillée, sous-sol).

L'étude de la porosité permet d'évaluer certaines conditions nécessaires à la croissance des cultures :

- la perméabilité à l'air et à l'eau de la surface du sol,
- la pérennité de la porosité créée par le travail du sol,
- enfin la nécessité d'une nappe d'eau suffisamment basse.

Ces trois conditions ont un lien important avec la stabilité du matériau. La connaissance de cette propriété, des facteurs et conditions qui la régissent est un élément fondamental dans la mise au point de techniques de mise en valeur agricoles dans les régions de marais.

Tableau III-13. Classement des parcelles de références par rapport au comportement physique du profil. Propriétés intrinsèques, comportement hydraulique et comportement de la couche travaillée et classe de comportement "homogène".

		COMPORTEMENT									
		hydraulique			de la couche travaillée					année	Parcelle
Cas	Profil type n°	Drainage D=drains R=rigoles	Profon--deur de nappe (cm)	Indice de Disper--sion 0-30 cm	N°	ITK groupe	Note de disper--sion de surface	Note de porosité 0-30 cm	Note de porosité de S		
1	1	D	125	0	7	II	0.0	2.37	4.0	1981	1
1	1	D	100	2	8	III	0.0	2.22	4.0	1981	3
1	1	D	95	2	10	III	0.0	2.26	4.0	1982	4
1	2	D	110	2	6	I	0.0	2.76	4.0	1982	9
1	2	D	106	2	7	II	0.0	2.12	4.0	1983	10
1	2	D	78	0	16	V	0.0	1.62	4.0	1981	6
1	1	R	50	0	7	II	0.0	2.02	4.0	1981	5
2	4	D	88	0	15	V	0.0	1.98	4.0	1982	11
2	4	D	88	0	15	V	0.0	1.98	4.0	1982	11
2	5	D	85	2	10	III	0.0	2.29	4.0	1982	14
2	5	D	65	0	6	I	0.0	2.67	3.0	1983	15
2	4	R	59	3	11	IV	0.0	2.32	4.0	1982	13
2	6	R	54	3	9	II	0.0	1.91	3.0	1981	19
3a	8	D	61	4	1	I	1.0	2.70	2.0	1981	20
3a	8	R	44	8	13	V	2.0	2.67	1.0	1981	21
3a	8	R	29	4	1	I	0.0	2.62	2.0	1982	23
3a	8	R	25	6	4	II	1.0	1.95	3.0	1983	22
3a	9	D	67	6	1	I	0.5	2.85	2.0	1983	26
3a	9	D	60	6	1	I	0.0	2.40	2.0	1982	24
3a	9	D	35	8	3	II	1.0	2.32	2.0	1982	33
3a	9	D	60	4	1	I	0.0	2.12	3.0	1982	25
3b	9	R	26	8	7	II	1.5	1.60	1.0	1981	27
3b	9	R	44	7	14	IV	2.0	1.60	0.5	1982	29
3b	9	R	31	6	2	I	1.0	1.77	2.0	1982	31
3b	9	R	31	8	2	I	1.0	1.77	2.0	1982	31'
3b	9	R	29	7	3	II	2.0	1.61	1.0	1981	28
3b	9	R	19	9	12	IV	2.0	1.70	1.0	1981	37
3b	9	R	16	8	5	III	2.0	1.16	0.5	1982	30
4	10	D	26	8	2	I	1.0	3.02	2.0	1983	35
4	10	D	20	10	2	I	2.0	1.91	0.5	1983	36
4	10	D	11	12	3	II	2.0	1.54	0.5	1982	34
4	10	R	15	12	2	I	2.0	1.55	0.5	1981	37'

PARTIE III- C. LE COMPORTEMENT PHYSIQUE DU PROFIL.

Chapitre 4. Synthèse et conclusion.

1. Synthèse (Tableau III-13).

L'excès d'eau dans les sols de marais est l'expression du comportement physique des profils de sol de marais. Il est déterminé par le comportement hydraulique du profil d'une part et par le comportement de la couche travaillée d'autre part.

Le comportement hydraulique est caractérisé par la profondeur de la nappe en hiver qui rend compte de la combinaison mode de drainage x qualité des profils de sol. Plus précisément, la profondeur de la nappe en hiver s'aligne sur
- la profondeur de la couche imperméable si celle ci se trouve au dessus de l'élément drainant,
- la profondeur de l'élément drainant si celui-ci se trouve au dessus de l'horizon imperméable.

La relation trouvée entre les profondeurs de nappe et d'enracinement valide la pertinence des paramètres utilisés (Indice de Dispersion du matériau, profondeur de nappe en hiver, état structural en profondeur).

Le comportement de la couche travaillée est décrit par la structure observée en fin d'hiver. Il est apprécié par la notation de la porosité de la couche travaillée et de la surface. Les valeurs de ces 2 paramètres rendent compte d'une large gamme d'états structuraux qui sont expliqués par l'Indice de Dispersion du matériau et les divers ITK utilisés pour l'implantation du blé : plus précisément, la stabilité structurale explique fortement l'état structural de la couche travaillée et particulièrement l'état de surface dans les cas où la valeur de l'Indice de Dispersion de cet horizon est inférieure ou égale à 3 ou supérieure à 9. Dans ces cas les modalités des interventions culturales semblent peu déterminantes pour expliquer l'état structural. Par contre, dans les cas où la valeur de l'Indice de Dispersion de l'horizon travaillé

est comprise entre 4 et 8, les modalités d'interventions culturales (état hydrique) sont déterminantes pour expliquer (modulo la pluviométrie hivernale) l'état structural de la couche travaillée et notamment l'état de surface .

Ainsi, le profil de sol peut se trouver défavorable soit au delà de 90 cm (profils types 1 et 2), soit entre 60 et 90 cm (profils types 4, 5, 6), soit entre 30 et 60 cm (profils types 8, 9), soit dès la surface (profils type 10). L'expression de l'excès d'eau au champ pour ces 4 cas peut se décrire de la façon suivante :

Cas 1 et 2 - Le cas 1 concerne les profils types n°1 et 2 (l'horizon défavorable est au delà de 90 cm de profondeur), le cas 2, les profils types n°3, 4, 5, 6 (l'horizon défavorable se situe entre 60 et 90 cm). Dans ces deux cas, le niveau imperméable est aussi ou plus profond que celui de l'élément drainant. La profondeur de nappe est alors fonction de celle de l'élément drainant et donc moyenne (rigoles > 50 cm) à forte (drains > 65 cm). La couche travaillée présente un état favorable : couche de surface poreuse, dispersion nulle, porosité de la couche travaillée plutôt élevée et fonction des ITK utilisés. La différence entre ces 2 cas est donc très faible.

Cas 3 et 4 - Les profils concernés sont les types n° 8, 9, 10. Le niveau imperméable est moins profond que celui de l'élément drainant. La profondeur de la nappe est alors moyenne à faible et correspond à celle du premier horizon imperméable.

Le cas 3 concerne les profils types 8 et 9 et peut être qualifié de très hétérogène. La couche travaillée est caractérisée par un ID compris entre 4 et 8. La valeur de la porosité est très variable. Ici, la porosité est fonction des modalités des interventions culturales et de la pluviométrie hivernale. Aussi est-on obligé de distinguer deux sous ensembles, 3a et 3b.

Cas 3a : la porosité de la couche travaillée est moyenne à forte, l'état de surface est peu ou pas dispersé. Ces états sont obtenus par des modalités favorables d'ITK (ITK I et II). C'est dans cette catégorie que l'on trouve les parcelles gypsées (33, 35, 22) et la parcelle avec antéprécédent prairie (21). De plus, il se trouve que tous les sols de type 8 sont dans cette catégorie.

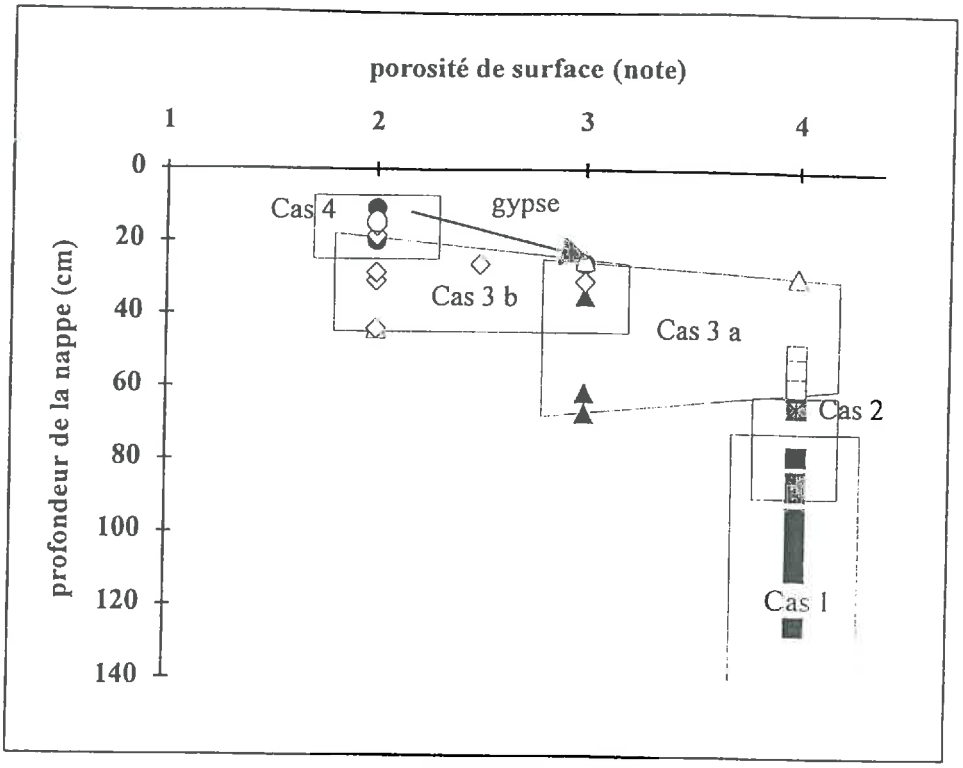


Figure III-13. Types de profil et expression de l'excès d'eau en fonction de la porosité de surface et de la profondeur de nappe.
Cas 1 : types 1 et 2 ; cas 2 : types 4, 5, 6 ; cas 3a : types 8 et 9a ; cas 3b : types 9b ; cas 4 : type 10. Drainage rigoles (clair), drains (noir).

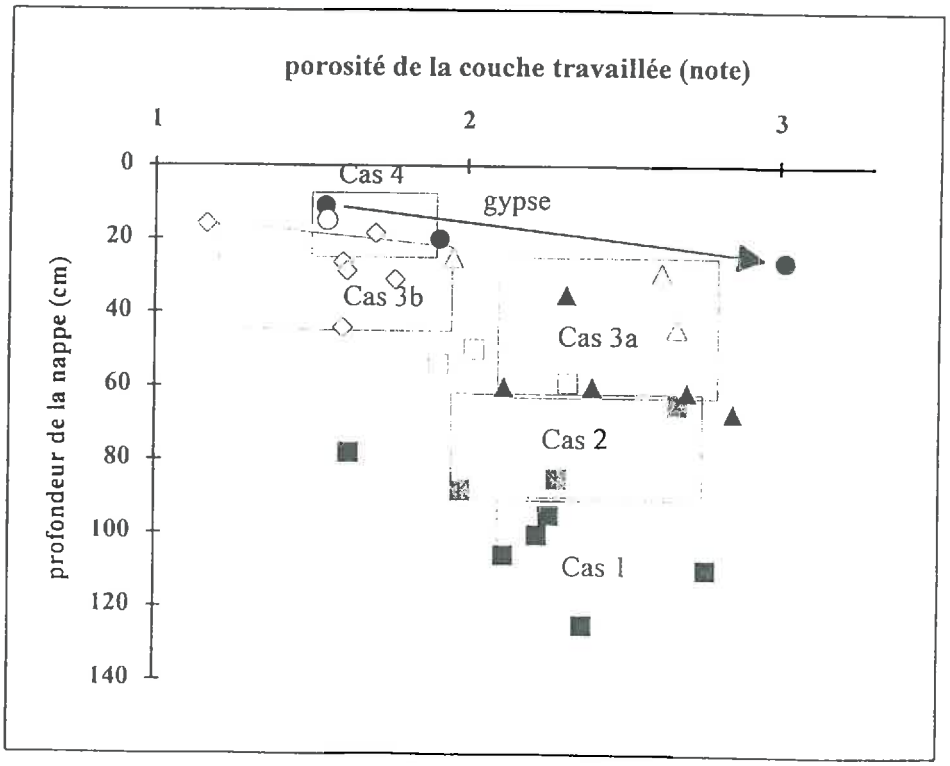


Figure III-14. Types de profil et expression de l'excès d'eau en fonction de la porosité de la couche travaillée et de la profondeur de nappe.
Cas 1 : types 1 et 2 ; cas 2 : types 4, 5, 6 ; cas 3a : types 8 et 9a ; cas 3b : types 9b ; cas 4 : type 10. Drainage rigoles (clair), drains (noir).

Cas 3b : la porosité de la couche travaillée est faible, l'état de surface est dispersé. *Les parcelles sont toutes drainées par **rigoles**.* Les modalités d'ITK sont très variables et la moitié sont plutôt défavorables ; tous les sols sont de type 9.

Le cas 4 concerne le profil type 10. Il représente les situations où l'Indice de Dispersion de l'horizon H1 est supérieur à 9. Les états de la couche travaillée et de la surface sont identiques à ceux de la classe 3b malgré des modalités de travail du sol favorables.

2. Formalisation.

La classification des profils de sol réalisée a priori et à partir de la stabilité structurale du matériau est validée par le comportement physique des sols de marais en hiver. En effet celui-ci peut être défini comme la résultante du comportement hydraulique et du comportement de la couche travaillée
(comportement physique des profils de sols) # (comportement hydraulique de l'ensemble du profil).

Cette équivalence peut se décliner avec les indicateurs de comportements, en définissant l'excès d'eau comme l'expression du comportement physique du profil en hiver.
(Excès d'eau) = f[(profondeur de nappe) , (porosité de la couche travaillée et de surface)] (Figures III-13 et III-14) avec
profondeur de nappe = f (types de profil, modes de drainage), et types de profil = f (Indice de Dispersion de H1, H2, H3) ;
porosité de la couche travaillée et de la surface = f (Indice de Dispersion de H1, ITK utilisés pour l'implantation du blé), modulo pluviométrie hivernale.

Ces deux indicateurs sont reliés aux propriétés du matériau et plus précisément à son degré de dispersion (ID). Ils ne sont pas indépendants. En effet, d'une part, tous les deux dépendent en partie de la stabilité structurale de l'horizon H1 (0-30), et d'autre part, il existe une relation d'ordre entre la stabilité structurale des divers horizons (stabilité structurale de H1 > = H2 > = H3). C'est une des raisons pour laquelle la profondeur de la nappe en hiver est

un indicateur assez fidèle du comportement physique du profil dans sa globalité (modulo quelques réserves sur le travail du sol et le climat) c'est-à-dire comportement hydraulique **et de la couche travaillée.**

On peut donc écrire :

Excès d'eau = f (ID de H1, H2, H3), modulo mode de drainage, ITK, pluviométrie hivernale.

Ce qui peut se résumer en

Excès d'eau = f(propriétés physiques du matériau, climat, ITK) = f(milieu aménagé, ITK).

3. Proposition d'un modèle. Démarche pour le pronostic de comportement et les préconisations (Damour et Pons 1979, 1987).

a- Détermination du type de profil.

Détermination de la famille de sol des horizons H1, H2, H3. Soit par analyse chimique soit par évaluation des paramètres essentiels qui caractérisent et agissent sur le comportement : ID, teneur en CaCO3, salinité, (couleur = âge, matière organique). Détermination du type de profil 1 à 10.

b- Proposition d'un mode de drainage efficace par rapport à la qualité du sol.

Cas 1 : profil type 1, 2 ---> couche imperméable profonde >90 cm, drainage par drains, écartement entre drain 20 à 30 m.

Cas 2 : profil type 3, 4, 5, 6, 7 ---> couche imperméable entre 60 et 90 cm, drainage par drains, écartement 15 à 20 m.

Cas 3 : profil type 8, 9 ---> drainage par rigoles (18 m) équivalent au drainage par drains (15 m),

Cas 4 : profil type 10 ---> drainage par rigole, drainage par drains déconseillé sans apport important de gypse.

c- Proposition pour les modalités et conditions de travail du sol.

Cas 1 : profil type 1, 2 ---> couche imperméable profonde, stabilité structurale de la couche travaillée élevée, incidence faible des modalités et des conditions de travail du sol sur

la perméabilité du profil. Mais attention à un effet cumulatif de travail du sol en condition défavorable (saturée). Maïs monoculture possible ?

Cas 2 : profil type 3, 4, 5, 6, 7 ---> couche imperméable entre 60 et 90 cm, incidence moyenne à faible des modalités et des conditions de travail du sol sur la perméabilité du profil. Mais attention à un effet cumulatif de travail du sol en condition défavorables (saturée). Maïs monoculture dangereux ?

Cas 3 : profil type 8, 9 ---> couche imperméable entre 30 et 50 cm, incidence moyenne à forte des modalités de travail du sol selon les conditions climatiques (pluviométrie) sur la porosité de la couche travaillée.

Cas 4 : profil type 10 ---> couche travaillée instable, faible pérennité de la porosité de la couche travaillée, nécessité d'un précédent prairie non retourné et/ou d'un apport important de gypse, travail du sol déconseillé d'où prairie pluriannuelle recommandée.

Partie IV

Effet de la qualité des sols sur le comportement du blé.

1. Introduction.

Nous testons la classification des sols par le comportement d'un peuplement végétal en prenant l'exemple de la culture de blé. C'est une culture qui est présente sur toutes les qualités de sol de marais aménagés. De plus elle subit directement l'excès d'eau hivernal au cours de son cycle. Nous voudrions préciser ici l'effet de la stabilité structurale des sols sur l'élaboration du rendement du blé et ainsi aboutir à une classification des sols à partir du comportement du peuplement végétal.

Position du problème.

