

Institut National Agronomique  
PARIS-GRIGNON

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



# 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

#### « ANNEXES »

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

# SOMMAIRE

Annexe I. Caractéristiques du bilan climatique. Conséquences sur l'état hydrique du sol. Etude fréquentielle.

Annexe II-1. Dosage des éléments chimiques en sols de Marais. Toulgoat (1983)

Annexe II-2. Principaux résultats de l'ACP pour les échantillons de l'horizon H1 (0-30 cm).

Annexe II-3. Principaux résultats de l'ACP pour les échantillons des horizons H1, H2, H3.

Annexe II-4. La relation  $ID = f(Na/T)$  selon le taux de  $CaCO_3$  et la salinité.

Annexe II-5. La liaison ID avec K et Is.

Annexe III-1. Formes de nappe en période saturée.

Annexe III-2. Profondeur de nappes et profondeur de drains selon les types de sol.

Annexe III-3. Les modalités de travail du sol dans chaque parcelle.

Annexe III-4. Dispositif pour l'étude de l'effet des types de sol et du travail du sol sur la porosité de la couche travaillée.

Annexe III-5. Démarche pour le pronostic de la porosité de la couche travaillée.

Annexe III-6. Description des états structuraux, note de porosité, enracinement et note d'enracinement.

Annexe III-7. Les porosités observées en fin d'hiver. Effets des modalités de travail du sol et de la stabilité structurale.

Annexe IV-1. Modèles et relations établis sur blé (Meynard, 1985, Lariri-Souki et al., 1992)

Annexe IV-2. Les conditions climatiques et élaboration du rendement.

Annexe IV-3. Analyse des conditions et du taux de levée.

Annexe IV-4. Effet des types de sol sur la croissance et le développement précoce.

## Annexe I

### Caractéristiques du bilan climatique. Conséquences sur l'état hydrique du sol. Etude fréquentielle.

#### 1- Introduction.

L'étude du matériau montre une forte différenciation des sols vis-à-vis de la dispersion des argiles. Nous caractérisons les contraintes climatiques qui s'exercent sur le profil de sol et notamment celles qui commandent son évolution : les précipitations et l'évaporation.

En effet c'est le *bilan climatique* qui est le moteur de l'évolution des sols. Il intervient :

##### \* de façon *favorable*

- lorsque le sol est saturé à travers la quantité d'eau drainée. L'élimination des sels solubles et la réduction de la sodicité seront fonction des volumes excédentaires ;
- lorsque le sol se ressuie puis se dessèche à travers la fissuration du profil de sol. La structuration qui en résulte est sous la double dépendance de la valeur du déficit climatique et de la profondeur d'enracinement.

##### \* de façon *défavorable*

- lorsque le sol est saturé à travers l'ampleur de la dispersion. Pour un sol ayant un indice de dispersion donné, l'ampleur de la dispersion au champ c'est-à-dire la quantité d'éléments dispersés et le transport de ces éléments (distance, volume) sera fonction de l'énergie reçue. On peut approcher cette énergie reçue par la somme des précipitations pendant la période saturée. La relation qu'on peut attendre dans un sol à faible stabilité structurale est une réduction d'autant plus forte de la porosité du sol que le cumul des pluies sera important.

Notre objectif est double. -a- Définir et caractériser les campagnes agricoles par les valeurs du bilan climatique (P-ETP), particulièrement les périodes les plus pertinentes par

A-I - Tableau 1. Définition des diverses périodes et phases d'une année climatique.

Décade	Définition	Etat hydrique du profil.	Fonctionnement du drainage
T0	Début de la période humide. 1 ère décade où la pluie est supérieure à l'ETP [(P - ETP)>0] et à partir de laquelle le cumul (P - ETP) décadaire est positif.	Sec Début de réhumectation	non exceptionnel si très fortes précipitations orageuses
T>0	Décade(s) qui sui(vent) T0 si le cumul de (P-ETP) n'atteint pas le seuil de 120 mm.	Période de réhumectation	non
T120	Décade où le cumul de (P-ETP) décadaire depuis T0 atteint 120mm	Début de la saturation après un assèchement du profil de 120 mm.	début après un assèchement du profil de 120 mm.
T>120	Décade(s) qui sui(vent) T120 si le cumul de (P-ETP) n'atteint pas le seuil de 180 mm.	Période de saturation après un assèchement du profil de 120 mm.	oui après un assèchement du profil de 120 mm.
T180	Décade où le cumul de (P-ETP) décadaire depuis T0 atteint 180mm	Début de la saturation après un assèchement du profil de 180 mm.	début après un assèchement du profil de 180 mm.
T>180	Décade(s) qui sui(vent) T180 si le cumul de (P-ETP) n'atteint pas le seuil de 240 mm.	Période de saturation après un assèchement du profil de 180 mm.	oui après un assèchement du profil de 180 mm.
T240	Décade où le cumul de (P-ETP) décadaire depuis T0 atteint 240mm	Début de la saturation après un assèchement du profil de 240 mm.	début après un assèchement du profil de 240 mm.
T>240	Décade(s) qui sui(vent) T240 jusqu'à la fin de la période humide.	Période de saturation après un assèchement du profil de 240 mm.	oui après un assèchement du profil de 240 mm.
D0	Début de la période sèche. 1 ère décade où l'ETP est inférieure à la pluie [(P-ETP)<0] et à partir de laquelle le cumul (P - ETP) est toujours négatif.	Début du déficit climatique = Début du ressuyage	tarissement
D>0	Décade(s) qui sui(vent) D0 si le cumul de (P-ETP) n'atteint pas le un déficit de 70 mm	Période de ressuyage ou d' assèchement.	tarissement
D70	Décade où le déficit cumulé de (P-ETP) décadaire depuis D0 atteint 70mm	Période de ressuyage ou d' assèchement. du profil à -60 cm.	tarissement
D>70	Décade(s) qui sui(vent) D70 si le cumul de (P-ETP) n'atteint pas le seuil de -120 mm.	Période de ressuyage assèchement du profil entre -150 et -100 cm.	non
D120	Décade où le déficit cumulé de (P-ETP) décadaire depuis D0 atteint 120mm	Période de ressuyage ou d' assèchement. du profil à -100 cm.	non
D>120	Décade(s) qui sui(vent) D120 si le cumul de (P-ETP) n'atteint pas le seuil de -180 mm.	Période de ressuyage assèchement du profil entre -100 et -150 cm.	non
D180	Décade où le déficit cumulé de (P-ETP) décadaire depuis D0 atteint 180mm	Période de ressuyage ou d' assèchement. du profil à -150 cm.	non
D>180	Décade(s) qui sui(vent) D180 si le cumul de (P-ETP) n'atteint pas le seuil de -240 mm.	Période de ressuyage assèchement du profil entre -150 et -200 cm.	non
D240	Décade où le déficit cumulé de (P-ETP) décadaire depuis D0 atteint 240mm	Période de ressuyage ou d' assèchement. du profil à -200 cm.	non
D>240	Décade(s) qui sui(vent) D240 jusqu'à la fin de la période sèche	Période sèche assèchement du profil au delà de -200 cm.	non

rapport à l'état hydrique des sols : périodes de réhumectation, d'état saturé, de ressuyage et de déficit hydrique. -b- Préciser les conditions climatiques qui ont présidé aux résultats obtenus sur les situations de références. Nous pourrions discuter de l'extrapolation des résultats d'un double point de vue : l'ampleur de la gamme des états observés (objectif de connaissance) et l'occurrence des états observés (objectif opérationnel). Il s'agira ici de classer les années les unes par rapport aux autres pour mieux comparer ou opposer des résultats expérimentaux obtenus sur des campagnes de mesures différentes.

Pour cela nous étudierons successivement le bilan climatique puis le bilan hydrique et donc l'état hydrique du sol sous réserve de certaines hypothèses concernant les sols (RU) et la végétation (évapotranspiration) et leur interaction (enracinement).

## **2- Matériel et méthode :**

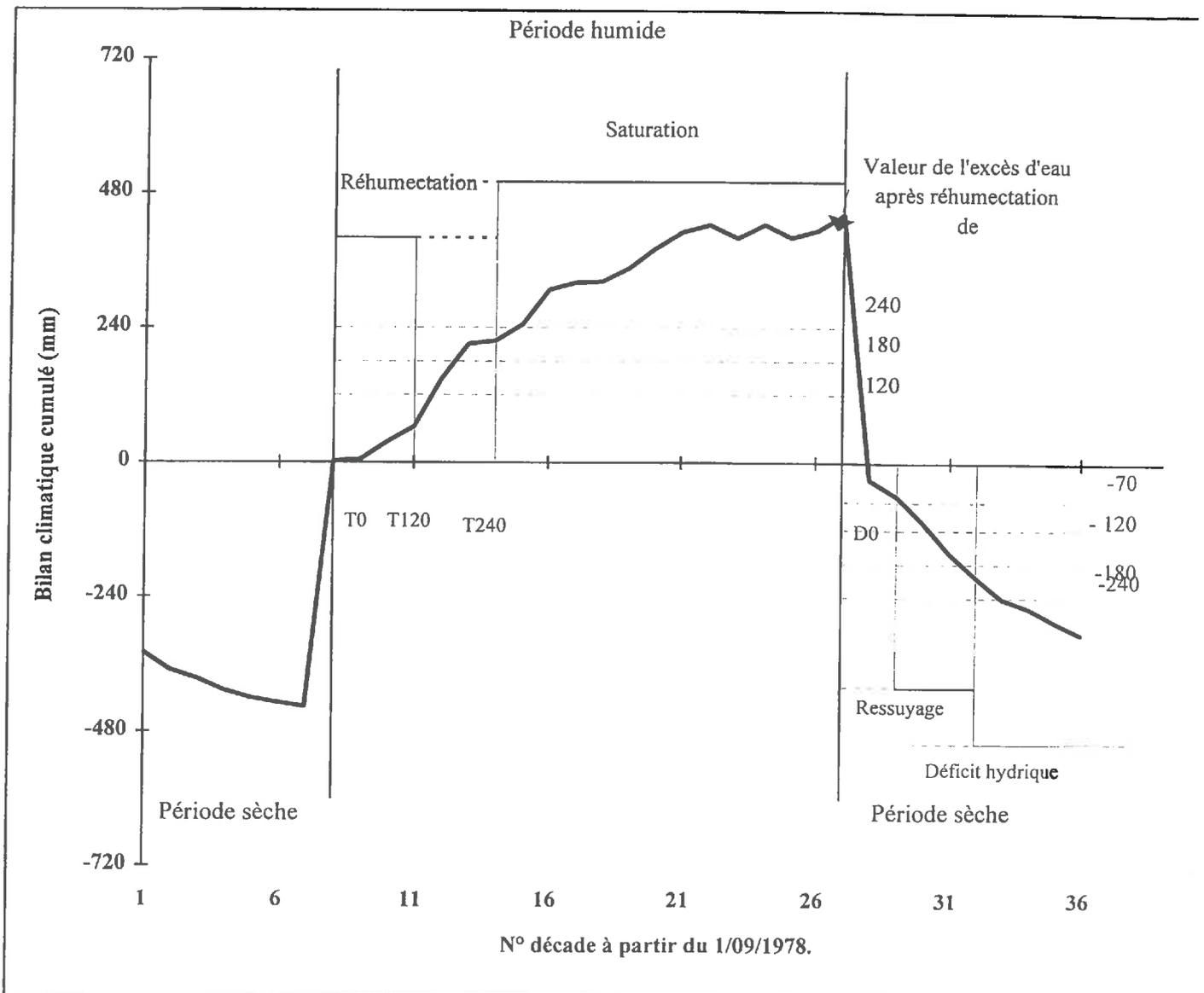
Nous utilisons les données décennales de pluies (P) et d'évapotranspiration potentielle (ETP) Penman. Elles ont été recueillies à Saint Laurent de la Prée de Septembre 1967 à Septembre 1993 (26 années). Sur ces données nous réalisons diverses études statistiques et fréquentielles.

Les définitions des diverses périodes d'une année climatique sont données par le tableau 1 et illustrées par la figure 1.