L'effet de l'excès d'eau sur le peuplement cultural se manifeste de deux façons : directe à travers la réaction du peuplement végétal aux divers états d'excès d'eau (états = climat x sol) ; indirecte à travers la possibilité de mise en oeuvre des techniques. Ces deux aspects ne peuvent être séparés dans la pratique agricole. C'est ainsi que Van Hoorn (1958), Trafford et Oliphant (1977) et Pons (1985, 1988) étudient au champ l'effet de différents systèmes de drainage et de niveau de nappe sur le rendement. Par contre, Belford (1981), Cannell (1984), Cannell et al. (1980, 1985), étudient l'effet direct de l'excès d'eau (durée, intensité, période végétative) sur l'élaboration et les composantes du rendement de céréales en utilisant des cases lysimétriques conduites en plein air. Ici, nous visons à étudier, dans un réseau de parcelles d'agriculteurs, l'effet de l'excès d'eau sur l'élaboration du rendement en utilisant une démarche de diagnostic inspirée de Sébillotte (1988), Meynard et David (1992), Leterme et al. (1994) et Aubry et al. (1994).

L'analyse du comportement végétal : l'élaboration du rendement et conditions de milieu.

Le rendement en grain (R en g/m²) peut s'écrire :

R = NG x P1G, avec NG (nombre de grains par mètre carré) et P1G (poids d'un grain en g).

*Ces deux composantes se forment pendant des phases du cycle bien déterminées : chacune est influencée par les facteurs et conditions du milieu pendant sa période de formation. Il en résulte qu'on peut utiliser la valeur d'une composante du rendement comme

Tableau IV-1. Stades du blé, élaboration du rendement, profondeur d'enracinement et conditions de milieu les plus probables dans les marais de l'Ouest.

Stade du blé	Composante élaborée Ci	Profondeur enracinement	Etat hydrique probable du profil	Périodes calendaires
*Semis *Levée	NP	* Surface	*reconstitution de la réserve utile du sol	*19/10 au 19/11 *fin oct. - début déc.
*début tallage		* Couche travaillée	*établissement de l' excès d'eau permanent*	*fin déc - janv
*tallage			*sol saturé*	*janv. - fin mars
*début montaison.	MSA2	* profondeur de nappe (30 à 100 cm)	*sol saturé*	*fin mars
*montaison	NE		*ressuyage du profil	*avril début mai
*épiaison	NG	* maximum, fonction P -ETP		
*formation du grain	P1G		*dessèchement	*juin
Semis à récolte	R			*Nov à fin juin

indicateur du caractère plus ou moins favorable du milieu pendant sa phase de formation (Sébillotte, 1980). Nous nous inspirerons de ce principe pour utiliser la valeur d'une composante du rendement comme indicateur du caractère plus ou moins favorable du milieu pendant sa phase d'élaboration (Sébillotte, 1980 ; Meynard, 1987 ; Fleury et Limoux, 1987).

*De plus, il existe des relations (fi) entre les valeurs de deux composantes successives (C_i et C_{i+1}) du rendement. La fonction fi transforme la valeur de la composante Ci en valeur de la composante Ci+1. Cette transformation est plus ou moins "efficace". En l'absence de facteur limitant nutritionnel, c'est-à-dire en compétition uniquement vis-à-vis de la lumière, le niveau atteint par chaque composante dépend du niveau atteint par la composante qui la précède. Certains auteurs précisent les relations entre composantes successives et donnent ainsi les équations Fi des valeurs potentielles dans la relation fi :
NG = f (NE) ; NE = g (MSA2) ; MSA2 = h (NP), avec NE (NE/m² : nombre d'épis par mètre carré), MSA2 (matière sèche aérienne produite/m² début montaison). L'annexe IV-1 donne les valeurs des relations et modèles obtenus par Meynard (1985) et Latiri-Souki et al.(1992) pour une variété de blé tendre dans le Bassin parisien et de blé dur en Tunisie.

Chronologie de l'élaboration du rendement et conditions de milieu les plus probables dans les Marais de l'Ouest (Tableau IV-1).

Nous faisons l'hypothèse que le « sol » joue sur la fonction fi qui transforme la valeur de la composante Ci en Ci+1. Nous choisissons d'étudier le comportement du blé dans le marais à partir des paramètres NP (nombre de pieds), MSA2 (matière sèche aérienne au stade B2) et NG (nombre de grains/m²). En effet ces trois composantes s'élaborent à des moments intéressants par rapport aux états du milieu. Le tableau IV-1 met en parallèle élaboration du rendement, profondeur d'enracinement et conditions de milieu les plus probables. Il montre que la levée et le nombre de pieds se réalisent pendant la ré humectation du profil (novembre au début décembre), le tallage herbacé pendant la période d'excès d'eau. Pendant cette période, les horizons concernés par l'enracinement sont la surface, la couche travaillée et une partie du sous sol en fonction de la profondeur de la nappe. On s'intéressera donc à la présence des talles et à l'état de croissance du peuplement à l'issue de cette période pour rendre compte de l'excès d'eau. Le nombre de grains intègre tous les facteurs et condition de milieu du semis à l'anthèse ; c'est aussi le stade où la profondeur d'enracinement est maximum.

Aussi nous étudions successivement l'effet de la qualité des sols sur le nombre de grains (indicateur proche du rendement final), les diverses fonctions fi existant entre deux composantes successives, et enfin les divers états du peuplement végétal qui en résultent.

Effets attendus des types de sol sur le comportement du blé.

- Le NG est la composante qui est la plus fortement corrélée au rendement final. De plus elle s'élabore du semis jusqu'à l'anthèse. C'est donc la composante qui récapitulera le mieux l'effet du comportement du profil de sol pendant la période du cycle la plus marquée par l'excès d'eau. Enfin nous savons que le rendement est lié à la profondeur de la nappe en hiver (Pons, 1985 ; Van Hoorn, 1958 ; Trafford et Oliphant, 1977). Or celle ci est un indicateur de l'interaction types de sol x modes de drainage (III ème partie). Nous nous attendons donc à un effet des types de sol sur les rendements.
- Le NP est fonction des conditions de levée. La stabilité du matériau de l'horizon travaillé (0-30 cm) va agir directement sur la dispersion des argiles dès les premières pluies.
- MSA2, tallage et enracinement précoce s'élaborent pendant la période saturée. L'excès d'eau défini par la combinaison des paramètres [profondeur de nappe, porosités de la couche travaillée et de surface] devrait avoir un effet sur la croissance précoce.

2. Matériels et méthodes.

2.1 - Le dispositif expérimental.

Les situations expérimentales sont celles que nous avons présentées pour étudier le comportement hydraulique et le comportement de la couche travaillée. Sur une trentaine de situations (11 en 1981, 13 en 1982, 6 en 1983) semées en blé d'hiver, variété TOP (variété TALENT pour 3 situations en 1982), on fait varier la fertilisation azotée. Il y a 3 doses d'azote en comparaison : une dose N = 0 (N0), une dose calculée à partir de la méthode des bilans (Na) proposée par Hébert (1969), une dose majorée de 40 à 60 kg par rapport à cette dernière (Nx). Cette dernière dose est censée être non limitante par rapport au rendement.

Pour mettre plus clairement en évidence l'effet type de sol sur le comportement du blé,

nous nous plaçons dans le cas où l'azote est supposé non ou peu limitant. Ceci veut dire que nous ne retenons dans chaque situation expérimentale que la valeur maximum prise par la composante. En général, elle sera obtenue avec la dose X d'azote.

2.2 - Les traitements.

Le traitement dont on étudie l'effet sur le peuplement végétal est la qualité des profils de sol. Cette qualité est définie par des profils types numérotés de 1 à 10 classés par ordre d'instabilité croissante. Pour les profils n° 1, 2, 4, 5, 6 l'horizon 0-30 cm est stable (ID<=3) ; pour les n° 8 et 9, il est intermédiaire ID = 4 à 9) ; pour le n° 10, il est instable (ID>=10).

2.3 - Les mesures et observations sur le peuplement de blé.

Le comportement du blé est apprécié par trois ensembles de mesures : le rendement et ses composantes, la croissance et le développement précoces, la structure du peuplement avant la montaison. La composante NP et la croissance précoce MSA2 sont estimées par récolte de 15 placettes (0,50 m x 2 rangs) dans chaque traitement, début montaison, les autres composantes à la récolte.

On déduit par calcul : MSA2/P (MSA2 par pied), V2 et V2p (Tableau 1 de l'annexe IV-4). V2 est la vitesse de croissance moyenne jusqu'à la montaison (phase levée-stade B2). Elle est calculée à partir du rapport MSA2/m² / Durée levée-stade B2 avec MSA2/m² en g/m² et durée levée-stade B2 en °Cxj, V2 en g/m²/°Cxj. On définit le paramètre V2p = [MSA2/P]/Som T°C comme la matière sèche par pied ramenée à la durée pour la produire (MSA2/P/°C en g/P/°Cxj). On peut l'appeler l'efficience de l'énergie reçue par pied. Les valeurs de V2p, V2 et MSA2 se déduisent les unes des autres par les relations :
V2p = V2/NP = [MSA2/durée levée-stB2] / NP.

Les déterminations du stade B2 et de la structure du peuplement se font par observation d'une trentaine de pieds dans le traitement Nx. Il s'agit d'observer le stade de développement de l'apex du brin-maître d'une part et le nombre et la succession des talles constitutifs des pieds d'autre part pour diagnostiquer le moment et l'intensité des conditions

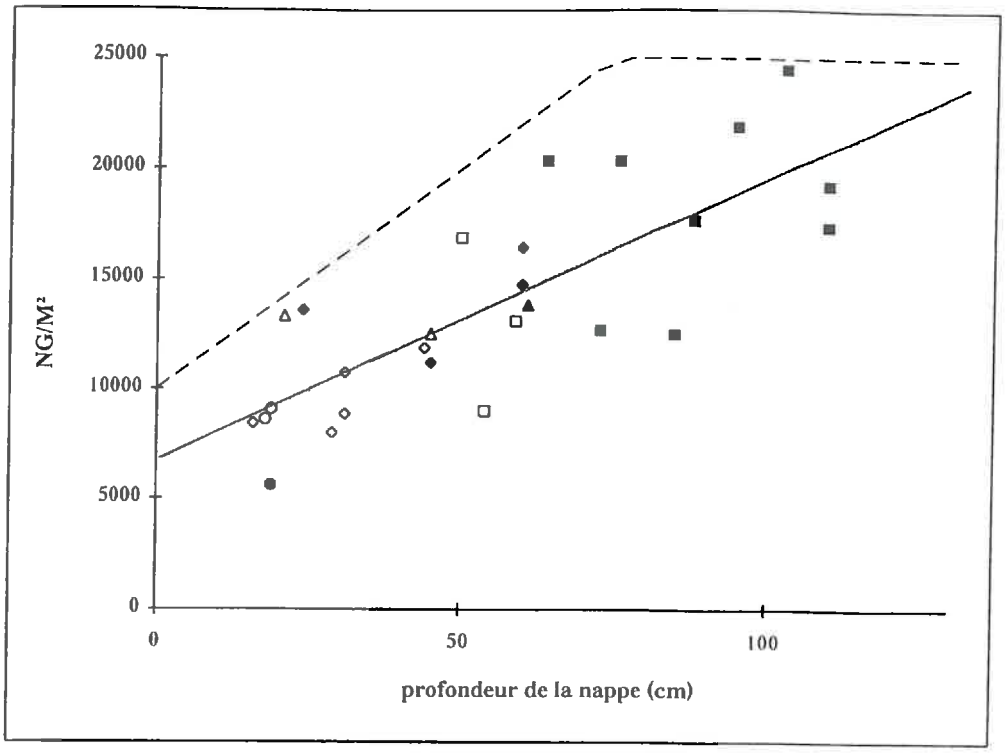


Figure IV-1. Nombre de grains /m² maximum et profondeur de nappe en hiver (var. TOP).
Effet respectif des types de sol et du mode de drainage.
Types <=6, 8, 9, 10 : carré, triangle, losange, rond.
Modes de drainage : drains (noir), rigoles (blanc). Régression : continu ;
pointillé : enveloppe supérieure.

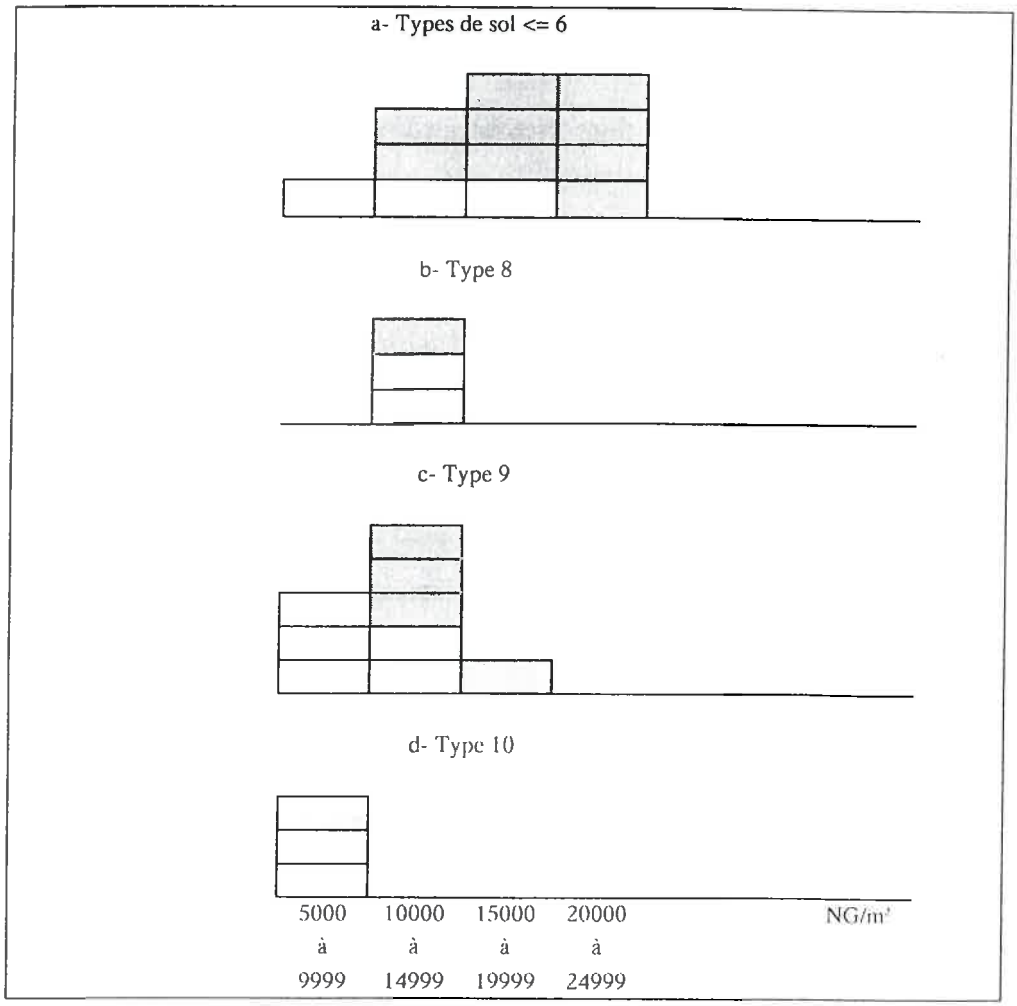


Figure IV-2. Histogramme de NG. Effets des types de sol et
des modes de drainage.
Rigoles : clair ; drains : foncé.

limitantes (Masle-Meynard, 1980). La structure du peuplement du blé a été observée sur les 2/3 des parcelles. Nous avons notamment noté la proportion de pieds possédant le premier talle T1, T1 est contemporain à la 4 ème feuille du brin maître.

Les conditions climatiques ont été contrôlées et sont décrites en annexe IV-2.

3. Résultats.

3.1 - Effet de la qualité du profil de sol sur le NG indicateur du rendement.

Les rendements maximum (variété TOP) obtenus sur les parcelles du réseau montrent une corrélation étroite avec le NG ($R^2 = 0,904$) et faible avec le P1G ($R^2 = 0,415$).

La figure IV-1 montre que, en tendance, le NG/m² augmente avec la profondeur de la nappe en hiver ($R^2 = 0,628$). Si nous traçons la courbe enveloppe des valeurs maximum de NG, nous notons une augmentation linéaire du NG avec la profondeur de la nappe dans l'intervalle [0, 70/80 cm]. Au delà de cette profondeur, le NG se stabilise autour d'une valeur maximum de 25000 grains/m². Les histogrammes de la figure IV-2 montrent que le NG modal diffèrent pour les sols de types <=6 (20000 g/m²), 10 (7500 g/m²), et 8 et 9 (12500). Les types 8 et 9 ne se distinguent pas. Une partie de la variabilité est expliquée par les modes de drainage. Les rigoles produisent des rendements généralement plus faibles que les drains notamment pour les types <= 6 et 9. Il existe donc un effet global des types de sol sur le NG en interaction avec les modes de drainage. La profondeur de nappe en hiver est un indicateur qui rend compte de cet effet. Ainsi, en deçà de 70 à 80 cm la profondeur de nappe semble être limitante pour le NG maximum, au delà, elle n'est plus limitante. Le premier cas se manifeste pour les sols de types 10, 9 et 8 quel que soit le mode de drainage et les types <= 6 sur rigoles, le deuxième pour les sols de types <= 6 sur drains.

3.2 - Effet de la qualité du profil de sol sur la croissance et le développement précoces du blé.

- Le taux de levée et la mise en place du peuplement (NP).

Le nombre de pieds par m² (NP) dépend du nombre de grains semés par m² (NPS) et

Tableau IV-2. Effet des ITK sur le taux de levée (%) dans le cas de conditions climatiques favorables ou défavorables.
m : moyenne, e.t : écart type ; n= nombre de parcelles.
S, HS : différences significatives (5%), hautement significatives (1%), test T.

ITK n°		1 à 10	11 à 16	
Groupes		I à III	IV et V	
lit de semence		défavorable	favorable	
Conditions climatiques				
favorables	m	71		
	e.t	18		
	n	16	0	
				HS
défavorables	m	53	69	
	e.t	16	5	
	n	9	7	
		S		

du taux de levée. Nous avons vérifié que *les agriculteurs n'ont pas modulé les doses en fonction des types de sol* (Figure 1 de l'annexe IV- 3). Le taux de levée représente la fonction f1 qui transforme la variable quantité de grains semés NPS (C0) en nombre de pieds NP (C1).

L'effet des conditions de semis (climat, travail du sol).

Les conditions de levée ont été jugées par l'analyse des conditions climatiques lors de la phase semis-levée d'une part et des modalités de travail du sol (ITK) d'autre part (Tableaux 1, 2, 3 de l'annexe IV-3).