Deux groupes de définitions : le premier concerne les paramètres climatiques pluies et ETP (bilan climatique), le second fait intervenir certaines hypothèses concernant la RU des sols, l'évapotranspiration réelle de la végétation et l'enracinement (bilan hydrique).

### **2-1- Bilan climatique.**

On distingue deux périodes : humide et sèche. La première est caractérisée par  $P > ETP$  avec un cumul décennal croissant ou stable.



A-I - Figure 1. Les diverses phases de la période humide à partir du bilan climatique décadaire cumulé. Exemple de la campagne 1978-79.

- On définit le *début de la période humide (T0)* par la première décade où la pluie est supérieure à l'ETP  $[(P - ETP) > 0]$  et à partir de laquelle le cumul  $(P - ETP)$  décadaire est positif. On parle aussi pour ce début de période de "retour des pluies".

- On définit le *début de la période sèche (D0)* par la première décade où l'ETP est supérieure à la pluie  $(P - ETP) < 0$  et à partir de laquelle le cumul  $(P - ETP)$  décadaire est toujours négatif. On parle aussi pour cette date de "début du déficit climatique" et "début du ressuyage".

- *La période sèche* est continue et comprise entre D0 et la décade qui précède T0. Le bilan climatique décadaire est alors très généralement négatif et la tendance de son cumul est croissant en valeur absolue.

- *La période humide* est continue et comprise entre T0 et la décade qui précède D0. Pendant cette période, les pluies décadaires sont très généralement supérieures à l'évapotranspiration. Le bilan climatique décadaire cumulé est positif et généralement croissant. La valeur du bilan est définie par le cumul des pluies efficaces  $(P-ETP)$ .

Chaque période (sèche ou humide) peut être caractérisée par sa durée, le cumul du bilan climatique (déficit ou excès) et le bilan climatique moyen par décade.

## 2-2- Bilan hydrique :

On peut grossièrement déduire le bilan hydrique et donc l'état hydrique du sol du bilan climatique. Pour cela il est nécessaire de faire certaines hypothèses concernant les sols (RU) et la végétation (évapotranspiration) et leur interaction (enracinement). Nous nous sommes limités aux hypothèses suivantes :

- RU : 1.8 mm/cm ; RFU : 1.2 mm/cm.

- Evapotranspiration de la végétation : ETR (évapotranspiration réelle) =  $k \times ETP$  (évapotranspiration potentielle) avec  $k=1$ . En faisant cette hypothèse pendant toute l'année, on maximise alors la demande climatique. Plus précisément on maximise légèrement les déficits hydriques cumulés et on minimise légèrement les excès de pluies cumulées.



- Profondeur maximum d' enracinement : 60 cm (prairies avec rigoles), 100 cm (blé sur drains en sol intermédiaire), 150 cm (blé ou maïs sur drains en sol stable), 200 cm (luzerne sur drains en sol stable).

La *période humide* se caractérise par deux phases la *réhumectation* suivie de la *saturation* du profil. La première phase correspond au temps nécessaire pour que le profil atteigne la saturation et que le drainage s'établisse. La quantité de pluies efficaces nécessaires à la saturation du profil dépendra de l'état d'assèchement du profil en fin de saison sèche. On prendra à compter de T0 un cumul de pluies efficaces de 120, 180, 240 mm pour saturer le profil. Les décades où ces seuils seront atteints seront désignées par T120, T180, T240. Nous définirons la *phase de saturation* (période de drainage) par les décades qui suivent la décade où les seuils sont atteints ; nous les désignerons par respectivement T>120, T>180, T>240. On en déduira les durées et éventuellement l' excès de pluies moyen de ces périodes.

La *période sèche* se caractérise par deux phases le *ressuyage* suivi du *déficit hydrique* proprement dit. La première phase correspond au temps nécessaire pour que le déficit climatique atteigne un seuil donné. On prendra à compter de D0 un cumul de déficit climatique de 70, 120, 180, 240 mm. Ces valeurs correspondent à des RFU déterminées par diverses profondeurs d' enracinement : 60 cm (prairies avec rigoles), 100 cm (blé sur drains en sol intermédiaire), 150 cm (blé ou maïs sur drains en sol stable), 200 cm (luzerne sur drains en sol stable). Nous définirons la *phase de déficit hydrique* par les décades où le cumul du déficit climatique atteint ou dépasse 70, 120, 180, 240 mm par respectivement D70, D>70, D120, D>120, D180, D>180, D240, D>240. On en déduira les durées, les déficits cumulés des périodes sèches et éventuellement le déficit moyen de ces périodes. La durée du déficit hydrique dépendra du seuil de RFU choisi et de la date de retour des pluies.

A-I - Tableau 3. Excès d'eau pendant la période saturée  $T \geq 180$ .

Années	Nb décades $T \geq 180$  (a)	Excès de pluie		
		des périodes humide  (b)	saturée (c) = (b) - 180	par décade saturée (e) = (c)/(a)
66 67	17	483	303	17.8
67 68	15	365	185	12.3
68 69	15	402	222	14.8
69 70	13	477	297	22.8
70 71	3	250	70	23.3
71 72	5	337	157	31.4
72 73	0	179	0	0.0
73 74	10	291	111	11.1
74 75	10	314	134	13.4
75 76	7	233	53	7.6
76 77	16	704	524	32.8
77 78	7	308	128	18.3
78 79	15	442	262	17.5
79 80	10	357	177	17.7
80 81	16	275	95	5.9
81 82	11	453	273	24.8
82 83	20	629	449	22.5
83 84	7	278	98	14.0
84 85	19	528	348	18.3
85 86	12	455	275	22.9
86 87	2	188	8	4.0
87 88	20	677	497	24.9
88 89	1	181	1	1.0
89 90	3	234	54	18.0
90 91	13	378	198	15.2
91 92	16	331	151	9.4
92 93	8	359	179	22.4
93 94	18	599	419	23.3
Moyenne	11.0	382.4	202.4	16.7
e.t	6	147	147	8
cv %	54	38	72	50
n	28	28	28	28

### 3- Résultats

#### 3-1- Le bilan climatique annuel moyen (Tableau 2).

##### *La période humide :*

En moyenne pour 26 années, le retour des pluies commence la 3<sup>ème</sup> décade de Septembre. Le bilan climatique est excédentaire jusqu'à la fin de la 1<sup>ère</sup> décade d' avril. Il dure 19 décades pour un excès d'eau cumulé de 382 mm. Ceci représente un excédent de pluie par rapport à l'évapotranspiration de 20 mm par décade pendant la période humide. L' excédent de pluies est d' environ 260, 200 et 140 mm après un assèchement du profil de respectivement 120, 180 et 240 mm. Le début de la période a un écart type de plus de 2 décades, la fin de plus de 3 décades, en clair le début du "printemps" au sens de l'arrêt des pluies est très variable. De même la durée de la période humide, la quantité d'eau en excès le sont aussi.

##### *La période sèche :*

Le déficit climatique apparaît en moyenne la 2<sup>ème</sup> décade d' Avril. La période sèche se termine à la fin de la 2<sup>ème</sup> décade de septembre, dure donc 17 décades pour un déficit cumulé de 388 soit 24 mm par décade. Ainsi une culture occupant toute la période de déficit climatique et ayant des besoins en eau correspondant à l' ETP, subirait un déficit hydrique d' environ de 325, 275, 215, 155 selon les diverses hypothèses de RFU (70, 120, 180, 240). Le début de la période a un écart type de 3 décades, la fin de 9, en clair le retour des pluies est donc "extrêmement variable".

##### *Le bilan climatique annuel :*

Le bilan climatique annuel est donc pratiquement équilibré : l'excès d' eau hivernal de 382 mm est balancé par un déficit estival de 388 mm. Le bilan hydrique est lui excédentaire puisque le déficit climatique est limité par la profondeur de dessèchement du profil. Ceci est cohérent avec les profils salins "descendants" qui caractérisent les sols de marais. Quant à la



variabilité du bilan annuel, on note 9, 12 et 5 années où le bilan est respectivement excédentaire, déficitaire et équilibré.

### 3-2- Conséquences sur le bilan hydrique en hiver et l'excès d'eau.

On prendra pour étudier le bilan hydrique l'exemple de 180 mm de pluies efficaces pour saturer le profil (Tableau 3). La décade T0 est le début de la période humide, la décade T180 est la décade où la somme de P-ETP décadaire atteint 180 mm. Les décades qui suivent désignées par  $T > 180$  constitueront la période de saturation.

#### *La phase de saturation ( $T > 180$ ) :*

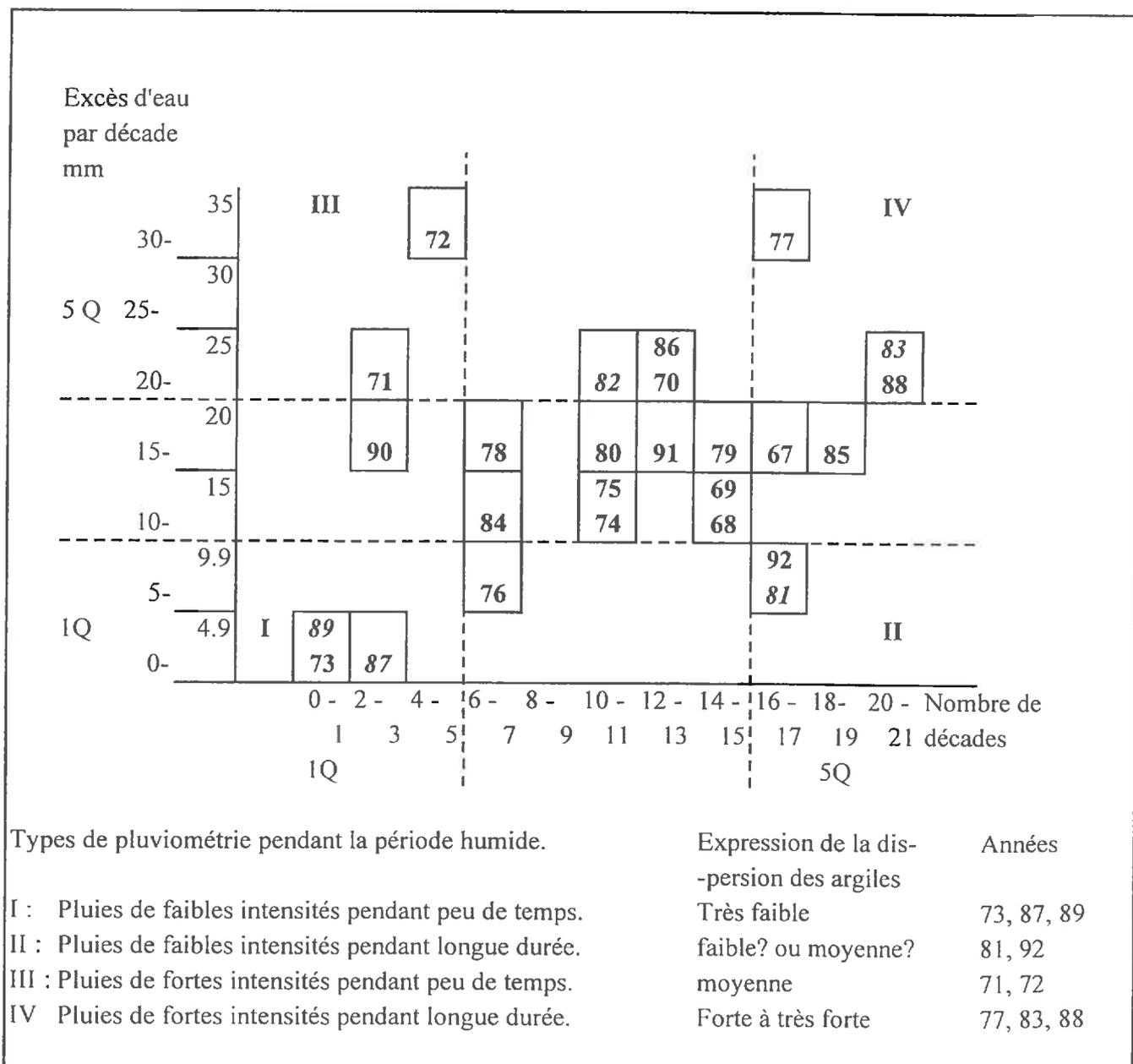
*Le début T180* (fig. 2) : la période peut débuter dès la 2ème décade d'Octobre (1987) jusqu'à la 3ème décade d'avril (1989). La médiane du début de la période saturée T180 correspond à la fin de décembre. Le 1er Q se termine la 2ème décade de novembre (1966, 76, 82, 84, 87, 91, 92). Le dernier quintile s'étend de la 3ème décade de janvier jusqu'à la 3ème d'avril (1971, 72, 78, 84, 87, 89, 90). Le bilan climatique peut ne pas atteindre 180 mm d'excès (1973).