Les conditions climatiques de levée ont été défavorables en 1980 (températures basses et pluviométrie faible), favorables en 1982 (températures élevées et pluviométrie importante) et en 1981 (sauf les semis entre le 7 et 10 novembre qui ont été suivis par une période sèche) (Tableau 1 de l'annexe IV-3).

On fait l'hypothèse que le lit de semence est favorable lorsqu'il a un fond tassé et de petites mottes en surface, il est défavorable dans le cas contraire. Le tableau 2 de l'annexe IV-3 présente la grille d'analyse qui permet de regrouper les ITK par rapport à l'état probable du lit de semence. Les ITK qui produisent un lit de semence favorable sont les groupes IV et V (Tableaux 3 et 4 de l'annexe III-2). Cependant, dans le groupe IV, on est indécis sur l'aspect favorable de certains ITK qui produisent de grosses mottes. Au contraire les ITK qui aboutissent à un lit de semence défavorable sont ceux qui comportent un travail profond après récolte (ITK des groupes I, II et III) : le sol non repris constitue un fond plus ou moins creux pour le lit de semence, de plus les reprises produisent des mottes grosses à moyennes.

En combinant conditions climatiques et qualité du lit de semence (Tableau 3 de l'annexe IV- 3), on trie les parcelles selon les conditions de semis. On aboutit au tableau IV-2 qui montre qu'on n'a pas de parcelle représentant la combinaison conditions climatiques et lit de semence favorables. On teste l'hypothèse que lorsque les conditions climatiques sont défavorables, l'état du lit de semence a un effet sur le taux de levée et dépend donc des ITK. Le tableau IV-2 montre que dans ce cas, les parcelles conduites avec les ITK des groupes IV et V ont un taux de levée significativement plus élevé que les parcelles conduites avec les ITK des groupes I, II, III. De même on peut tester les conditions climatiques pour les ITK

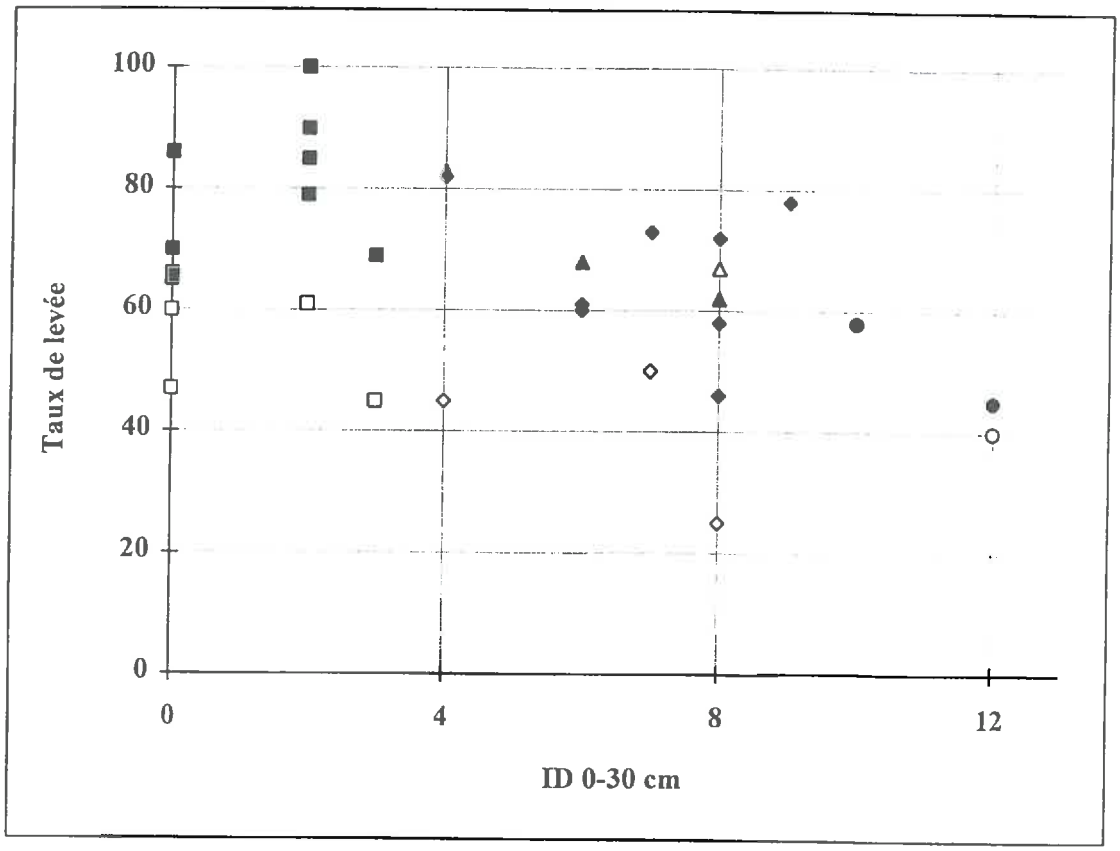


Figure IV-3. Relation entre le taux de levée et l'Indice de Dispersion (ID) de l'horizon 0-30 cm. Effet des types de sol et des conditions de levée.
Types de sol <=6, 8, 9, 10 : carré, triangle, losange, rond.
Conditions de levée : favorables (foncé),défavorables (clair).

produisant un lit de semence défavorable (groupes I, I, III). Le taux moyen de levée est réduit de façon hautement significative lorsque les conditions climatiques sont défavorables (53 % contre 71 %).

On note en moyenne (Tableau 4 de l'annexe IV-3), un taux de levée de 72 % en conditions favorables et 49 % en conditions défavorables. La différence de taux de levée de 23 % est du même ordre pour tous les types de sol (entre 20 et 30 %) sauf pour les sols de type 10. Pour ces derniers quelles que soient les conditions de levée, le taux de levée est faible (40 à 50 %).

L'effet de la stabilité structurale de l'horizon 0-30 cm sur le taux de levée.

La figure IV-3 illustre l'évolution du taux de levée avec la qualité des sols (et plus précisément l'ID de 0-30 cm) selon les conditions de semis. Si on considère l'ensemble des parcelles, le taux de levée est identique pour les ID < 4 (70 % environ), il chute pour les 4 <= ID <= 9 (60 %) et atteint des valeurs très faibles pour les ID >= 10 (48%) quelles que soient les conditions de levée.

En ce qui concerne la validation de la classification des sols par l'étude du taux de levée et du peuplement on trouve :

- un effet manifeste des profils de type 10 (ensemble des horizons instables et notamment celui de surface). Le peuplement (Tableau 4 de l'annexe IV- 3) a des valeurs très faibles notamment pour les parcelles qui n'ont pas été gypsées (NP = [136, 153]). On peut interpréter ces valeurs par la grosseur des mottes du lit de semence et une dispersion très rapide des argiles avec le début de l'état humide puis saturé ;
- à l'opposé, aucun effet des profils de types <= 6. Le taux de levée et le peuplement dépendent uniquement des conditions de levée ;
- un effet des profils de type 9 qui s'exprime par un taux de levée et un peuplement en moyenne plus faibles mais surtout par des valeurs très aléatoires (NP = [60, 370]). Les conditions défavorables de levée entraînent ici une forte réduction du taux de levée et du peuplement.
- les sols de type 8 semblent se comporter de façon intermédiaire : l'effet sol sur le taux de levée semble faible mais le nombre réduit de situations dans cette catégorie de sol ne permet

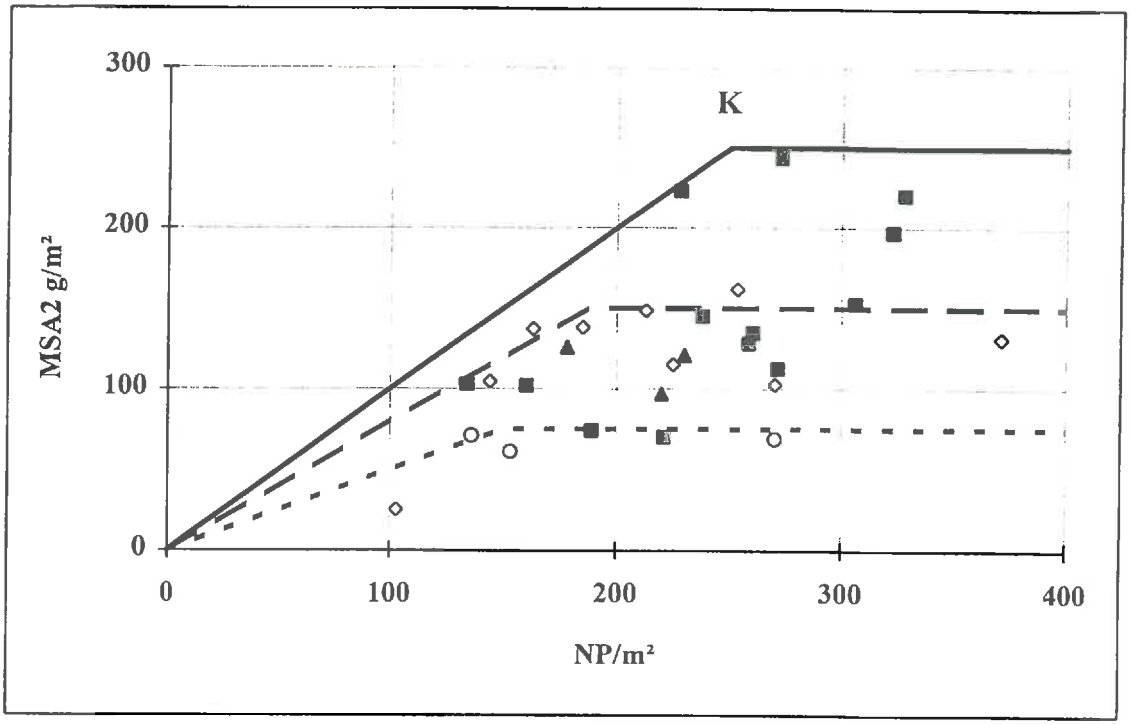


Figure IV-4. Etat de croissance début montaison (MSA2/m²) et peuplement (NP/m²). Effet du peuplement et des types de sol. Variété TOP.
Types <=6, 8, 9, 10 : carré noir, triangle noir, losange blanc, rond blanc.
Enveloppes types <= 6, 8/9, 10 : continu, tirets, pointillés.

pas de discuter de l'effet condition de levée.

La stabilité du matériau de l'horizon 0-30 cm ne semble pas intervenir sur le taux de levée si ID < 4. Par contre, lorsque ID >= 10, elle intervient fortement, le taux de levée atteint 40 à 50 %. Entre ces deux bornes, lorsque l'ID a pour valeur 6 à 9, le taux de levée et le peuplement diminuent en moyenne faiblement *mais la variabilité due aux conditions de levée augmente de façon très importante.*

- L'état de croissance au stade B2.

Etude de la relation MSA2 = f2(NP). Mise en évidence de la qualité des sols.

La figure IV-4 représente l'ensemble des situations dans le plan [NP, MSA2]. On trace les courbes enveloppes des valeurs maximum MSA2 pour les sols de type 10, 9/8, et <=6. On sait que ces courbes passent par l'origine. Chaque enveloppe est constituée d'une partie croissante passant par l'origine, puis plafonne autour d'une valeur maximum à partir d'une certaine valeur NP seuil.

Ces enveloppes peuvent être approchées par deux droites d'équation :

(1) MSA2 = a NP (partie croissante) si (NP < seuil),

(1') MSA2 = b (partie constante) si (NP > seuil).

Ces droites se coupent au point K de coordonnées (NP = b/a ; MSA2 = b). Enfin on note que la courbe enveloppe des sols de type <= 6 englobe celle des sols de types 8/9 qui elle-même englobe celle des sols de type 10.

Les trois courbes enveloppes se distinguent par la valeur de la pente de la partie croissante, la valeur de la MSA2 maximum (partie constante) et l'intersection de ces deux parties (zone de transition). Le tableau 2 en annexe IV-4 précise les valeurs des paramètres des courbes représentant ces 3 ensembles de types de sol <=6, 8/9 et 10, ces valeurs ont été obtenues graphiquement. La partie croissante traduit la dépendance de MSA2 vis-à-vis de NP et donc du taux de levée, la partie constante l'indépendance.

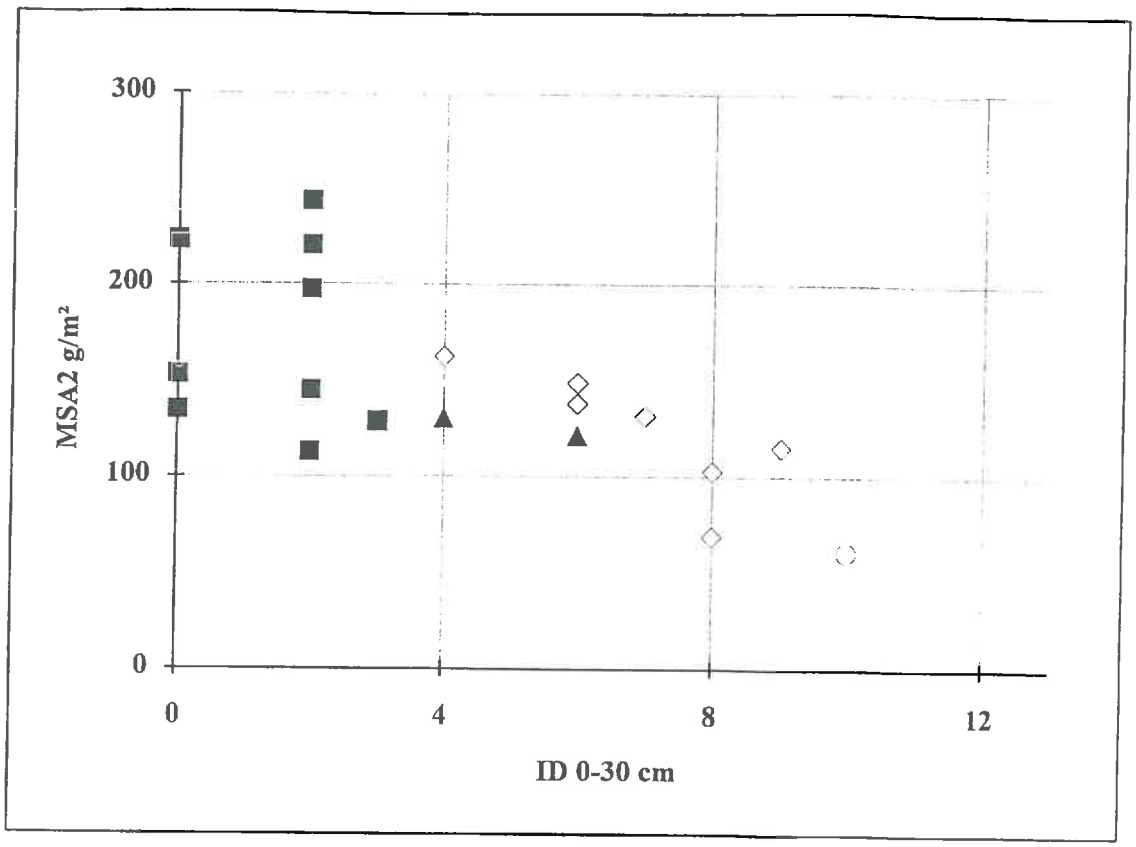


Figure IV-5. Etat de croissance début montaison (MSA2 g/m²) et Indice de Dispersion (ID) de la couche travaillée : effet des types de sol. Variété TOP, parcelles pour lesquelles NP n'est pas limitant par rapport à MSA2. Types <=6, 8, 9, 10 : carré noir, triangle noir, losange blanc, rond blanc.

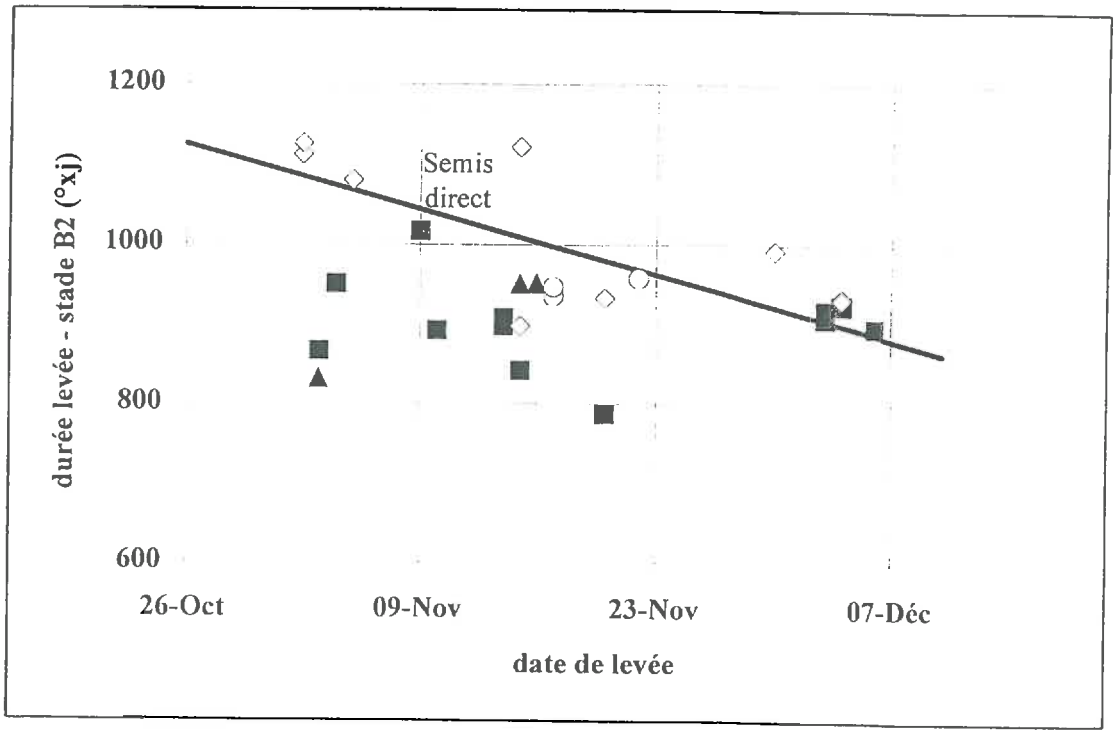


Figure IV-6. Durée levée - début montaison et date de levée. Effet des types de sol. Types <=6, 8, 9, 10 : carré noir, triangle noir, losange blanc, rond blanc. Régression types 9 et 10 : continu.