*La durée* (fig.3) : elle varie de 0 (1973) à 20 décades (1983, 88). La médiane correspond à 10 décades. Le premier quintile correspond à une durée de 0 à 5 décades (années 1971, 72, 73, 87, 89, 90). Le 5ème quintile dure de 15 à 20 décades (années 1967, 77, 81, 83, 85, 88, 92).

*La quantité d'excès de pluie* (fig. 4) : c'est le cumul du bilan climatique pendant la période humide moins 180 mm. C'est une valeur estimée de la quantité drainée. L'excès de pluie peut varier de moins de 60 mm (1973, 76, 87, 89, 90) à plus de 500 mm (1977, 88). Le 1er quintile correspond à l'intervalle [0 à 119 mm] (années 1971, 73, 74, 76, 81, 84, 87, 89, 90). Le dernier quintile varie de 240 à 540 mm (années 1967, 70, 77, 79, 82, 83, 85, 86, 88). La médiane est proche de 180 mm.

Nombre d'années	7						91		
	6						90	88	
5						84	85	86	
4	89						75	80	83
3	87	92	74	79	82				
2	84	81	69	78	71	77			
1	73	76	68	67	70	72			
	0-	5-	10-	15-	20-	25-	30-	Excès d'eau par décade (mm)	
	4.9	9.9	15	20	25	30	35		
	1 Q	>		<	5 Q	>			

A-I - Figure 5. Histogramme de l'excès d'eau moyen par décade pendant la période saturée T180. [Somme (P-ETP)/Durée T180]



A-I - Figure 6. Relation entre excès d'eau et durée de saturation en décades (T180 et T>180).

*Excès d'eau moyen par décade (fig. 5) :*

C'est la quantité d'excès de pluies efficaces pendant la période saturée T180 et T>180 rapportée à la durée de la saturation (T180, T>180). Cette valeur peut varier de 0 (années 1973, 84, 87, 89) à plus de 30 mm/ décade (année 1972, 77). Le 1er quintile varie de 0 à 10 mm/décade (années 1973, 76, 81, 84, 87, 89, 92), le dernier de 20 à plus de 30 mm/décade (années 1970, 71, 72, 77, 82, 83, 86, 88). La médiane est dans l'intervalle 15-20 mm/décade.

*Durée et excès d'eau décadaire pendant la période de saturation :*

Si on combine excès d'eau décadaire et durée de saturation sur un même graphique (fig.6), on peut caractériser la pluviométrie efficace durant la période saturée par son intensité et sa durée. L' intensité des pluies (qui peut être considérée comme un indicateur de l'énergie cinétique de la pluie) et la durée de la saturation sont deux éléments intervenants sur l' expression de la dispersion de l' argile au champ. Ainsi, en faisant l'intersection des premiers et derniers quintiles de ces deux paramètres, on peut distinguer 4 types d'années contrastées.

Type I : la période de saturation est courte et les pluies efficaces sont de faibles intensités (années 1973, 87, 89) ;

Type II : la période de saturation est longue et les pluies efficaces sont de faibles intensités (année 84) ;

Type III : la période de saturation est courte et les pluies efficaces sont de fortes intensités (années 71, 72) ;

Type IV : la période de saturation est longue et les pluies efficaces sont de fortes intensités (années 77, 83, 88).

Pour les types I et IV la dispersion des argiles seront respectivement très faibles et fortes, les types II et III pouvant être moyennes.



### 3-3 - Probabilité des divers états hydriques pendant l'année climatique :

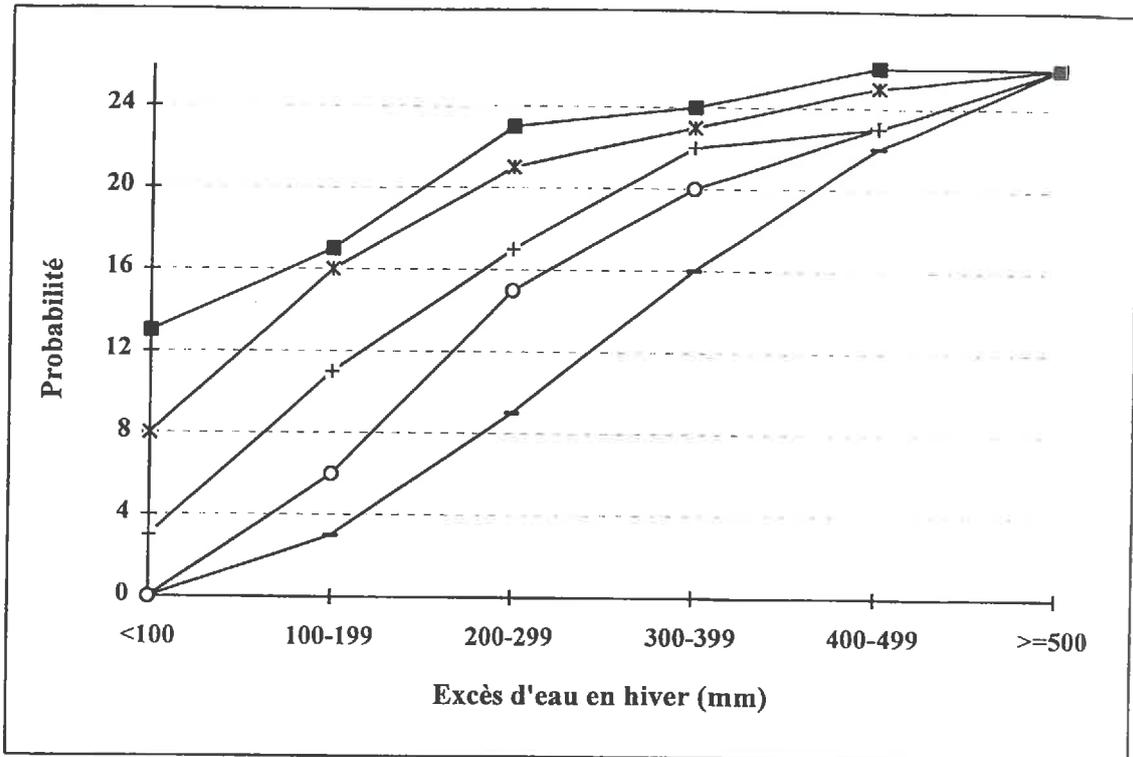
Chaque décennie de l'année climatique peut être définie par un état hydrique déduit du bilan climatique. L'indice associé aux périodes humide (T) et sèche (D) indique la valeur du bilan climatique. Le tableau 4 en est l'illustration pour l'ensemble des années étudiées. De ces données on peut déduire la probabilité pour une décennie donnée d'être dans un état hydrique donné (fig. 7). On peut alors discuter de la période la plus probable pour observer les états de saturation. En prenant un seuil de 180 mm ou plus pour obtenir un état de saturation, on constate que dans 89 % des cas ce sera la 2ème décennie de février, dans 85% des cas ce sera entre la 3ème décennie de janvier et la 2ème de février, dans 81 % des cas ce sera entre la 3ème décennie de janvier et la 3ème de février, enfin 2 années sur 3 entre 1ère décennie de janvier et la 3ème de mars (soit 3 mois).

Si nous prenons un seuil de saturation plus élevé 240 mm par exemple, on constate que dans 78% des cas ce seuil n'est pas atteint, donc qu'il n'y a pas saturation du profil, donc pas de drainage. Il est atteint ou dépassé 2 années sur 3 entre la 1ère décennie de février et la 2ème de mars (soit 5 décades).

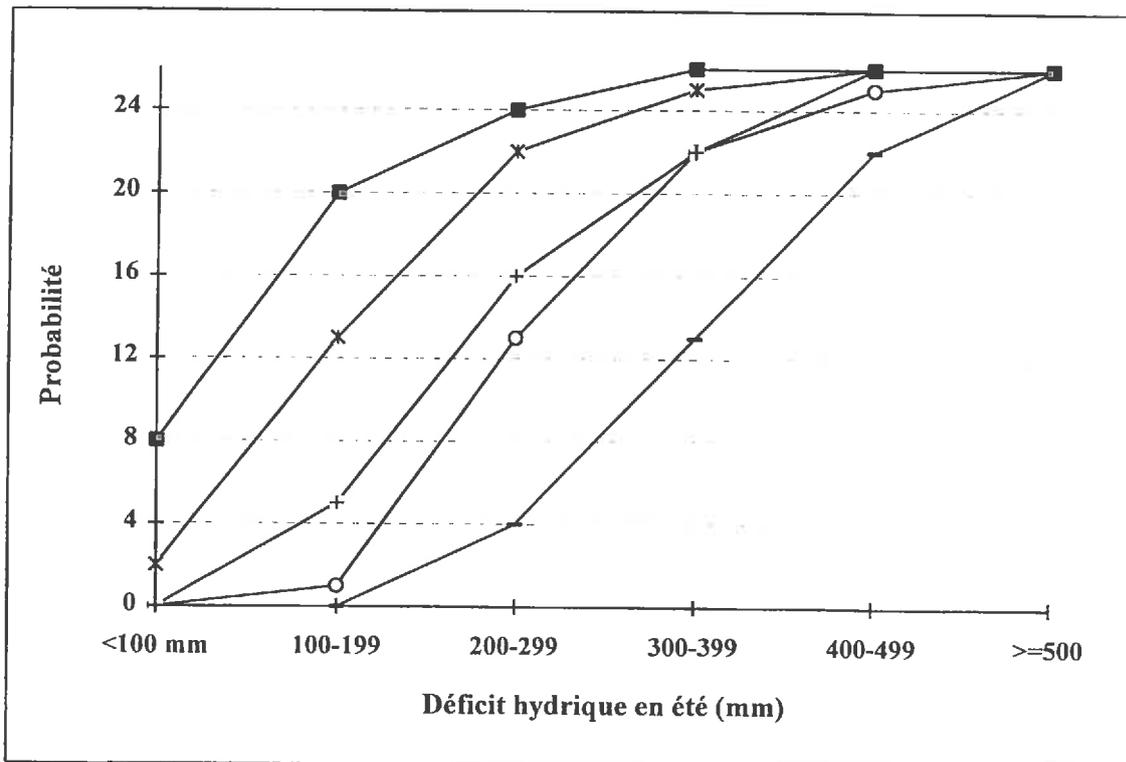
### 4- Discussion et conclusion :

Globalement les grands traits du bilan climatique annuel montre

- que l'excès de pluies pendant la période humide est équivalent au déficit climatique de la saison sèche. Ceci explique pour les sols des profils salins descendants ;
- une forte variabilité de la valeur des bilans hydriques pour les périodes humides (moyenne = 375 mm, écart-type = 146, CV = 39%) et sèches (moyenne = -395 mm, écart-type = 92, CV = 23%). Le sol et les cultures vont jouer un rôle tampon. Ainsi l'excès d'eau moyen pendant la période humide se verra réduit de 375 mm à 142 si l'assèchement du sol a été de 240 mm. De même pour la période sèche le déficit hydrique passe de 395 mm à 155 mm si la RFU du sol est de 240 mm. Ceci montre les économies d'eau que l'on peut réaliser si on exploite la RU du sol par l'intermédiaire d'un enracinement profond.



A-I - Figure 8. Probabilité d'atteindre un excès d'eau pour diverses valeurs de saturation. Saturation obtenue après une somme de pluies efficaces de 0, 70, 120, 180, 240 mm : carré, étoile, croix, rond, tirets.