L'effet de la stabilité structurale de l'horizon 0-30 sur MSA2

La figure IV-5 montre la relation entre l'ID de la couche travaillée et MSA2 dans le cas où MSA2 est indépendant de NP (NP > 225, 180, 75 respectivement pour les types de sol <= 6, 8/9, et 10). L'enveloppe des points montre que MSA2 est très élevée (> 200 g/m²) pour les ID <= 2, puis pour les valeurs ID > 4, MSA2 diminue régulièrement pour atteindre des valeurs très faibles (70 g/m²) pour un ID = 12. Or, nous avons vu dans les chapitres précédents que l'ID rend compte de la porosité de la couche travaillée pour une part de plus en plus grande au fur et à mesure que le matériau est instable.

Ainsi la variabilité de MSA2 est liée à NP d'une part et d'autre part à l'interaction qualité des sols (types de sol) et modalités de travail du sol (modulo la campagne agricole). Ceci se traduit par une gamme de valeurs et des valeurs maximum de la matière sèche qui diffèrent selon les années et les types de sol.

Incidence de la qualité des sols sur la durée de la phase levée-stade B2.

On sait que la durée de la phase levée-stade B2 diminue lorsque la date de levée est de plus en plus tardive (Peron, 1986). La qualité des sols intervient-elle dans cette relation ?
La figure IV-6 représente l'ensemble des situations dans le plan [date de levée, durée période levée-stade B2]. Si on distingue les types de sol, on note une limite matérialisée par les sols de type 8 qui sépare d'une part les types 9/10, des types <=6 d'autre part. La liaison durée x date de levée (Tableau 3 de l'annexe IV- 4) est presque nulle si on considère l'ensemble des situations (R^2 = 0.11 ; n= 28), ou les situations de sols types <=6. Par contre, elle est relativement élevée pour les types 9 et 10 (R^2 = 0,49 ; n = 12).

Ainsi en ce qui concerne la durée de la phase levée - montaison,

- pour les sols de types <=6, il y a indépendance avec les dates de levée, *tout au moins dans la gamme de dates de levée explorée*,
- pour les sols de types 9 et 10, par contre, il y a réduction de la durée avec une levée tardive.

La différence de durée de la phase levée-stade B2 entre ces deux ensembles de sols (types 9/10 contre types <=6) semble importante lorsque les dates de levées sont précoces (début novembre), elle s'atténue et disparaît lorsque la date de levée est de plus en plus tardive

(fin novembre-début décembre). La parcelle en semis direct de type <= 6 se comporte comme les parcelles de type 9 et 10. Les sols de type 8 constituent la limite entre ces deux ensembles de sols.

On peut donc écrire la relation d'ordre :
Durée phase de la phase de développement (levée-stade B2) pour les sols types 9 et 10 > types 8 > = types (<= 6).

Enfin le cas particulier d'une situation de type <= 6 en semis direct nous conduit à formuler (pour unifier l'ensemble des résultats) l'hypothèse que c'est la faible porosité à l'eau et à l'air de la couche travaillée qui entraîne un effet sur la durée de la phase levée - stade B2.

- Conséquences sur la vitesse de croissance moyenne pendant la phase levée-stade B2.

L'étude de la vitesse moyenne de croissance (V2) nous permet de combiner l'effet types de sol sur la MSA2 d'une part et sur la durée du développement précoce d'autre part. La figure 1, en annexe IV- 4, peut être commentée en terme identique à la figure IV-4 en substituant la MSA2/m² à la vitesse de croissance moyenne V2.

Les courbes enveloppes des valeurs maximum V2 montrent la même relation d'ordre
V2 des sols types<= 6 > V2 des sols type 8/9 > V2 des sols type 10.

A un stade précoce de développement (stade B2), la qualité des sols joue sur l'état de croissance à travers deux facteurs : la MSA2 produite et la durée de développement. La MSA2 max. atteinte augmente de façon très sensible avec la qualité des sols : 75, 150, 250 g/m² respectivement pour les sols de type 10, 9/8 et <= 6. La durée de développement diminue avec la qualité des sols : plus courte pour les sols de type <=8 que pour les types 9 et 10. L'allongement de la phase levée-stade B2 ne permet pas de compenser le déficit de MSA2 pour les sols de types 9 et 10. Il n'y a donc pas la relation attendue à savoir une augmentation de la MSA2 avec la durée de la phase levée-stade B2 (ou si elle existe, l'effet type de sol est majeur). La qualité des sols agit donc sur les vitesses de croissance et de développement pendant la phase précoce de la culture de blé. L'effet se manifeste nettement et aboutit à

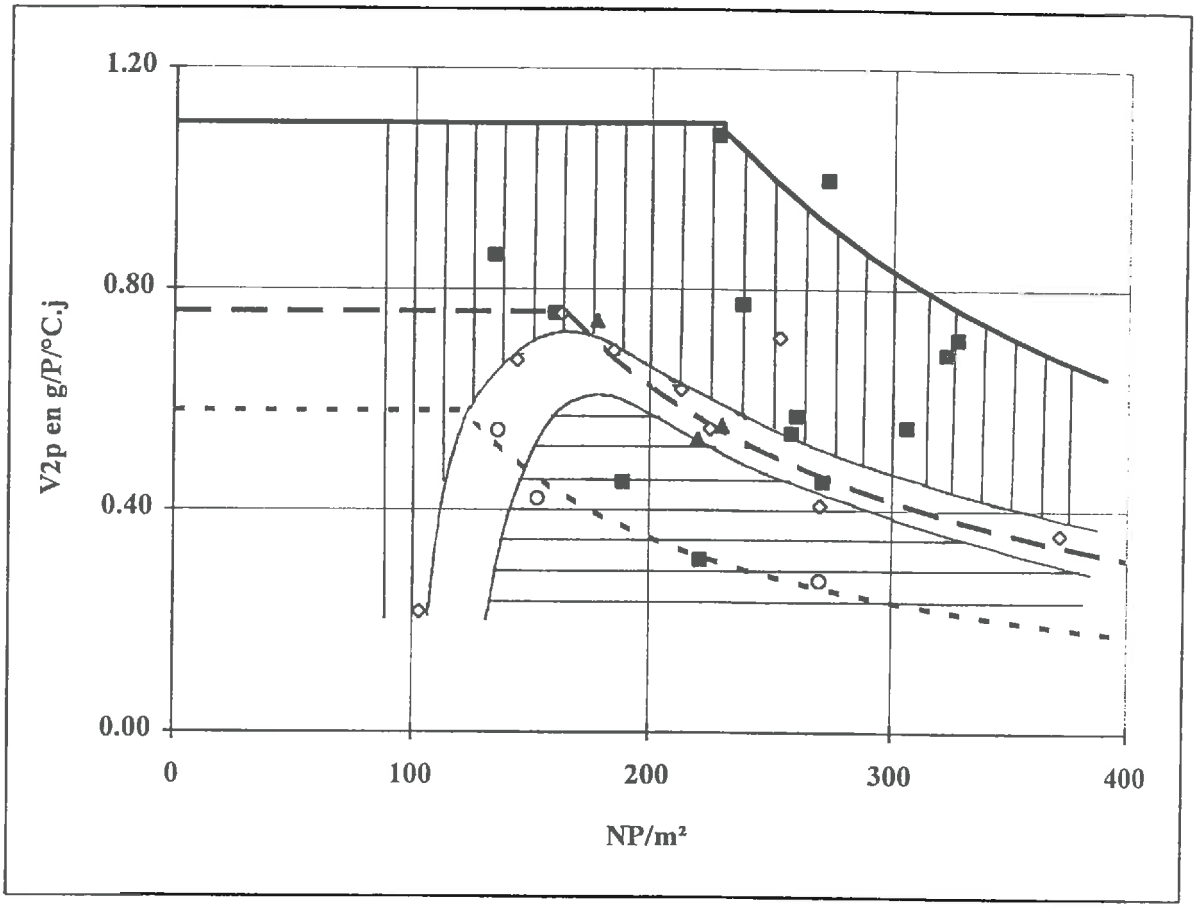


Figure IV-7. Efficience de l'énergie reçue par pied V2p = MSA2/P/°C en g.(P)-1.(°Cxj)-1 et peuplement (NP/m²). Effet des types de sol sur les types de pied.
% de pieds avec T1 > 80, 60/80, < 60 : hachures verticales, absentes, horizontales.
Types <=6, 8, 9, 10 : carré noir, triangle noir, losange blanc, rond blanc.
Enveloppes types <= 6, 8/9, 10 : continu, tirets, pointillés.

différencier les sols de type <= 6, des sols de types 8/9 et 10. Les sols 8 ont un comportement intermédiaire.

- Structure du peuplement. Incidence de la qualité des sols sur la matière sèche par pied (MSA2/P)

- Incidence de la qualité des sols sur la relation V2p = h(NP).

Biologiquement, sous un climat donné et pour des ressources édaphiques non limitantes, il existe des relations de la forme de celle de la figure IV-7 entre la composante V2p = MSA2/P/°C et la composante précédente NP estimée par unité de surface. La figure IV-7 montre qu'il existe plusieurs courbes enveloppes V2p = h(NP) pour les différents types de sol 10, 9/8 et < = 6. Ceci s'interprète en terme de compétition pour les facteurs de croissance à partir d'une valeur maximale de NP. Les paramètres de forme de la courbe dépendent des types de sols (Tableau 4 de l'annexe IV- 4).

- La structure du peuplement et la matière sèche par pied (V2p).

On précise sur la relation V2p = h(NP) la fréquence de pieds avec le 1 er talle (T1) pour chacune des situations étudiées. On partage ainsi le plan en trois secteurs : situations où le % de pieds possédant T1 est >= 80, 60-80 et <60. La figure IV-7 montre qu'il y a correspondance entre V2p et la structure du peuplement. Il y a réduction de V2p lorsque les sols deviennent défavorables et/ou lorsque le peuplement augmente. Cette réduction se traduit par une diminution du pourcentage de pied possédant le premier talle et plus généralement une réduction du nombre de talles.

Plus précisément,

- pour un peuplement supérieur à 200, l'effet des types de sol sur la structure du peuplement et précisément sur le pourcentage de pieds ayant le 1er talle se manifeste par la relation d'ordre :

% de pied avec T1

Sols de types (<= 6) > Sols de type 8/9> Sols de type 10 ;

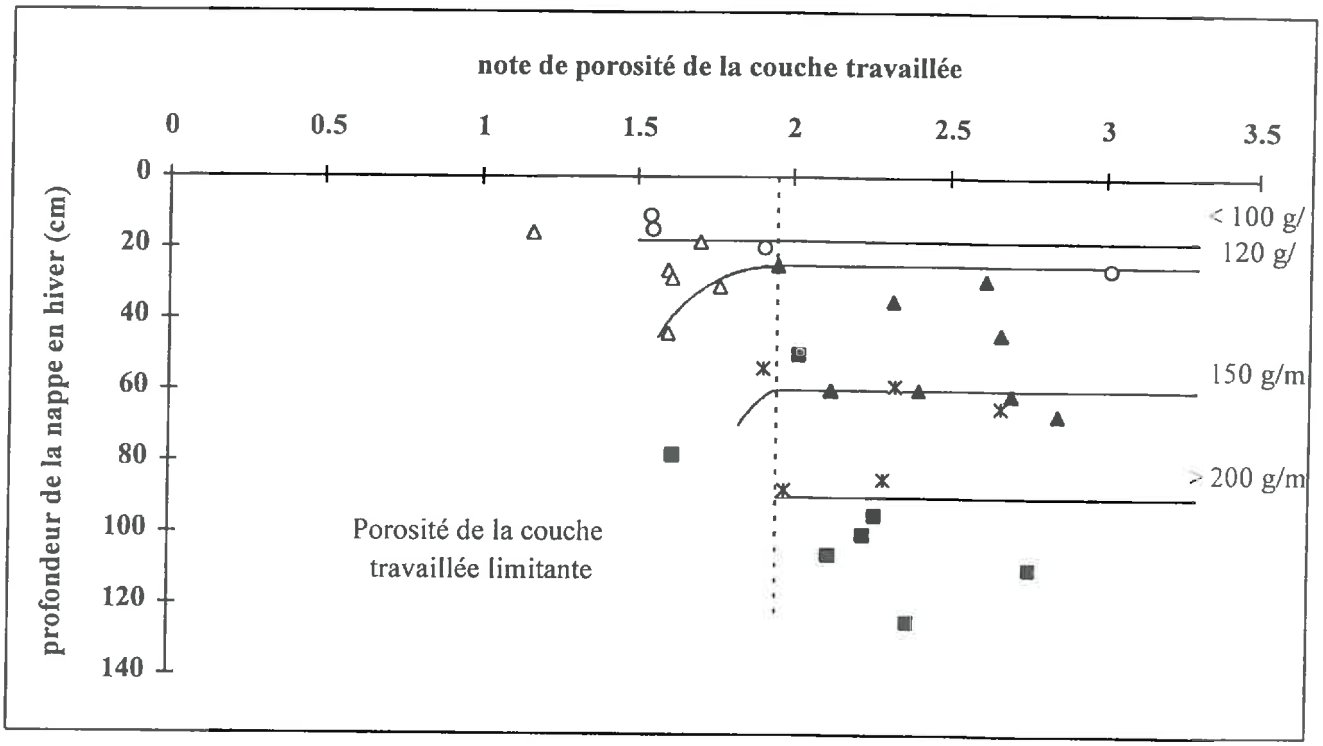


Figure IV-8. Excès d'eau (profondeur de la nappe et porosité de la couche travaillée) et croissance potentielle précoce (lignes d'iso - valeur en MSA2 g/m²).
Types (1, 2), (4, 5, 6), (8, 9a), (9b), (10) : carré grand, carré étoile, triangle noir, triangle blanc, rond blanc.

- pour un peuplement faible (< 100 pieds), le pourcentage de pieds avec T1 est >= 80 %, quel que soit le type de sol. Ici, c'est le peuplement qui est déterminant dans la structure du peuplement ;
- entre ces deux valeurs, nous avons une interaction peuplement x type de sol pour expliquer le % de pied ayant le 1er talle.

Ceci permet de conclure que la qualité des sols agit sur le nombre d'organes et sur la matière sèche par organe : dans le cas des types de sol <=6, on a une forte probabilité d'avoir un tallage important, et les organes ainsi formés ont une masse élevée ; dans le cas des types de sol 9/10, on a une faible probabilité d'avoir un tallage important, et les organes formés ont une masse faible.

- Excès d'eau et état du peuplement début montaison.

La figure IV-8 positionne dans la plan représentant les paramètres "Excès d'eau" [note de porosité de la couche travaillée et profondeur de nappe] chaque situation affectée de la valeur de MSA2. Nous construisons par interpolation les courbes d'iso-valeur de la valeur maximum. Nous obtenons ainsi un découpage du plan représentant des croissances potentielles précoces pour des degrés différents d'excès d'eau. Il y a alors correspondance entre comportement physique et comportement du peuplement végétal.

- Discussion et conclusion sur l'effet de la qualité du profil de sol sur la croissance et le développement précoces du blé.

A la fin de l'hiver, l'état du peuplement est marqué par l'effet stabilité structurale de la couche travaillée et donc par les types de sol.

- En premier lieu à travers le NP. Le NP est réduit pour les sols de type 10. Le taux de levée est faible. Dans le cas des sols de type 9, le taux de levée dépend des conditions de levée (qualité du lit de semence, conditions climatiques). Si les deux conditions sont défavorables, le taux de levée est faible. Dans le cas contraire, il est moyen ou élevé. Dans le cas des sols stables (types <=6), le taux de levée est uniquement fonction des conditions de levée. Pour les sols de type 8, le faible nombre de situations ne permet pas de trancher. Cependant par

interpolation, on serait tenté de donner à ce type le nom d'intermédiaire. Ceci entraîne un effet type de sol sur la gamme des valeurs prises par NP et donc sur l'état du peuplement à la levée.

- En deuxième lieu à travers la quantité de matière sèche aérienne produite début montaison (MSA2) puisque elle dépend du NP jusqu'à un certain seuil de peuplement. Mais de plus lorsque NP ne semble plus limiter l'état de croissance, on montre un effet spécifique des types de sol sur la relation MSA2 = f(NP). Cet effet permet de distinguer les types de sol 10, 9/8 et ceux <= 6. Ce deuxième effet ajouté au premier entraîne un effet des types de sol sur l'intervalle des valeurs MSA2 c'est - à - dire sur l'état de croissance en fin d'hiver.
- Enfin, on observe un allongement de la durée du développement précoce (levée au début montaison) pour les sols types 9/10 part rapport aux sols types <=6. Cet allongement ne compense pas pour autant le déficit de croissance observé sur les situations des sols de types 10 et 9. Les sols types 8 se trouvent là encore en situation intermédiaire.
- Les différences de croissance et de développement en fin d'hiver s'expriment par la structure du peuplement. Le tallage et/ou la masse par organe est affecté dans les sols de type 10 et 9. Par contre, pour les sols <= 8, il ne semble pas affecté.

Ces résultats confirment ceux obtenus par Cannell et al. (1980) en cases lysimétriques de plein air. Ils les généralisent si on se donne comme définition de l'excès d'eau non pas l'ennoiement comme les auteurs l'ont testé mais la combinaison [porosité de la couche travaillée, profondeur de la nappe] comme indicateur de l'aération du sol (Cannell et al., 1985). Cet indicateur est fortement lié à la stabilité structurale du matériau constitutif du profil.

4. Discussion-conclusion : comportement du blé par rapport aux types de sol.

Dans la première partie du cycle (jusqu'à la montaison), trois types de sol ou groupes de types se distinguent clairement : type 10, type 9, types <= 6. Ces 3 premiers groupes représentent 3 degrés d'excès d'eau sur le peuplement végétal. Le type 10 est toujours et fortement affecté par l'excès d'eau, le type 9 de façon variable, et les types <=6 ne sont pas affectés par l'excès d'eau en hiver. Le type 8 peut être défini comme un type de transition. Ces trois groupes de sol se différencient par le comportement de la couche travaillée et notamment

par l'état de surface.