A-I - Figure 9. Probabilité d'atteindre un déficit hydrique pour diverses valeurs de RU. Déficit hydrique obtenu après une somme de P -ETP de 0, 70, 120, 180, 240 mm : carré, étoile, croix, rond, tirets.

Ainsi l'intensité de l'exploration racinaire en profondeur va agir sur les quantités d'eau drainées de façon déterminante. Les courbes des fig. 8 et 9 montrent que la probabilité d'avoir un excès d'eau (drainage < 100 mm) passe de 0 à 3, 8, 13 années sur 26 selon que la saturation est obtenue après 70, 120, 180, 240 mm de pluies efficaces. En particulier après un assèchement de 240 mm, on trouverait 6 années sur 26 où le drainage ne fonctionnerait pas.

De même, si on considère la période sèche, l'enracinement d'une culture à 150 cm ou à 200 cm permettrait une alimentation hydrique proche de la satisfaction des besoins d'une culture de printemps (maïs, sorgho, tournesol) ou pluriannuelle (luzerne). Aussi dans un tel cas l'irrigation permettant de produire plus ne semble pas être une technique justifiée tant au point de vue technique qu'économique.

Autre conséquence de la variabilité des valeurs de l'excès hydrique en hiver c'est l'incidence des quantités de pluies sur la dispersion des argiles. L'opposition entre les années 83, 88 (période de saturation longue et pluies efficaces intenses) et les années 87, 89 (période de saturation courte et intensité des pluies efficaces faibles) seraient intéressantes.

## Annexe II

### Annexe II-1 - Dosage des éléments chimiques en sols de Marais. Toulgoat (1983)

Contrairement aux analyses chimiques classiques qui ne s'intéressent principalement qu'à la richesse des sols en éléments fertilisants utilisables par la plante, l'analyse de sol des marais s'intéresse plus particulièrement aux différents paramètres chimiques ayant un rôle sur les propriétés physiques du sol (stabilité structurale en particulier).

On dose préférentiellement :

- le calcaire total (mesure du CO<sub>2</sub> dégagé)
- la matière organique (méthode ANNE)
- les sels solubles (sels de Na, Ca, K et Mg)
- les sels échangeables (sels de Na, Ca, K et Mg)
- le pH,
- la conductivité électrique au 1/5.

#### Méthodes particulières pour le dosage des sels solubles et échangeables

Si l'on applique, dans le cas des terres salées de marais, les méthodes classiques de dosage des sels échangeables de Na, Ca, K et Mg, on enregistre, dans la plupart des cas, des teneurs exagérément élevées, bien souvent supérieures à la capacité totale d'échange.

En effet, la présence dans ses sols, de sels d'origine marine (sels solubles de Na, Ca, K et Mg) oblige à distinguer les cations échangeables, fixés sur le complexe, des cations solubles.

Cependant, cette distinction entre sels solubles et échangeables est d'autant plus difficile à réaliser qu'il existe, entre le complexe absorbant et la solution du sol, un équilibre dynamique perpétuellement modifié par les mouvements descendants de sels solubles (dans le cas, évidemment, où le drainage interne du sol permet une lixiviation des sels de la solution).

La méthode de dosage actuellement utilisée par le Laboratoire Centre Atlantique de La Rochelle permet de doser très précisément ces deux fractions de sels dont les rôles respectifs sur les propriétés physiques du sol sont encore assez mal connus.

#### Principe

**Dosage du calcium soluble et du magnésium soluble**

2 g de terre dans 100 cc d'eau distillée et extraction par l'acétate de sodium

**Dosage du sodium soluble et échangeable et du potassium soluble et échangeable**

5 g de terre dans 100 cc d'acétate d'ammonium à PH 7.  
Une heure d'agitation

**Dosage du sodium échangeable et du potassium échangeable**

Mélange intime de 5 g de terre et de 50 g de sable.  
Lavage par 50 cc de méthanol et 50 cc d'éthanol (lessivage des sels solubles)  
Percolation par 33 ml d'acétate d'ammonium (permet l'extraction du Na et K échangeables).

Remarque : la détermination du sodium et du potassium solubles se fait par différence

**Dosage du calcium soluble et échangeable et du magnésium soluble et échangeable** Mélange intime de 5 g de terre et de 50 g de sable.  
Percolation par 250 cc d'acétate de Na 1 N à pH 8.2.

Remarque : le magnésium échangeable est obtenu par différence.

**Détermination de la CEC** Saturation d'une colonne comprenant 5g de terre et 50 g de sable, par de l'acétate de sodium. Lavage de la même colonne avec 50 ml d'éthanol et 50 ml de méthanol et 50 ml de méthanol (élimination de tous les sels solubles).  
Seconde percolation par de l'acétate d'ammonium 1 N, pH 7.2.  
Evaporation de l'alcool restant dans le percolat par élévation de la température, et dosage du Na par un photomètre à flamme.  
Donne T.

Remarque : la détermination du calcium échangeable dans les terres alcalines (cas des terres des Marais), se fait de la façon suivante :

$$Ca \text{ échangeable} = CEC - (Na + K + Mg \text{ échangeables})$$

**Détermination de la CE 1/5** 20 g de terre dans 100 cc d'eau distillée.  
Mesure de la CE au résistivimètre

### Discussion

L'examen de cette méthode montre que le dosage des sels solubles et échangeables, ainsi que la détermination de la capacité totale d'échange, nécessitent différentes extractions :

- 1 extraction à l'eau distillée
- 3 extractions à l'acétate d'ammonium
- 2 extractions à l'alcool (méthanol et éthanol)
- 1 extraction à l'acétate de sodium

Ces sept extractions sont échelonnées sur environ trois jours.

D'autre part, l'extrême variabilité de la teneur des sols en certains sels (sels de sodium en particulier), oblige l'opérateur, dans le cas de fortes concentrations, à réaliser des dilutions.

Le rapport de dilution est apprécié par le manipulateur.

Compte tenu de cette remarque, l'automatisation du dosage du sodium semble difficile à réaliser. Cette opération oblige donc une surveillance constante des appareils de mesure.