La profondeur de nappe en hiver (Z) rend compte pour une part importante du nombre de grains /m², composante fortement liée au rendement final. Cette relation met en regard le caractère plus ou moins hydromorphe de la parcelle aménagée estimé par Z et la valeur de NG composante indicatrice du rendement du blé. Les paramètres Z et NG sont des variables continues et permettent de moduler l'effet type de sol (variable qualitative ordonnée) par le mode de drainage. Ceci nous permet de discuter l'intensité et la forme des liaisons entre comportement du blé et qualité du sol aménagé. Ainsi la courbe enveloppe du nombre de grains maximum /m² peut être interprétée comme l'expression du facteur limitant « profondeur de nappe » : la partie croissante représente la limite qu'impose la valeur de Z à la valeur de NG, la partie constante correspond à l'indépendance des deux paramètres.

Ainsi, pour l'ensemble du cycle du blé, on peut retenir les regroupements de types de sols suivant :

1. Profils types 1 et 2. Sols n'exprimant aucun effet limitant pour l'ensemble des composantes du rendement du blé. Ils ont donc un potentiel de production très élevé.
2. Profils types 4, 5, 6. Sols proches du cas 1. Ils peuvent exprimer un faible effet limitant pour les composantes s'élaborant après l'anthèse. Ils ont un potentiel de production élevé. La différence entre les cas 1 et 2 est donc très faible en ce qui concerne le comportement du blé.
3. Profil type 8. Sols qui expriment un faible effet limitant pour l'ensemble des composantes du rendement. Ils ont un potentiel de production "intermédiaire".
4. Profil type 9. Sols qui expriment un effet limitant pour l'ensemble des composantes du rendement. Cet effet limitant se manifeste de façon très variable selon les autres conditions de milieu et de travail du sol. Ils ont un potentiel de production très variable.
5. Profil type 10. Sols qui expriment un effet limitant pour l'ensemble des composantes du rendement. Cet effet limitant se manifeste quelles que soient les autres conditions de milieu et de travail du sol. Ils ont un potentiel de production très faible.

Ainsi, la classification des sols proposée à partir du comportement du matériau est toute à fait pertinente pour le blé dans le cas des types 10, 9, et 8. Elle est beaucoup trop fine

pour les types 6, 5, 4 et pour les types 1 et 2. En effet, le blé pour l'ensemble de son cycle privilégie le comportement des horizons de surface par rapport aux horizons profonds, alors que la classification des sols issue du comportement du matériau donne un poids identique à chaque horizon.

5. Synthèse des parties III et IV. Validation de la classification des sols à partir du comportement au champ

La relation remarquable entre les profondeurs de nappe en hiver et d'enracinement début montaison explicite le passage entre les conditions du milieu pédo-climatique et les composantes du rendement par l'intermédiaire des modalités de nutrition de la plante (Boiffin et al., 1981). La synchronie entre composantes et dynamique d'enracinement nous permet de relier une composante avec une profondeur d'enracinement. Plus une composante est tardive, plus elle sera concernée par des horizons profonds. Ainsi pour NP, l'horizon concerné est la surface, pour MSA2, ce sont la surface et la couche travaillée, pour NG, les horizons concernés sont la surface, la couche travaillée et les premier (30-60 cm) et deuxième sous sols (60-90 cm) et au delà selon la qualité des sols et les conditions climatiques de printemps.

Le rapprochement du comportement physique des sols et du comportement du blé nous permet d'expliciter la notion d'excès d'eau.

1- Cas 1 et 2. Profils types 1, 2 (cas 1) et profils types 4, 5, 6 (cas 2). La couche imperméable est au delà de 60 cm, l'incidence des modalités et des conditions de travail du sol est moyenne à faible sur la perméabilité du profil.. Si les parcelles sont assainies et drainées, les types de sol <= 6 ne présentent pas l'excès d'eau comme condition limitante à la production de blé.
2- A l'opposé (cas 4), les profils type 10 présentent une faible profondeur la nappe qui correspond à celle de l'horizon travaillé. La stabilité de l'horizon de surface est très faible ce qui entraîne un état de surface dispersé, une porosité de la couche travaillée toujours faible (<2), malgré des modalités de travail du sol favorables. Ici l'effet type de sol se manifeste par l'excès d'eau. Cet excès est provoqué par une perte de la perméabilité qui entraîne une insuffisance d'aération du profil de sol. Celle ci provoque outre une réduction

du peuplement par la réduction du taux de levée, une réduction de la vitesse de développement et de la croissance précoce. Il y a réduction du tallage à travers le nombre et le poids des talles. L'enracinement précoce est peu profond. Malgré l'assainissement et le drainage des parcelles, les sols de type 10 présentent un degré d'excès d'eau très élevé. L'imperméabilité s'exprime dès la surface du sol et se manifeste sur l'ensemble du profil ce qui limite très fortement la production de blé. Ils peuvent être considérés comme impropres à la culture.

3- Cas 3- Entre ces deux extrêmes se trouve le cas des profils types 8 et 9. Le niveau imperméable est moins profond que celui de l'élément drainant. La profondeur de la nappe est moyenne à faible et correspond à celle du premier horizon imperméable (30/60). Le comportement de la couche travaillée peut être qualifié de très hétérogène. On observe pour une même gamme d'instabilité du matériau (ID = 4 à 8) une expression de l'instabilité au champ très variable. Ici, le degré de stabilité structurale du matériau interagit avec les conditions de milieu (état hydrique lors du travail du sol, "degré d'excès d'eau" renseigné par la profondeur de la nappe) pour aboutir à l'expression d'une dispersion au champ plus ou moins importante. Dans ce cas, la combinaison des paramètres profondeur de nappe et porosité de la couche travaillée semble particulièrement bien adaptée pour relier comportement physique des sols et comportement du blé. Aussi, On est obligé de distinguer deux sous ensembles, 3a et 3b.

Cas 3a. La profondeur de la nappe est moyenne correspond à celle du premier horizon imperméable (45/60). La porosité de la couche travaillée est moyenne à forte, l'état de surface est peu ou pas dispersé. Les sols de type 8 se trouvent tous dans cette catégorie. Les sols de type 9 sont dans ce cas si l'ensemble des conditions sont favorables (travail du sol réalisé en condition sèche ou ré humectée, nappe plus profonde que l'horizon travaillée grâce aux drains enterrés et/ou à la qualité du travail du sol, sous solage, apport de gypse. Les types de sol 8 et 9 se confondent. Ces situations expriment un effet "excès d'eau" faible à nul pour les composantes du rendement qui s'élaborent pendant l'hiver. Elles ont un potentiel de production "intermédiaire".

Cas 3b. La profondeur de la nappe est faible (30/45). La porosité de la couche travaillée est faible, l'état de surface est dispersé, le gley réduit est toujours abondant. Nous trouvons les sols de type 9 lorsque les conditions sont défavorables : travail du sol réalisé en condition humide, niveau de nappe dans l'horizon travaillée (rigoles). Le comportement du blé dans

les sols de type 9 est alors voisin de celui du type 10. Avec l'assainissement et le drainage des parcelles, les sols de type 9 sont très sensibles aux pratiques agricoles (systèmes de cultures) dans la mesure où elles interagissent avec les conditions de milieu pour aggraver ou limiter l'excès d'eau. Les choix techniques et la pratique de l'agriculteur conditionnent le potentiel de production de ces sols qu'on qualifiera de "difficiles".

Ainsi, la classification des sols proposée à partir du comportement du matériau est toute à fait pertinente vis-à-vis du comportement agronomique (comportement physique et comportement du blé) pour les types 10, 9, et 8. Elle est beaucoup trop fine pour les types 6, 5, 4 et pour les types 1 et 2. Le comportement agronomique privilégie les horizons de surface par rapport aux horizons profonds, alors que la classification des sols issue comportement du matériau donne un poids identique à chaque horizon du profil.

Partie V

Conclusion

Tableau V-1. Grille de diagnostic pour évaluer -a- l'aptitude des sols à évacuer l'eau en excès, -b- le potentiel de production dans les terres de marais. Les profils types sont constitués de la superposition de 3 horizons de 30cm.

Matériau	+	Milieu aménagé et systèmes de culture :	=	Parcelle

Stabilité structurale

	Degré de dispersion	
	* sols	* profils
Indicateurs	Indice de Dispersion	

et

déterminants	Etat chimique : Na/T, CaCO3, CE

Aménagement, travail du sol, culture, Climat (P - ETP)

Perméabilité du profil en condition saturée

Excès d'eau							*Alimentation hydrique*
* comportement physique			* comportement du blé...				* ... du maïs
Profondeur de nappe (cm)	Porosité de la couche travaillée		Profondeur et densité racinaire fin hiver	Valeurs maxi des composantes du rendement MSA2	NG		Rendement
Aména-gement	Modalités de travail du sol	stabilité structurale	profondeur de nappe et travail du sol	porosité couche travaillée	(T°C, P - ETP printemps), Profondeurs d' enracinement		Profondeur de l'horizon instable et tassement

Classements		Type n°	Profondeur horizon instable	drain	rigole					
	Stable ID < 4	1	>= 90	>= 90	40/60	fonction des modalités de travail du sol	plutôt élevées, fonction de la porosité de la couche travaillée et de la profondeur de nappe	Forte (tallage pas affecté ou peu)	Fort en général	Fort à très fort
		2	70/80	>= 90	40/60					
		3	60	# 60/70	40/60					
		4	60/70	# 70	40/60					Moyen à médiocre
		5	50/60	# 60	40/60					
		6	30/40	# 40	40					
	intermé-diaire 4 <=ID <= 9	7	30/50	50	35	travail du sol x stabilité structurale			Faible	
		8	45	45	30					
		9	30	30	30					
	Instable ID >= 10	10	< 30	< 30	< 30	porosité < seuil (2)	Faible	Faible		Faible
							Très faible	Très faible	Faible	Très faible

Nous avons étudié le rôle de la stabilité structurale du sol sur l'expression de l'excès d'eau au champ avec la double préoccupation de comprendre et d'agir.

Les caractéristiques physiques et géographiques des marais de l'Ouest présentent beaucoup de similitudes : altitude proche du niveau de la mer, platitude du relief, zone de transition entre la terre et la mer, climat océanique à tendance « méditerranéenne ». Les sols eux aussi ont des traits semblables : modalités de formation, profil peu différencié, % d'éléments fins, minéralogie et taux des argiles qui expliquent les phénomènes de gonflement et de retrait provoqués par l'état hydrique.

Cependant, le milieu se différencie par sa capacité à évacuer l'eau en excès. Cette capacité dépend simultanément de l'aménagement et de la stabilité structurale du sol. L'aménagement agit sur le degré de maîtrise de l'eau à l'échelle du bassin de marais (marais mouillés, marais desséchés) et à l'échelle de la parcelle (isolement hydraulique, drainage). Si la parcelle est aménagée et drainée, la *stabilité structurale* du matériau permet au sol de maintenir *un état structural* suffisamment poreux pendant l'hiver après avoir été *travaillé*. Ici, la stabilité structurale se traduit sur le matériau et au champ par une aptitude plus ou moins prononcée à la *dispersion*. Elle s'extériorise, en hiver, dans une parcelle drainée par un comportement plus ou moins marqué par *l'excès d'eau*.

1. Un sol apte à évacuer l'eau en excès (Tableau V-1) ...

La stabilité structurale, très variable, est liée à la sodicité et au taux de calcaire.

La mise au point d'un test de dispersion a permis d'évaluer la stabilité puis de classer les échantillons de sols par type de comportement : stable pour ID <= 4, intermédiaire pour 5 <= ID <= 9, instable pour ID >= 10. Dans la population de sols que nous avons étudiée (marais mouillés, marais desséchés), les compositions physique et minéralogique du matériau sont peu variables. On a montré que la sodicité et le taux de calcaire expliquent 82 % de l'Indice de Dispersion, la salinité vient ensuite.

A l'échelle du profil, il existe un gradient d'instabilité structurale avec la profondeur qui se traduit par la relation d'ordre : stabilité structurale de H1 >= H2 >= H3. Cette relation nous a amené à construire 10 profils « types » de 90 cm de profondeur, classés par rapport à

leur degré d'instabilité : Type 1 le plus stable à 10 le plus instable.

La profondeur de la nappe est un indicateur de l'excès d'eau en hiver. Sa valeur, pendant la période saturée (qui se situe le plus fréquemment entre la fin janvier et le début d'avril), mesure à l'échelle de la parcelle l'effet de l'interaction perméabilité du profil de sol x maîtrise de l'eau (isolement hydraulique et mode de drainage). De même, la profondeur de la nappe est un indicateur de la profondeur d'enracinement début montaison. Ces deux variables sont strictement liées ce qui explique une partie de l'effet de l'excès d'eau du profil (profondeur des éléments drainants, profondeur de la zone imperméable) sur le comportement du blé. La profondeur maximum d'enracinement (après la floraison du blé) montre en plus l'effet du déficit climatique au printemps. Enfin, on montre que *la connaissance des types de profils entraîne celle de la profondeur de l'imperméable*.

Ainsi la classification basée sur la stabilité des profils est un outil pour rendre à la fois compte du comportement physique du profil (fonctionnement du drainage, porosité de la couche travaillée), du comportement de la culture de blé (profondeur d'enracinement, élaboration du rendement du blé).

Cependant ***les modalités de travail du sol*** et les quantités d'eau en excès en hiver modulent l'effet de la stabilité sur l'aptitude à évacuer l'eau en excès.

... et à produire.

- ***La combinaison des résultats*** conduit à *une classification des profils pertinente par rapport aux comportements physiques* ***et*** *agronomiques*.

La typologie initiale des 10 profils peut se regrouper en 4 ou 5 cas selon qu'on considère les comportements physiques et agronomiques des sols.

- Cas 1. Les profils types 1 et 2 ont un horizon imperméable au niveau ou au-dessous du drain. La profondeur de nappe est donc inférieure à celle de l'élément drainant. Le milieu n'exprime aucune condition limitante sur les composantes du rendement, avant comme après la montaison. Le potentiel de rendement du blé est donc très élevé.

- Cas 2. Les types (3), 4, 5, 6 ont un horizon imperméable entre 45 et 70 cm. La profondeur de nappe est proche de celle l'élément drainant. Le potentiel de rendement est élevé, le milieu n'exprime aucune condition limitante avant la montaison, il y a peut être une légère limitation dans la transformation de la croissance herbacée en épis et nombre de grains certaines années.

  Dans ces deux cas, la couche travaillée a une stabilité structurale élevée (ID < 4), elle présente un état structural favorable en surface (absence de dispersion) et la porosité de la couche travaillée dépend des modalités de travail du sol. La profondeur de l'enracinement précoce est élevée.

- Cas 3. Les types (7), 8 et 9 ont un horizon imperméable entre 30 et 45 cm. La profondeur de nappe est au-dessus de l'élément drainant. Ici, la profondeur de la nappe est la plus variable ; la couche travaillée a une stabilité intermédiaire (4 < ID < 8), elle présente un état structural très variable en fonction des ITK. Les modalités et conditions de travail du sol (état hydrique), la quantité d'eau en excès en hiver s'ajoutent à la stabilité structurale du matériau pour expliquer l'état structural de la couche travaillée.
- Cas 3a. Si le travail a été fait en condition sèche et les ITK sont favorables (précédent prairies, apport de gypse), alors la profondeur de la zone imperméable est comprise entre 30 et 45 cm, la porosité est plutôt favorable en surface (dispersion faible à nulle) et la porosité de la couche travaillée est élevée. Les conditions de milieu ne manifestent aucun effet limitant sur les composantes du rendement qui s'élaborent avant la montaison. Par contre on note un effet limitant pour les composantes qui s'élaborent après la montaison. C'est le cas des profils de type 8 qui ont un potentiel de production "intermédiaire" et des profils type 9 conduits avec ITK favorables.
- Cas 3b. Si au contraire, les conditions des ITK ne sont pas favorables (modalités de travail du sol défavorables), la zone imperméable est proche du fond du travail du sol, la porosité en surface est faible à nulle (dispersion forte) et toujours faible dans l'horizon travaillé

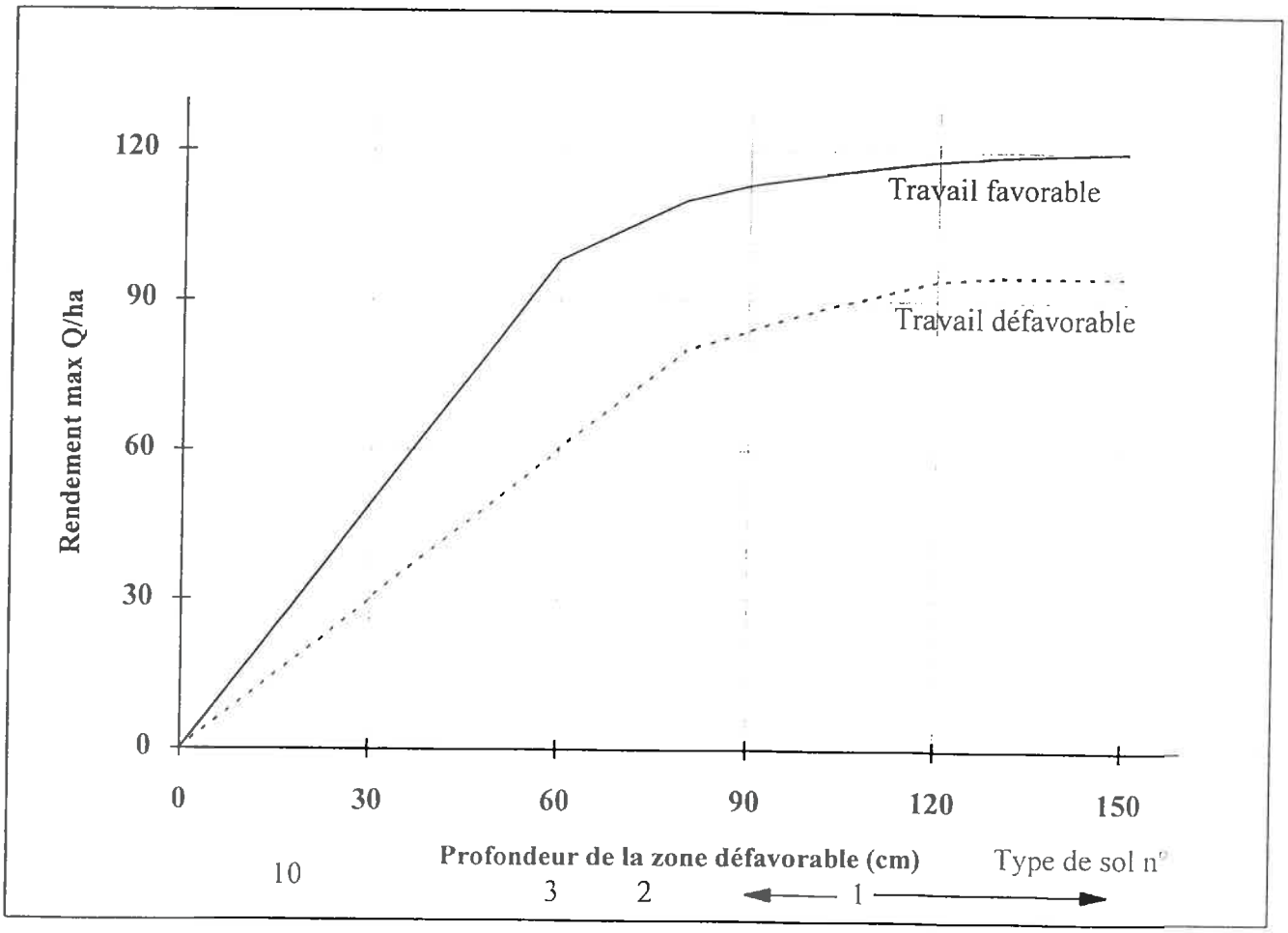


Figure V-1. Rendement maximum du maïs (Q/ha) et profondeur de la zone défavorable (cm). Année 1995.

(note de porosité < 2). Le comportement du sol manifeste un effet limitant sur les valeurs maximum des composantes du rendement qui s'élaborent avant la montaison : NP, MSA2. Le potentiel de production est faible à très faible. C'est le cas des profils de type 9 conduits dans des conditions non optimales.

- Cas 4. Pour les profils type 10, la profondeur de nappe est toujours dans l'horizon travaillé. Dans ce cas, la couche travaillée a une stabilité structurale faible (ID > 9). Elle présente un état structural défavorable (forte dispersion) malgré des modalités de travail du sol favorables. Les conditions de milieu manifestent un fort effet limitant sur les valeurs maximum des composantes du rendement qui s'élaborent avant la montaison : NP, MSA2. Le potentiel de production est très faible.

- Généralisation de la classification à d'autres cultures.

Ces résultats sont-ils inféodés à la seule culture de blé ou peuvent ils être validés par une autre culture ? Pour la production du maïs par exemple, la contrainte essentielle du milieu n'est plus l'excès d'eau en hiver comme pour le blé mais l'alimentation hydrique en été. Les types de sols ont-ils un effet sur l'alimentation hydrique en l'absence d'irrigation ? Le travail fait sur le comportement physique des sols et l'enracinement du blé nous a amené à conclure que *la connaissance des types de profils entraîne celle de la profondeur de l'imperméable.* Mettons encore à l'épreuve cette hypothèse avec la culture du maïs. La figure V-1 illustre la production maximum de maïs sur un réseau de parcelles en fonction de -a- la profondeur de la zone instable et -b- selon les modalités de travail du sol plus ou moins favorables (qui dépendent du précédent). Elle montre que -a- les rendements augmentent avec la profondeur de la zone instable, -b- pour un même type de sol, le tassement de la couche travaillée réduit le rendement maximum. On constate alors que la classification en 10 profils types concernant 90 cm de profondeur est insuffisante pour rendre compte de la fonction de production ; il est nécessaire de tenir compte de la stabilité des horizons plus profonds et donc de différencier les profils de type 1 jusqu'à 1,50 m. On généralise ainsi l'effet type de sol (porosité de la couche travaillée et profondeur de la couche instable) par rapport au rendement du maïs en réalisant une typologie de profils concernant 1,50 m de profondeur. On démontre la pertinence du paramètre « profondeur de la zone instable » pour évaluer à la fois la circulation de l'eau dans

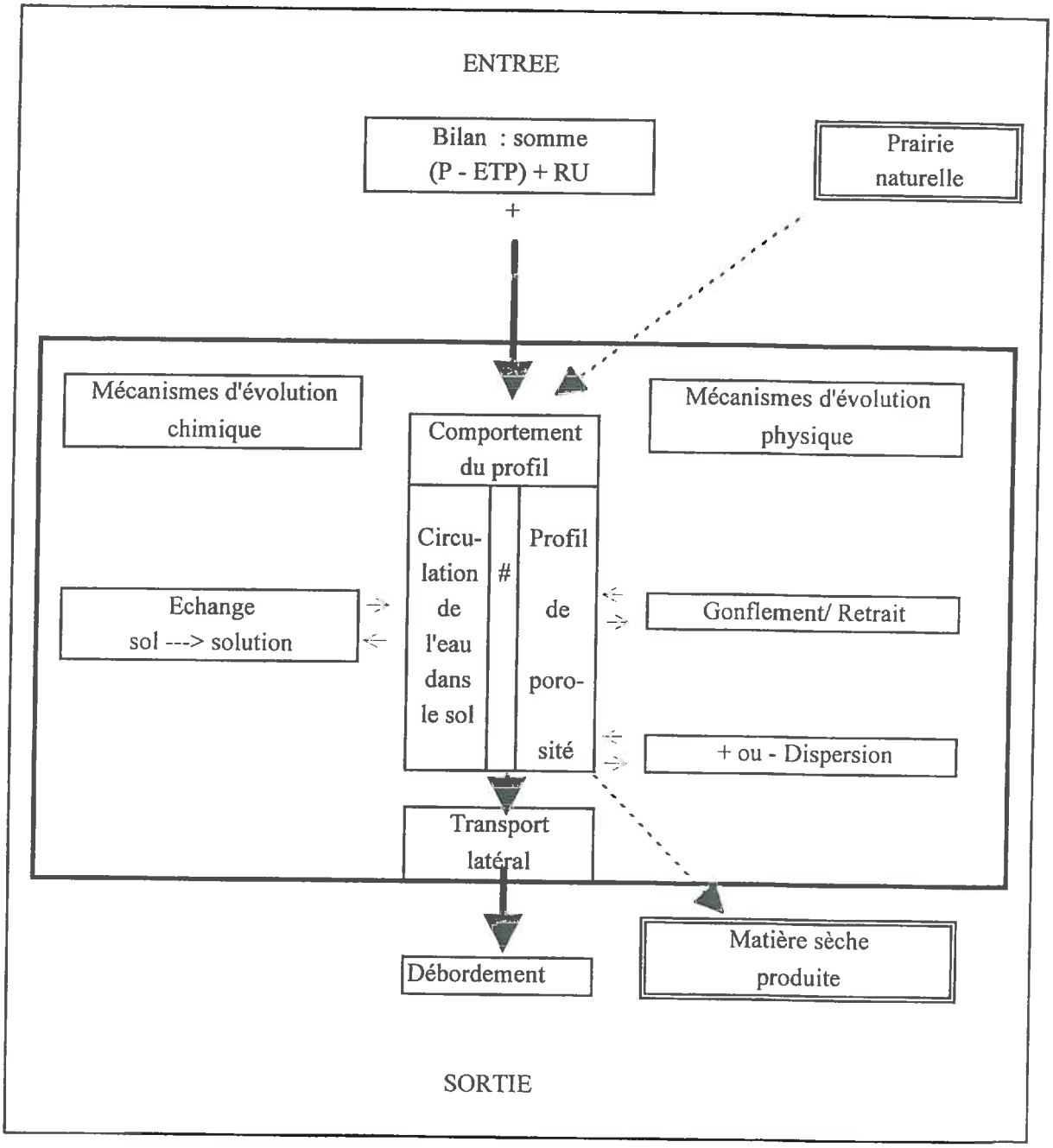


Figure V-2. Mécanismes d'évolution des sols et comportement du profil sous l'effet du bilan hydrique sur prairie naturelle non drainée. Flèches épaisses, tirets : flux d'eau, implication des systèmes de cultures.

le sol, la profondeur d'enracinement, la quantité d'eau utilisable pour l'alimentation hydrique et le potentiel de production.

Cet ensemble de résultats aboutit à une grille de diagnostic pour évaluer -a- l'aptitude des sols à évacuer l'eau en excès, -b- le potentiel des cultures (Tableau V-1). Il se décline aussi en explication et préconisations.

2. La stabilité structurale dans le « système sol » (Figures V-2 et V-3) **...**

Les mécanismes d'évolution communs pour tous les sols de marais étudiés sont les échanges chimiques et le gonflement/retrait. L'agent d'évolution des sols est l'eau. Les entrées du système sont constituées par les précipitations (P) et les sorties par l'évapotranspiration (végétation = ETP + RU) et l'excès d'eau. C'est la valeur du bilan hydrique (P - ETP + RU) qui précise les deux périodes de déficit et d'excès d'eau.

Le comportement du profil du sol est l'expression des mécanismes d'évolution mis en action par l'eau, à savoir la variation des états hydriques (principal mécanisme impliqué gonflement/retrait) et la circulation de l'eau (principal mécanisme impliqué échange chimique). Il peut être décrit soit en creux par un profil de porosité, soit en plein par la circulation de l'eau dans le sol. Les états et comportements décrits dépendent du degré de stabilité structurale du profil.

... en condition peu perturbée par l'homme, ...

La figure V-2 rend compte du ***"système sol" en condition faiblement perturbée*** par l'homme (par exemple la prairie naturelle non drainée). Cette figure déclinée dans la durée peut expliquer l'évolution pédologique des terrains. Il suffit de préciser la quantité et la qualité de l'eau qui rentrent dans le système (inondation, précipitation, eau de mer, saumâtre, douce) et la qualité de l'évacuation de l'eau en excès pour obtenir la gamme des évolutions pédologiques. C'est un système peu ouvert, faiblement évolutif (Tournade, 1993).

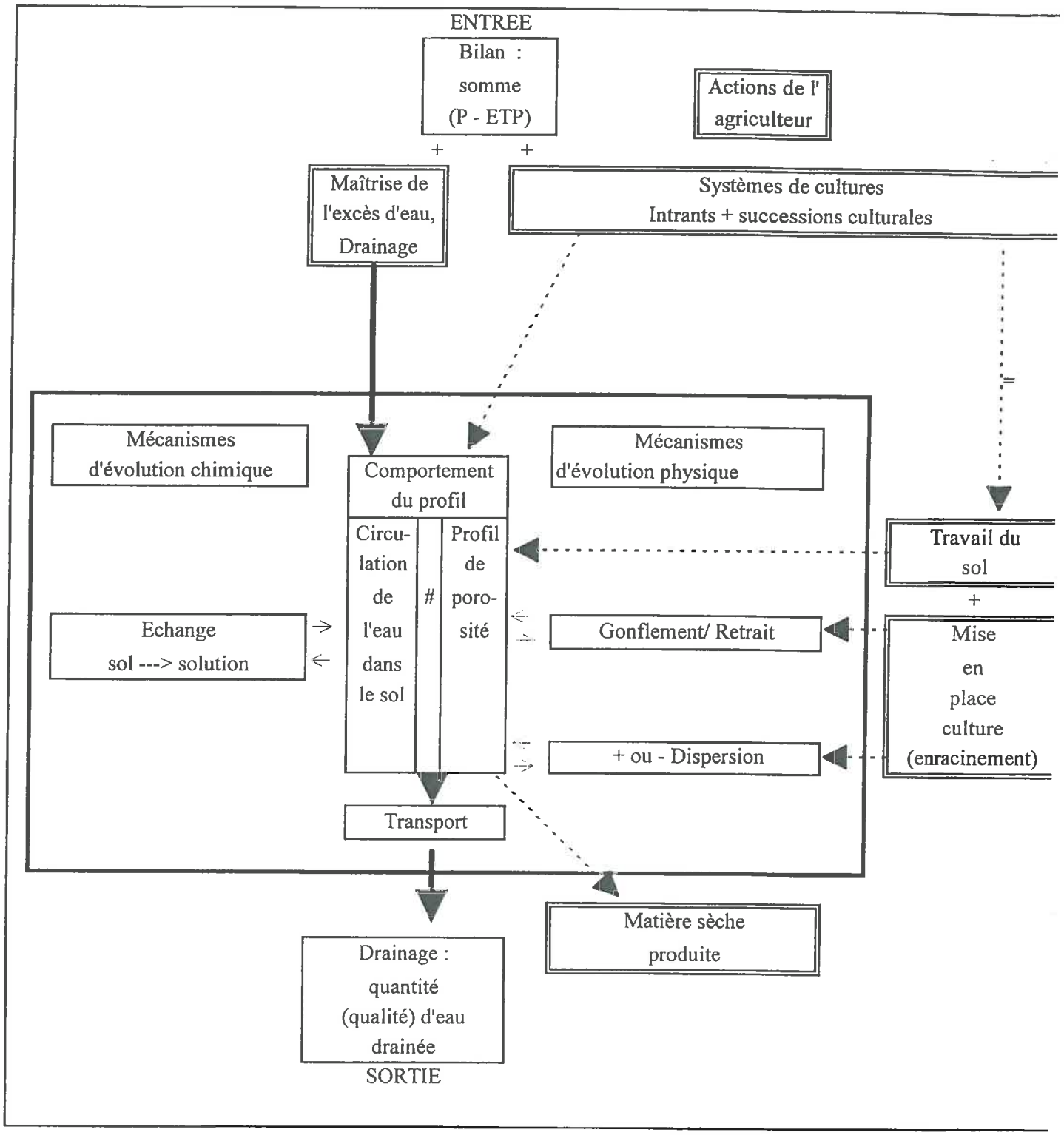


Figure V-3. Mécanismes d'évolution des sols et comportement du profil sous l'effet du bilan hydrique et du drainage et de la mise en culture.
Flèches épaisses, tirets : flux d'eau, implication des systèmes de cultures.

... et lors de la mise en culture est la clé de l'évolution.

L'action de l'homme et plus particulièrement celle de l'agriculteur va s'ajouter à celle du climat pour faire évoluer le "système sol" (Figure V-3). La maîtrise de l'excès d'eau aussi bien à l'échelle du bassin de marais (marais desséchés) qu'à celle de la parcelle (drainage) a déjà un effet remarquable sur la production et l'utilisation de l'herbe (Pons et al., 1990). La mise en culture exige en plus travail du sol, implantation puis successions de cultures. C'est un système ouvert qui a un fort potentiel d'évolution.

3. Les préconisations.

Les connaissances et méthodes tirées de cette recherche permettent de caractériser un sol, de prédire son comportement par rapport aux plantes, et par conséquent de déterminer les caractéristiques favorables ou défavorables des systèmes de cultures (espèces, successions, techniques). Les préconisations concernent le diagnostic du type de sol (Damour et Pons, 1987), le choix des modes de drainage sol (Damour, 1981), les recommandations d'apport de gypse (Damour et al., 1984b). Le choix des systèmes cultures, la prévision des rendements et la conduite azotée du blé (Pons et Damour, 1990) s'en déduisent.

Adapter les systèmes de culture au degré de maîtrise de l'excès d'eau et à la qualité des sols, c'est gérer la fertilité physique des sols.

L'addition des contraintes de

- maîtrise de l'excès d'eau à l'échelle du bassin, à l'échelle de la parcelle,
- comportement physique des profils de sol,
- conditions hydriques lors des interventions culturales

oblige à proposer des systèmes de cultures adaptés.

Dans le cas d'une maîtrise hydraulique aléatoire (absence d'isolement hydraulique et présence de rigoles), la condition limitante est l'excès d'eau hivernal, quelle que soit la qualité du sol la culture est très risquée voire impossible, le système le plus adapté est la prairie conduite de façon plus ou moins extensive selon le degré de contraintes du milieu et les types

Tableau V-2. Adaptation des systèmes de cultures aux aménagements et à la qualité des sols dans le marais desséché.

Dans le double encadrement, le système le plus adapté par type de sol.

Type de drainage :	drains	rigoles
Types de profil de sol		
Instable (type 10)	dysfonctionnement du drainage Cultures inadaptées Rentabilité ?	Prairies intensification possible
Intermédiaire (types 9, 8 et 7)	Dysfonctionnement du drainage possible Cultures risquées Cultures d'automne 4 années sur 5. Tournesol, maïs ensilage risqués	Cultures très risquées Graminées fourragères et cultures d'automne uniquement
Stable (types 6 à 4)	Cultures d'automne 3 à 4 années sur 5. Tournesol, maïs ensilage précoces adaptés.	Idem que drains
(types 1 à 3)	Cultures d'automne et de printemps 1 année sur 2. Tournesol, maïs grain précoce possible	Idem que drain, mais système plus contraignant et aléatoire
(types 1 horizon instable > 120 cm)	Cultures de printemps dominantes Maïs monoculture possible	Idem que drain, mais système plus contraignant et aléatoire

d'animaux (Pons et al., 1990). En effet, s'il y a culture, le choix des cultures ne se fera pas obligatoirement par ce qu'il serait souhaitable de faire pour sauvegarder la porosité des sols, mais par ce qu'il sera possible de faire compte tenu des circonstances. Ce choix souvent forcé aboutit presque toujours à des cultures de printemps avec semis tardif qui entraîne des productions de plus en plus faibles et aléatoires.

Si à l'opposé (Tableau V-2), la maîtrise de l'excès d'eau est forte (isolement hydraulique, drainage), le système de cultures devra s'adapter à la qualité des sols. Sur les sols sodiques (type 10), c'est la prairie (intensifiée) sur rigoles qui sera adaptée. Les cultures même d'hiver seront très risquées voire impossibles puisque malgré des conditions de travail favorables, la couche travaillée aura une porosité faible à très faible, et que le drainage enterré sera rapidement inefficace. Sur les sols intermédiaires notamment types 9 et 8 (7), la pérennité du drainage enterré et la mise en culture est risquée si un ensemble de règles très strictes n'est pas respecté pendant les 10 à 20 premières années : choix de cultures d'hiver, graminées fourragères, travail du sol en condition sèche avant la saturation du profil (semis plutôt précoces) et donc éviter les cultures qui se récoltent en septembre (tournesol), s'interdire la culture de maïs sauf si elle est récoltée dans les premiers jours de septembre (ensilage précoce).

Sur les sols stables type <= 6, il y a pérennité du drainage enterré, la mise en culture est possible avec des risques limités si ce n'est l'adaptation des matériels à ce type de milieu (puissance et solidité pour les outils de travail du sol, faible portance pour les matériels de traitement et de fertilisation). Ici l'exigence d'un travail en condition sèche n'est plus aussi stricte pour assurer une perméabilité du profil. Aussi, on pourra choisir des successions beaucoup plus "souples" à base de cultures d'hiver et de printemps et notamment le maïs grain.

Pour les sols les plus stables types 1 et 2, les règles ne sont plus strictes et on peut aller jusqu'à une monoculture du maïs. Cependant le risque d'une détérioration forte de la fertilité physique du sol pénalise la production du maïs (Figure V-1).

4. L'évolution des profils de sol par l'amélioration de la stabilité structurale

Elle se réalise grâce au phénomène d'échange chimique. La dispersion n'est pas due à un effet seuil de la sodicité du matériau comme le laisse entendre un certain nombre d'écrits. L'étude de la relation ID = f (Na/T) montre plutôt une fonction en « S » qui a une forte croissance entre 4 à 20 % de Na/T selon la richesse en calcaire. La substitution du sodium échangeable par le calcium confère au profil de sol sa stabilité et donc son aptitude à produire. Selon l'aménagement et la gestion des eaux du bassin de marais, le degré de drainage et les systèmes de culture mis en jeu à la parcelle, cette substitution sera plus ou moins complète et concernera une profondeur plus ou moins importante du profil.

Les conditions de l'échange chimique.

L'échange ne pourra se réaliser que s'il existe *une circulation de l'eau dans le sol* c'est-à-dire un gradient de potentiel hydraulique entre les précipitations et l'exutoire à travers le continuum : Précipitation/ Infiltration en surface/ Passage de l'eau en profondeur/ Circulation de l'eau dans le drain/ Reprise par pompage. Ceci veut dire qu'il faut créer de la porosité et la conserver pour faire circuler le plus d'eau, le plus profondément possible. *Travail du sol annuel et sous solage* vont affecter la porosité des horizons de surface jusqu'à 40 cm, *l'activité du système racinaire (profondeur, densité)* celle des horizons plus profonds. Compte tenu de leur stabilité, le continuum n'est pas respecté dans les profils sodiques de type 10 et très difficilement pour les types 9, difficilement pour les types 8 en l'absence de gypse. C'est dans ces deux derniers cas (types 8 et 9) que le travail du sol devient déterminant pour améliorer la perméabilité (ID <= 6). Les règles de travail du sol et de choix des cultures doivent alors être strictement respectées.

L'activité du système racinaire (profondeur, densité) améliore la porosité des horizons non affectés par le travail mécanique.

La profondeur de l'enracinement précoce du blé est liée à celle d'une porosité favorable du sous sol dans une parcelle drainée par drains ; les fortes demandes climatiques du printemps agissent sur la profondeur maximum atteinte. L'activité racinaire en réduisant l'humidité, structure, en le fissurant, le sous sol. Ainsi les différents systèmes racinaires (culture de printemps contre culture d'automne), fasciculés et fins (céréales), fasciculés et

épais (maïs), mixte et adapté à la salinité des sols (tournesol) dessèchent de façons diverses le sous sol (profondeur, densité) ; ils provoquent ainsi une fissuration qui structure favorablement le sous sol pour lui permettre de devenir une future zone d'échange lors des prochaines campagnes.

La compétence de l'agriculteur et le fonctionnement de l'exploitation agricole.

Dans le cas des sols instables et intermédiaires, compte tenu de leur évolution extrêmement rapide dans un sens positif ou négatif d'une part et de l'interaction porosité x système de cultures d'autre part, il faudrait parler de conduites techniques intégrées pour permettre une évolution favorable de ces terrains. La technicité et la compétence de l'agriculteur sont ici particulièrement importantes pour la conduite de ces systèmes (Laporte et al., 1984). Le fonctionnement de l'exploitation agricole notamment le choix des matériels et l'organisation du travail a des conséquences directes sur la réussite ou non de la mise en culture des marais (David et al., 1981 ; Liverato, 1982 ; Ney, 1983 ; Capillon et Tagaux, 1983 et 1984 ; Pellerin, 1984 ; Capillon et Pellerin, 1984).

5. Pronostics : Perspectives sur les nouveaux enjeux de la gestion de l'eau et de la stabilité structurale.

Les figures V-2 et V-3 en montrant la place de la qualité des eaux (quantité x qualité) dans le système sol donnent des éléments d'hypothèses pour l'étude de la qualité de l'eau et de la répercussion du caractère plus humide du milieu dans les Marais de l'Ouest.

La stabilité structurale et la qualité des eaux.

"Les types de débit".

Quantité et qualité de l'eau sont deux caractéristiques liées. Lorsque les débits sont forts, l'eau qui circule ne sollicite pas les mêmes horizons du profil et lorsqu'elle les sollicite, pas de la même manière que les débits faibles (Guiresse et al., 1989). Sachant que la profondeur moyenne de la nappe en hiver représente le plancher de la zone poreuse, on peut classer les débits par rapport à cette valeur, puis par rapport à des débits caractéristiques ayant une certaine occurrence. On peut alors réaliser une typologie des types de circulation de l'eau

dans le sol en étudiant les correspondances profondeur de la nappe/types de débit pour la gamme des sols aménagés.

"Les types d'eau". L'évolution des systèmes de culture.

En croisant les "types de débits" avec les systèmes de cultures pratiqués, on devrait dégager les divers "types d'eau", leur affecter une occurrence et un risque.

Ce qui va déterminer le sens de l'évolution de la qualité de l'eau sera les systèmes de production pratiqués : choix des cultures, niveau d'intrants et évolution de l'état physique du profil. Le maïs semble être la culture « type » qui permette d'étudier en même temps ces différents aspects. En effet, elle est particulièrement sensible à l'état structural du profil (couche travaillée et sous sol) et son cycle estival sollicite fortement la RU. De plus, la tendance est à une augmentation des surfaces au détriment du tournesol compte tenu de l'évolution relative des prix agricoles et des primes d'une part, de la valorisation du maïs par la filière d'autre part (Joulier, 1994). L'augmentation des surfaces dépendra aussi de l'évolution technique (travail du sol, conduite des intrants).

Conséquences d'une gestion plus humide du milieu dans les Marais de l'Ouest.

La question est de savoir si en gérant l'eau de façon particulière au niveau d'îlots cultivés (ici en relevant la nappe), on peut améliorer la qualité de l'eau et renforcer le caractère humide de la région. Les connaissances acquises permettent de discuter d'orientations stratégiques de la gestion de l'eau et de pronostiquer certaines évolutions.

Dans les marais desséchés *deux gestions de l'eau peuvent cohabiter*. Le caractère imperméable du matériau humide permet de compartimenter l'espace en blocs hydrauliques plus ou moins indépendants. Le lagunage est donc une technique possible. Il existe cependant une limite pour maintenir la culture, c'est l'absence de submersion.

La mise en culture a tendance à diminuer les quantités drainées.

Au niveau de la parcelle, le profil de sol montre un degré d'assèchement qu'on peut attribuer à l'interaction des systèmes racinaires (systèmes de cultures) et du bilan climatique. Nous l'avons montré pour la culture de blé d'hiver. Nous pouvons le supposer dans le cas de

cultures de printemps et de cultures pérennes sous réserve qu'il n'y ait pas d'obstacle à l'enracinement. Aussi la reconstitution de la réserve utile est fonction de la qualité des sols, du mode de drainage et des systèmes de culture. Le volant de stockage de l'eau dans le sol (et donc de déstockage de l'eau) peut varier de façon très importante. La conséquence est que le risque d'absence de drainage pour une campagne donnée n'est pas négligeable. Nous l'avons rencontré en 1986/87 (voir Partie III-A) derrière certaines cultures (tournesol notamment). C'est ainsi que la probabilité d'avoir une quantité drainée inférieure à 100 mm passe de 0 à 1 année sur deux lorsque la saturation du profil est atteinte après 70 mm (enracinement à 0,60 m, prairie naturelle par exemple) de pluies efficaces contre 240 mm (enracinement à 2 m, luzerne par exemple) (Annexe I).

6. Etudier les effets de la stabilité structurale sur le fonctionnement du sol c'est étudier un système complexe.

Pour résoudre cette difficulté, on a utilisé plusieurs méthodes : stratification du milieu par rapport aux conditions limitantes (typologie de milieu), choix de situations représentatives de la gamme de variation de la typologie (situations de références), choix de la période d'étude (période saturée), mise au point d'indicateurs rendant compte de la variabilité du milieu.

L'Indice de Dispersion et la profondeur de la nappe en hiver sont deux indicateurs qui unifient les trois ensembles de résultats : stabilité structurale du matériau, comportement physique du profil en hiver et comportement d'une culture de blé. Ces indicateurs peuvent être rattachés aux éléments de connaissance dont nous disposons. L'ID est lié fortement à la composition chimique des sols mais très faiblement aux mesures "classiques" de l'instabilité structurale (K, Is). La profondeur de nappe dépend du mode de drainage et de l'Indice de Dispersion (l'état chimique) ; sa valeur rend compte de l'état structural du profil et donc du potentiel physique de production du sol. Ces deux indicateurs sont nouveaux et pertinents par rapport à l'étude du comportement des plantes en condition d'excès d'eau.

Cependant, outre les compétences qu'ils doivent mobiliser, les éléments de connaissance s'ils doivent être mis en oeuvre systématiquement coûtent chers. De plus ils ne

s'adaptent pas toujours aux conditions de milieu. C'est ainsi que les analyses chimiques ont dû faire l'objet de mise au point spéciale (Laboratoire de la Chambre d'Agriculture de la Rochelle) pour évaluer de façon cohérente CEC et sels échangeables (annexe II-1). L'interprétation des analyses chimiques et des descriptions structurales présentent des difficultés. La relation ID = f(Na/T, CaCO3) en est un exemple. De même, la description structurale des profils et la correspondance avec le caractère imperméable des sous sols en est un autre. Les indicateurs proposés sont donc en retour des outils (au sens d'intermédiaires) pour mieux préciser les relations entre facteurs, conditions et effets. Ils permettent aussi de donner des valeurs (des bornes) au domaine de validité des relations.

Enfin ces indicateurs sont des ponts entre les domaines d'étude différents que sont les sciences du sol, l'hydraulique des nappes, l'agronomie. La profondeur de la nappe en hiver peut être considérée comme l'interface entre comportement physique du profil, biologie du système racinaire et modalités de circulation de l'eau dans le sol. La note d'état de surface est le pont entre propriété physique du matériau et fonctionnement du peuplement végétal.
Enfin ce sont des indicateurs de terrain faciles à mettre en oeuvre aussi bien par les conseillers agricoles que par les agriculteurs. Ils sont alors la clé d'entrée des préconisations techniques aux agriculteurs : potentiel de production, choix des cultures et des successions culturales, modalités de travail du sol, choix des outils, nombre de passages, fertilisation, réduction d'intrants possible.

Bibliographie

ARMSTRONG A. S. B., HUGHES E.J., RYCROFT D.J., TANTON T.W., PEARCE G.R., ABBOTT C. L., 1996. Reclamation of saline clay soils. A manuel of the horizontal leaching technique. University of Southampton and HR Wallingford, 65p.

AUBRY C., LATIRI-SOUKI K., DORE T., GRINER C., 1994. Diagnostic des facteurs limitants du rendement du blé dur en parcelles d'agriculteurs dans une petite région semi-aride en Tunisie. Agronomie 14, 213-227.

AZIB M., 1989. Etude de l'évolution, de la genèse et du comportement de sols argileux salés, d'origine sédimentaire (Marais de l'Ouest). Aspect morphologique, géochimique et hydrique. Thèse E.N.S.A - I.N.R.A. Rennes, 141 p.

BALDY, C., 1973. Progrès récents concernant l'étude du système racinaire du blé. Annales agronomiques, 24(2), 241 - 276.

BELFORD R.K., 1981 Response of winter wheat to prolonged waterlogging under outdoor conditions. J. Agri. Sci. Camb 97, p 557-568.

BILLAUD J.P., 1980. Aménagement de l'espace et reproduction des sociétés locales. les cas du Marais Poitevin vendéen. Thèse doctorat 3 ème cycle, Univ. Paris X - Nanterre, 355 p + annexes.

BOIFFIN J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action de la pluie. Thèse Doct. Ing. INA-PG, Paris, 320 p.

BOIFFIN, J., CANEILL, J., MEYNARD, J.M. ET SEBILLOTTE, M., 1981. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne Crayeuse. Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. Agronomie, 1(7), 549-558.

BOIFFIN J., MONNIER G., 1982. Etats, propriétés et comportements des sols : recherche et utilisation des critères de fertilité physique. Bull. Tech. Infor. Minis. Agric. Fr., N° 370-372, 401-407.

BOUTIN R.J., 1976. Dessèchement et exploitation agricole des Marais de Rochefort (1606 - 1970). Etude d'histoire locale. Doc. dactylographié, Breuil-Magné, 64 p.

BRESSON L-M, BOIFFIN J., 1990. Morphological caractérisation of soil crust development stages on an experimental field. Geoderma, 47, 301-325.

CALLOT, G., FAVROT, J.C., 1965. Etude pédologique des marais du Médoc. Document SES Montpellier. INRA. n° 34, 117p.

CANNELL R.Q., 1984. Effect of waterlogging and drought on winter wheat and winter barley grown on a clay and a sandy loam soil. 1) Crop Growth and Yield, Plant and Soil 80, p 53 - 66.

CANNELL R.Q., BELFORD R.K., BLACKWELL P.S., THOMSON R.J., 1980. Effect of waterlogging at different stages of development on the growth and yield of winter wheat. J. Sci. Food Agric. 31, p 117-132.

CANNELL R.Q., BELFORD R.K., BLACKWELL P.S., GOVI G., THOMSON R..J., 1985. Effects of waterlogging on soil aeration and on root and shoot growth and yield of winter oats. Plant and Soil 85, p 361-373.

CAPILLON A., DAMOUR L., 1982. Drainage, mise en valeur de Marais de l'Ouest et critères de jugement des terres. Bull. Tech. Infor. Minis. Agric. Fr., N° 370-372, 577-582.

CAPILLON A., TAGAUX M-J., 1983. Typologie des exploitations agricoles du Marais Poitevin de Vendée. Trajectoires d'évolution et contraintes du milieu. C. R. Acad. Agric. FR., Séance du 5 avril, pp 695-604.

CAPILLON A., PELLERIN S., 1984. La maîtrise du travail du sol en Marais Poitevin : nouveau point clé de la conduite des exploitations agricoles. Bull. Tech. Infor. Minis. Agric. Fr., n° 389, pp 175-184.

CAPILLON A., TAGAUX M-J., 1984. Evolution récente et diversité des exploitations agricoles du Marais Poitevin de Vendée. Bull. Tech. Infor. Minis. Agric. Fr., n° 389, pp 205-218.

CAPILLON A., DAVID G., 1993. Gestion agricole de l'espace et environnement : OGAF-Environnement et types d'exploitations en Marais poitevin des Deux-Sèvres. Cahiers d'Agriculture, 2, 116-130.

CAVAZZA L., ROSSI PISA P., 1987. Crop yield as affected by water table and waterlogging duration. Proceeding Symposium Agrohydrology, Wageningen, The Netherlands.

CHEVALLIER, C., PONS, Y., CHEVERRY, C., 1984. Etude pédologique du polder de Moëze-Brouage. Premières étapes des transformations structurales et géochimiques du polder. Doc. multigr. INRA-SAD. 110 p.

CHEVALLIER C., MASSON D., 1988. Agriculture, conchyliculture et circulation des eaux de surface en Charente Maritime. Aqua revue, 21 : 27-33.

CHEVALLIER C., TURPAUD Y., 1996. Controled drainage and water quallity in sodic soil. In proceeding « Drainage and the environment », ICID, Ljubljana, Slovenia, pp 105-112.

CHEVERRY C., 1974. Contribution à l'étude pédologique des polders du Lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride, dans des sédiments argileux et organiques. Thèse d'Etat Univ. de Strasbourg, 275 p.

CHEVERRY C., BOURRIE G., 1996. La salinisation des sols. In « Sols : interfaces fragiles ». Coédition INRA/ Nathan. (à paraître).

COLLAS, P., 1983. Contribution à l'étude du drainage des sols des marais de l'Ouest. Etude du CEMAGREF n° 504. 80p.

COLLAS, P., 1985. Le drainage des sols lourds plus ou moins sodiques des marais de l'Ouest de la France. Institut National Polytechnique, Toulouse. Thèse Docteur-Ingénieur. 217 p.

COLLAS, P., DAMOUR, L., PONS Y., 1984. Types de sol et dynamique de l'eau. Incidence sur la mise en valeur des Marais de l'Ouest. Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture, 12(70), 1577-1586.

COLLAS P., TIERCELIN J-R., 1988. Quantification des effets de l'excès d'eau en termes de jours disponibles. Colloque "Conduite des céréales en conditions d'excès d'eau". Perpectives Agricoles N° hors série, pp 23-28.

COLLECTIF, 1980. Les Marais de l'Ouest. Etude des conditions et des conséquences de l'adoption des techniques d'assainissement agricole dans un réseau d'exploitations de référence. Rapport DGRST-INRA-SAD (Unité INA-PG), 172 pp. + annexes.

CONCARET J., 1988. Amélioration de l'état structural des sols par la gypse. Colloque "Conduite des céréales en conditions d'excès d'eau". Perpectives Agricoles N° hors série, pp 60-62.

CONCARET J., GUYOT J., PERREY C., 1976. Circulation dans les sols de l'eau excédentaire. Conséquences sur la technologie du drainage. INRA Science du sol. Dijon, 82 p.

DAMOUR L., 1981. Application du drainage dans les Marais du Centre Ouest atlantique. In Drainage agricole, théorie et pratique. Chambre d'Agriculture de Bourgogne, Dijon, 445-470.

DAMOUR L., CAMUS P., GARREAU J., LESAGE B., MEDION H., 1972. Etude de trois systèmes d'assainissement dans les Marais de l'Ouest. B.T.I n° 273-274, 1005-1018.

DAMOUR L., PONS Y., 1979. Les Marais de l'Ouest et les aspects agronomiques de l'après drainage. Revue "Drainage", (19-20), 31-34, 1979.

DAMOUR L., CAMUS P., LAFON E., 1984 a. Régimes de drainage dans les sols argileux salés et sodiques des Marais de l'Ouest. Colloque « Fonctionnement hydrique et comportement des sols », Dijon, AFES, 283-393.

DAMOUR L., PONS Y., LESAGE B., 1984 b. Les composés soufrés dans l'amélioration des sols argileux des Marais du Centre Ouest Atlantique français. Séminaire "Les composés soufrés en agriculture", 12 p. Madrid, Sept. 1984.

DAMOUR L., PONS Y., 1987. Attention... un marais peut en cacher un autre. Brochure INRA-DRSAD, St Laurent de la Prée, Chambres d'agriculture et DDAF de Loire Atlantique, Vendée, Deux Sèvres, Charente Maritime, Gironde et Ministère de l'Agriculture, 12 p.

DAVID G., PELLERIN S., PIERRE-JEAN L., 1981. Analyse des itinéraires techniques des exploitations du Marais Poitevin. Mémoire fin d'étude INA-PG, Chaire d'Agronomie, 65 pp + Annexes.

DENBY-WILKES V., 1976. L'intensification des productions végétales en terre de marais. Assainissement, techniques et successions culturales. Mémoire de fin d'études ENSSAA.

DUCHAUFOUR P., 1977. Pédologie. 1- Pédogenèse et classification. Masson, Paris, 477 p.

DUCLOUX J., 1989. Notice explicative de la carte pédologique de Fontenay-le-Comte (C-14). Service d'étude des sols, Orléans, INRA, 204 p.

DUPUIS, J, DUTREUIL J-P., JAMBU P., 1965. Observations sur quelques sols récents du littoral poitevin Science du Sol, 2, pp 173 - 188.

DUPUIS J., NIJS R., SALIN R., FOURNIER B., 1969. Etude pédologique du Marais Poitevin. Faculté des Sciences, Poitiers, Laboratoire de Pédologie. Tome 1, 208 p, Tome 2, 144 p.

ELLIS, F.B., BARNES, B.T., 1980. Growth and development of root systems of winter cereals grown after different tillage method including direct drilling. Plant and Soil 55, 283-295.

EMERSON, W.W., 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. Aust. J. Soil Res., 5, 47 - 57.

FEODOROFF A., 1960. Evaluation de la stabilité structurale d'un sol (indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. Ann. agron., 18, 65 - 90.

FLEURY A., LIMOUX F., 1987. Comment la comparaison globale de nombreux essais a pu conduire à des références régionales pour le blé en Lorraine ? Bull. Tech. Inf., N° 417 : 95-110.

GARNIER, D., 1975. Contribution à l'étude de la pédogenèse récente : les sols sur argile à Scrobiculaires du Marais Poitevin. Université de Poitiers. Thèse de Géologie, 91 p.

GARREAU J., 1976. La reprise des terres lourdes au printemps. L'expérience des marais de l'Ouest. Revue "Entreprises Agricoles" n° 76, pp 66-68.

GARREAU J., JEANNIN B., 1975. La simplification des techniques de travail du sol. Etude S.E.I. n° 59.

GAUTRONNEAU Y., MANICHON H., 1987. Guide méthodique du profil cultural. GEARA/CEREF, Lyon.

GRAS R., 1961. Relation entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pommier dans la Sarthe. Ann. agron., 12.

GREENLAND D.J., OADES, J.M., SHERWIN, T.W., 1968. J. Soil Sci., 19, 123-126.

GREENLAND, D.J., RIMMER, D., PAYNE, D., 1975. Determination of the structural stability class of english and welsh soils, using a water coherence test. J. Soil Sci. 26 (n°3).

GREGORY, P.J., MC GOWAN M., BISCOE, P.U. ET HUNTER, B. 1978. Water relations of whinter wheat : I- Growth of the root system. J. Agric. Sci. Camb. 91, 91-102.

GUIRESSE M., COLLAS P., BOURGEAT F., CHOSSAT J.C., 1989. Relation entre la conductivité hydraulique de sols drainés et leurs caractéristiques pédologiques. Science du sol, vol. 27, 3, pp. 257-279.

GUYOT J., DELMAS A.B., JACQUIN M., 1984. Amélioration de la structure de sols non salés par le gypse. Colloque "Fonctionnement hydrique et comportement des sols" A.F.E.S, Dijon pp 369-376.

HALITIM, A., ROBERT M., BERRIER, J., 1983. Etude expérimentale de l'interaction de la calcite et du gypse avec la montmorillonite : conséquences sur le rôle de ces minéraux dans le comportement de matériaux argileux et l'amendement des sols. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 296, série II, 1459-1464.

HALITIM A., ROBERT M., TESSIER D., PROST R., 1984. Influence des cations échangeables (Na, Ca, Mg) et de la concentration saline sur le comportement physique (rétention en eau, conductivité hydraulique) de la montmorillonite. Agron. 4, 5, p 129 - 145.

HEBERT J., 1969. La fumure azotée du blé d'hiver. Bull. Tech. Infor., 244, p 755-66.

HENIN S., 1977. Cours de physique du sol (2 tomes). O.R.S.T.O.M., E.D.I.T.E.S.T.

HENIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. Ann. agron., 9 (1), 73-92.

HENIN S., MONNIER G., HUTTER W., 1963. Etude sur la mise en valeur des Marais de l'Ouest. SARV, Etude N° 7.

HENIN S., GRAS, R., MONNIER G., 1969. Le profil cultural. Principes de physique du sol. Masson, Paris. 332 p.

INRA-SEI St Laurent de la Prée, 1969. Domaine de St Laurent de la Prée. Programme expérimental. Premiers résultats. INRA-SEI St Laurent de la Prée, Doc. Ronéo, 127 pp.

JOULIE I., 1994. Exploitations agricoles et territoire. Les exploitations céréalières des Marais de l'Ouest face à la crise agricole. Typologie et zonation. Mémoire de fin d'étude INA P-G, INRA-DRSAD Saint Laurent de la Prée, 78 pp.

KERNEIS E., HAVET A., BAR - OR D., 1995. Prairie humide de marais et systèmes d'élevage extensifs. Typologie de fonctionnement des exploitations, caractérisation floristique, écologique et fourragère des prairies naturelles humides. INRA-SAD St Laurent de la Prée, Rapport contrat FIDAR-FIQV/INRA, 198 p.

KING D., 1984. Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du Marais de Rochefort. Thèse Docteur-Ingénieur "Géologie appliquée". INA P-G.

LAFOND R., VERGER F., 1965. Minéralogie des argiles du littoral et des rivières du marais poitevin. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 260. Groupe 9.

LAPORTE C., DAMOUR L., PONS Y., CAPILLON A., 1984. Introduction des techniques d'assainissement dans les exploitations agricoles des Marais de l'Ouest. Contrat DGRST. INRA-DRSAD, 73 p.

LATIRI-SOUKI, K, AUBRY C , DORE T, SEBILLOTTE M, 1992. Elaboration du rendement du blé dur en conditions semi-arides en Tunisie : relations entre composantes du rendement sous différents régimes de nutrition azotée et hydrique. Agronomie 12 (1), 31-43.

LE BISSONNAIS Y., 1988. Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse de doctorat, Univ. d'Orléans, 225p.

LE BISSONNAIS Y., LE SOUDER C., 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Etude et Gestion des Sols, 2, 1, 43-56.

LETERME P., MANICHON H., ROGER-ESTRADE J., 1994. Analyse intégrée des rendements du blé tendre et de leurs causes de variation dans un réseau de parcelles d'agriculteurs du Thymerais. Agronomie, 14, 341-361.

LIVERATO J.M., 1982. Approche d'une agriculture régionale : Analyse de problèmes posés par la mise en culture du Marais Poitevin, à travers la compréhension des calendriers de travaux. Rapport de stage, INA-PG, Chaire d'Agronomie.

LOVEDAY J., PYLE J., 1973. The Emerson dispersion test and its relationship to hydraulic conductivity. CSIRO, Division of soils Technical Paper n° 15.

MANICHON H., 1982a. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse de Doct. Ing. INA-PG, 214 p. + annexes.

MANICHON H., 1982b. L'action des outils sur le sol : appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. Sci. Sol, 3, 203-219.

MANICHON H., 1988. Compactage, décompactage du sol et systèmes de culture. Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture, 74, n°1, 43-54.

MANICHON H., ROGER-ESTRADE J., 1990. Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. In "Les systèmes de culture". Coll. « Un point sur ... », INRA Paris, 27-56.

MASLE-MEYNARD J., 1980. L'élaboration du nombre d'épis chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière. Thèse de Docteur-Ingénieur, INA-PG, Paris, 274 pp.

MASSE J., CAPY Y., 1988. Excès d'eau et élaboration du rendement des céréales. Colloque "Conduite des céréales en conditions d'excès d'eau". Perpectives Agricoles N° hors série, pp 29-39.

MEYNARD J.M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse de Docteur-Ingénieur, INA-PG, Paris, 297 pp.

MEYNARD J.M., 1987. L'analyse de l'élaboration du rendement des céréales sur les essais de fertilisation azotée. Perspectives Agricoles, N° 115, 76-83.

MEYNARD J-M., AUBRY C., 1988. Itinéraires techniques pour le blé en conditions d'excès d'eau. Colloque "Conduite des céréales en conditions d'excès d'eau". Perpectives Agricoles N° hors série, pp 70-79.

MEYNARD J.M., DAVID G., 1992. Diagnostic de l'élaboration du rendement des cultures. Cahiers d'Agricultures. 1 : 9-19.

MIATKOWSKI Z., 1993. Circulation de l'eau dans les sols lourds. Rapport interne INRA St Laurent de la Prée/ CEMAGREF, 40 p.

MINGEAU, 1973. Evolution de quelques caractéristiques physiques et chimique de l'argile en place et des remblais de drainage. Doc. dact. INRA Châteauroux.

MONNIER, G., STENGEL, P., 1982. La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. BTI n° 370-372, 503 - 512.

MORIZET, J., DEJOU, J., GUYOT, J., 1970. Principales caractéristiques physico-chimiques des sols de types vertique et sodique dans le marais rochefortais à Saint Laurent de la Prée (Charente Maritime). Bull. AFES, Science du Sol. 5, 11-24.

NEY B., 1983. Etude de l'organisation des chantiers de récolte de paille dans 10 exploitations du Marais Poitevin de Vendée. Rapport de stage, INRA-Chaire d'Agronomie INA P-G.

NIJS R., 1968. Contribution à l'étude des sols du Marais Poitevin. Thèse Doc. Univ., Fac. Sci. Poitiers, 1 Fac. Ronéo. 208p.

PAPY F., 1988. Problèmes de praticabilité dus à l'excès d'eau : conséquences sur la conduite des cultures de blé et de maïs. Colloque "Conduite des céréales en conditions d'excès d'eau". Perpectives Agricoles N° hors série, pp 40-46.

PELLERIN S., 1984. Etude des pratiques de travail du sol dans les exploitations du Marais poitevin. Thèse de Doct. Ing. INA-PG, 165 p. + annexes.

PELLERIN S., 1986. Effet de la date de labour sur l'état structural de l'horizon labouré dans les sols argileux gonflants du Marais poitevin. Agronomie, 6 (7), 683-692.

PERICHON C., 1994. Une mesure agri-environnementale à l'épreuve de la diversité sur un territoire continu. Cahiers d'Agriculture, 3, 163-169.

PERIGAUD S., 1963. Mise en valeur des sols de la Brenne. Ann. agron., 14 (2).

PERON F., 1986. Contribution à la modélisation du stade épi 1 cm de 3 variétés de blé tendre. Mémoire de fin d'étude, ENITA DIJON - ITCF, 30p.

PONS, Y., 1980. Un élément de diagnostic du fonctionnement de divers modes de drainage : les mesures piézométriques. Doc. photocopié, INRA St Laurent de la Prée, mai 1980, 19p.

PONS, Y., 1983. Le test d'Emerson, utilisation par un agronome. Doc. photocop. INRA-SAD, St Laurent de la Prée. 47 p.

PONS Y., 1985. Incidence de l'abaissement du niveau d'eau hivernal sur le rendement du blé dans les Marais de l'Ouest. In "Conditions et effets des excès d'eau en agriculture". Séminaire Commission Agrométéorologie de l'INRA, pp 123 - 130. ?

PONS, Y., 1988. Effect of watertable on yield and root depth of winter wheat in the French West Central Atlantic Marshlands. Agricultural Water Management, 14, 35-42.

PONS Y., MEDION H., 1980. Les caractéristiques climatiques des Marais de l'Ouest. Variations dans l'espace. INRA-DRSAD St Laurent de la Prée, 23 p.

PONS Y., MARTINEAU G., 1983. Description d'un test de comportement à l'eau pour déterminer la classe de stabilité structurale des sols argileux des marais de l'Ouest. INRA-DRSAD, Domaine Expérimental de St Laurent de la Prée. 16 pp.

PONS, Y., GUY, R., GRIMPRET, C., CHATAIGNER C., 1987. Déterminer le potentiel de rendement d'une culture de blé dans le marais. Observer pour mieux gérer. L'Estuaire Agricole n° Spécial "Agronomie". Association des Groupements cantonaux de Développement Agricole de la région de Rochefort-Marennes. 55 p.

PONS, Y., LEMAIRE G., LAFON E., SALETTE J., 1989. Intensification des prairies dans les Marais de l'Ouest. II- Nutrition N, P, K et production : méthodes de diagnostic. Fourrages, 120, 367 -381.

PONS, Y., CAPILLON, A., DAMOUR L., LAFON E., 1990. Intensification des prairies des Marais de l'Ouest. III- Propositions pour l'amélioration de leur conduite. Fourrages 122, 119-138.

PONS Y., DAMOUR L., 1990. Besoin en azote et pratiques culturales. Un exemple : le blé dans les Marais de l'Ouest, Journée d'étude « Hydraulique Agricole et Environnement », La Rochelle, AFEID, AFGR-SNED, CEMAGREF, 75-81, 1992.

PONS Y., LESAGE B., CHATAIGNER C., DAMOUR L., 1991. Effet d'un travail du sol profond sur l'évolution de la nappe en hiver. In "Drainage des sols lourds". Colloque franco-polonais, INRA, IMUZ, CEMAGREF, pp 227 - 239.

QUIRK J.P., 1979. Some physico-chimcal aspects of soil structural stability. A review. in « Modification of soil structure » edited by W.W. Emerson, R.D. Bond, A.R. DEXTER. John Wiley & Sons, 3-16.

QUIRK, J.P., SCHOFIELD R.K., 1955. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. J. Soil Sci. 6, 163-178.

RACAULT Y., CHEVALLIER C., COLLAS P., 1990. Drainage et qualité des eaux dans les marais du littoral atlantique français. Actes du 14 ème congrès international des irrigations et du drainage. Vol. IA : 381-394.

RICHARDS, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Depart. Agric., Washington, Agricultural Handbook n° 60, 160 p.

SALIN, R. 1983. Etude pédologique dans le marais de Rochefort. INRA, Paris. 200 p. Cartes 1:25000.

SEBILLOTTE M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture, 64(11), 906-914.

SEBILLOTTE M., 1980. An analysis of yield elaboration in wheat. In : Wheat technical monograph. Bâle : doc CIBA-GEIGY : 25-32.

SEBILLOTTE M., 1988. Raisonnement des itinéraires techniques par objectifs de rendement : intérêt de l'agrobiologie. Perspectives Agricoles, n° 129, oct. 1988, 7-16.

SERVANT J., 1975. Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France. Thèse docteur ès-science INRA - ENSA Montpellier, 194 p. + annexes 106 p.

SHAINBERG I.., RHOADES J.D., PRATHER R.J., 1980. Effect of low electrolyte concentration on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soil. Soil Sc. Soc. Am. J., 45, 273-277.

SHAINBERG I.., RHOADES J.D., SUAREZ J.D., PRATHER R.J., 1981. Effect of mineral weathering on clay dispersion and hydraulic conductivity of a sodic soils. Soil Sc. Soc. Am. J., 45, 287 - 291.

SNEGAROFF J., 1981. La pollution de l'eau par les herbicides dans le cadre de l'aménagement du marais charentais. Phytiatrie, Phytopharmacie 30, 115-126.

STEYAERT P., CHEVALLIER C., PONS Y., 1995. Drainage et environnement dans les Marais de l'Ouest. Géomètre N° 7, 46 - 48.

STUDER R., CHAUMONT C., PESSAUD, J.F., 1980. La fertilité chimique des terres des Marais de l'Ouest. Applications à la conduite de la fumure minérale N, P, K. INRA, Station d'agronomie Châteauroux 27 p.

TALUREAU R., 1965. Marais de l'Ouest. Ministère de l'agriculture, Direction générale du Génie Rural et de l'Hydraulique agricole, N°mes. 182 p.

TARDIEU F., 1984. Etude au champ de l'enracinement du maïs. Influence de l'état structural sur la répartition des racines. Conséquences sur l'alimentation hydrique. Thèse Docteur-Ingénieur. INA-PG, Paris, 232 p. + annexes.

TESSIER D., 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessication et de la réhumectation. Thèse Dr. d'Etat, Univ. Paris VII, I.N.R.A. Versailles éd., p 361.

TESSIER D., PEDRO G., 1980. Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 291, N° 5, pp 461-464.

TOULGOAT, E., 1983. Influence de divers éléments chimiques sur le comportement physique des sols des marais de l'Ouest. ENITA, Bordeaux. Mémoire de fin d'étude. 44 p.

TOURNADE F., 1993. Les prairies humides communales du Marais Poitevin. Organisation, fonctionnement et genèse d'un agro-écosystème. Thèse Doct. ENSA Rennes, 217 p.

TRAFFORD B.D., OLIPHANT J.M., 1977. The effect of different drainage systems on soil conditions and crop yield on a heavy clay soil. Expl. Husb. 32 : 75 - 85.

VAN BEEKOM C.W.C., VAN DEN BERG C., DE BOER T.A., VAN DER MOLEN W.H., VERHOEVEN B., WESTERHOF J.J., ZUUR A.J., 1953. Reclaming land flooded with salt water. Nether. Journ. of agric. Science. Vol 1 n°4.

VAN HOORN J.V., 1958. Results of a ground water level experimental field with arable crops on clay soil. Netherlands Journal of Agricultural Science 6, 1 - 10.

VERGER F., 1968. Marais et wadden du littoral français. Etude de la géomorphologie. Biscaye, Bordeaux. 544 p.

WEAVER, J.E., 1926. root development of field crops. New York and London : Mc Graw - Hill.

WELBANK, P.J., GIBB, M.J., TAYLOR, P.J. ET WILLIAMS, E.D., 1973. Root growth of cereal crops. Report Rothamsted Expl. Sta. 1973, 1974, Part. 2, 26-66.

WILBERT J., 1978. Notice explicative de la carte pédologique de Lesparre (G-17). Service d'étude des sols, INRA, 220 p.