Compte tenu aussi :

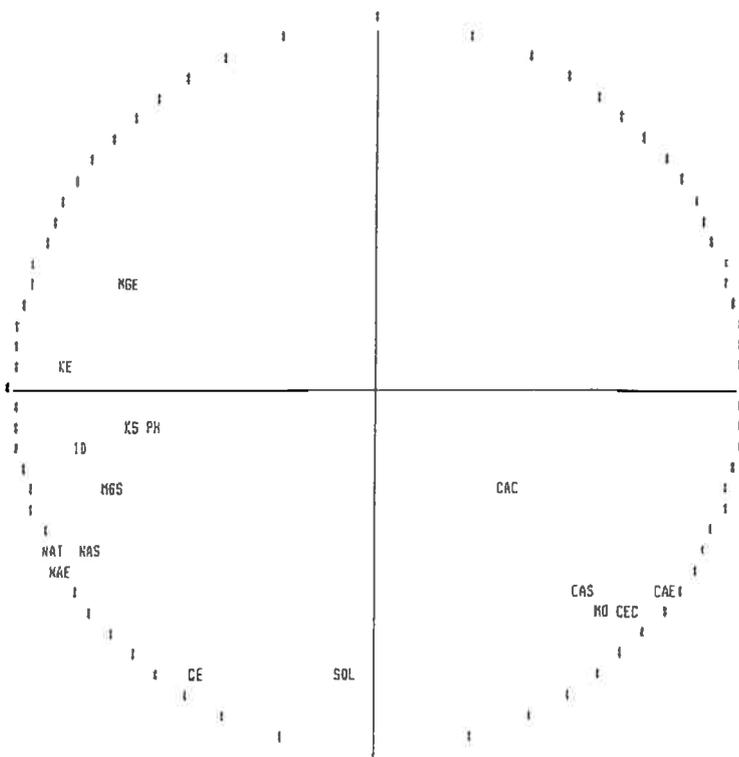
- du prix élevé des extractifs utilisés (alcool en particulier)
- du temps nécessaire aux différents dosages, les analyses chimiques sont chères.

Simplifier cette méthode de dosage semble actuellement difficile à réaliser, par contre, mieux tirer parti des résultats obtenus constitue un objectif prioritaire.

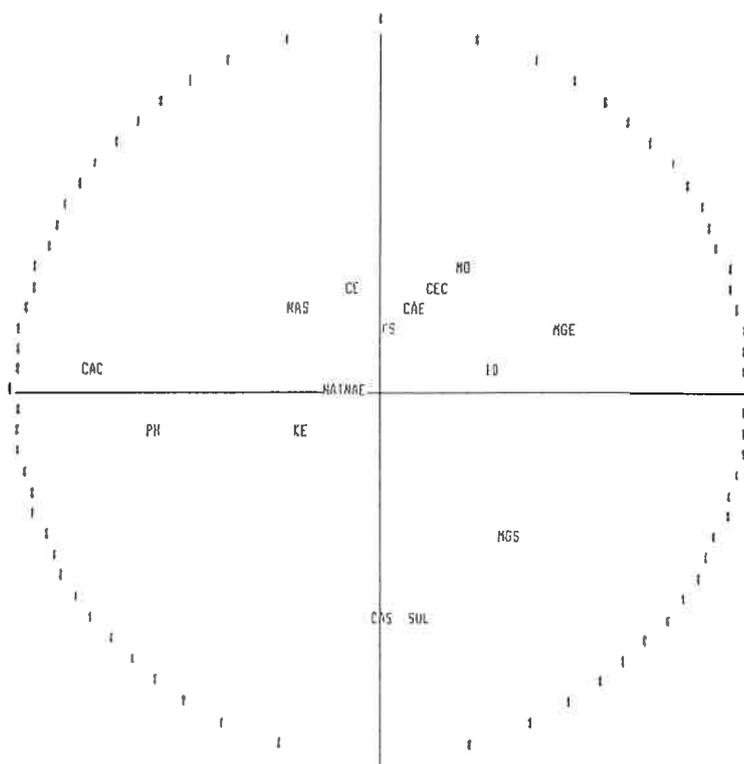
## Annexe II-2. Principaux résultats de l'ACP pour les échantillons de l'horizon H1 (0-30 cm).

### 1- Cercle des corrélations

\* Plan 1 - 2. (Axe 1 horizontal, Axe 2 vertical)



\* Plan 3 -4. (Axe 1 horizontal, Axe 2 vertical)



## 2- Diagonalisation

1ère ligne : valeurs propres (variances sur les axes principaux)

2ème ligne : contribution à la variation totale (pourcentages expliqués par les axes principaux)

7.2406	3.3922	1.6894	1.3501	0.6840
45.3 %	21.2 %	10.6 %	8.4 %	4.3 %

Vecteurs propres (coefficients des variables centrées réduites dans l'équation linéaire des axes principaux)

PH	-0.2165	-0.0446	-0.4558	-0.0899	-0.0660
CACO	0.1365	-0.1437	-0.5982	0.0674	-0.0920
MO	0.2325	-0.3362	0.1973	0.2939	0.0042
CE	-0.1763	-0.4185	-0.0344	0.2487	-0.0052
NAT	-0.3215	-0.2361	-0.0817	0.0366	-0.1696
CAS	0.2108	-0.2907	0.0257	-0.4938	0.1872
MGS	-0.2622	-0.1469	0.2786	-0.3169	-0.1879
NAS	-0.2890	-0.2315	-0.1653	0.2116	0.0737
KS	-0.2401	-0.0327	0.0382	0.1667	0.8056
CAE	0.2910	-0.2923	0.0792	0.1976	0.0350
MGE	-0.2484	0.1717	0.3978	0.1486	0.0543
NAE	-0.3151	-0.2641	-0.0331	0.0413	-0.1705
KE	-0.3053	0.0579	-0.1398	-0.0635	0.2659
CEC	0.2555	-0.3310	0.1362	0.2537	0.0260
SOLU	-0.0227	-0.4107	0.1025	-0.5325	0.1554
ID	-0.2948	-0.0809	0.2576	0.0783	-0.3257

## 3 - Etude des variables

1ère colonne : corrélations entre les variables et les axes principaux

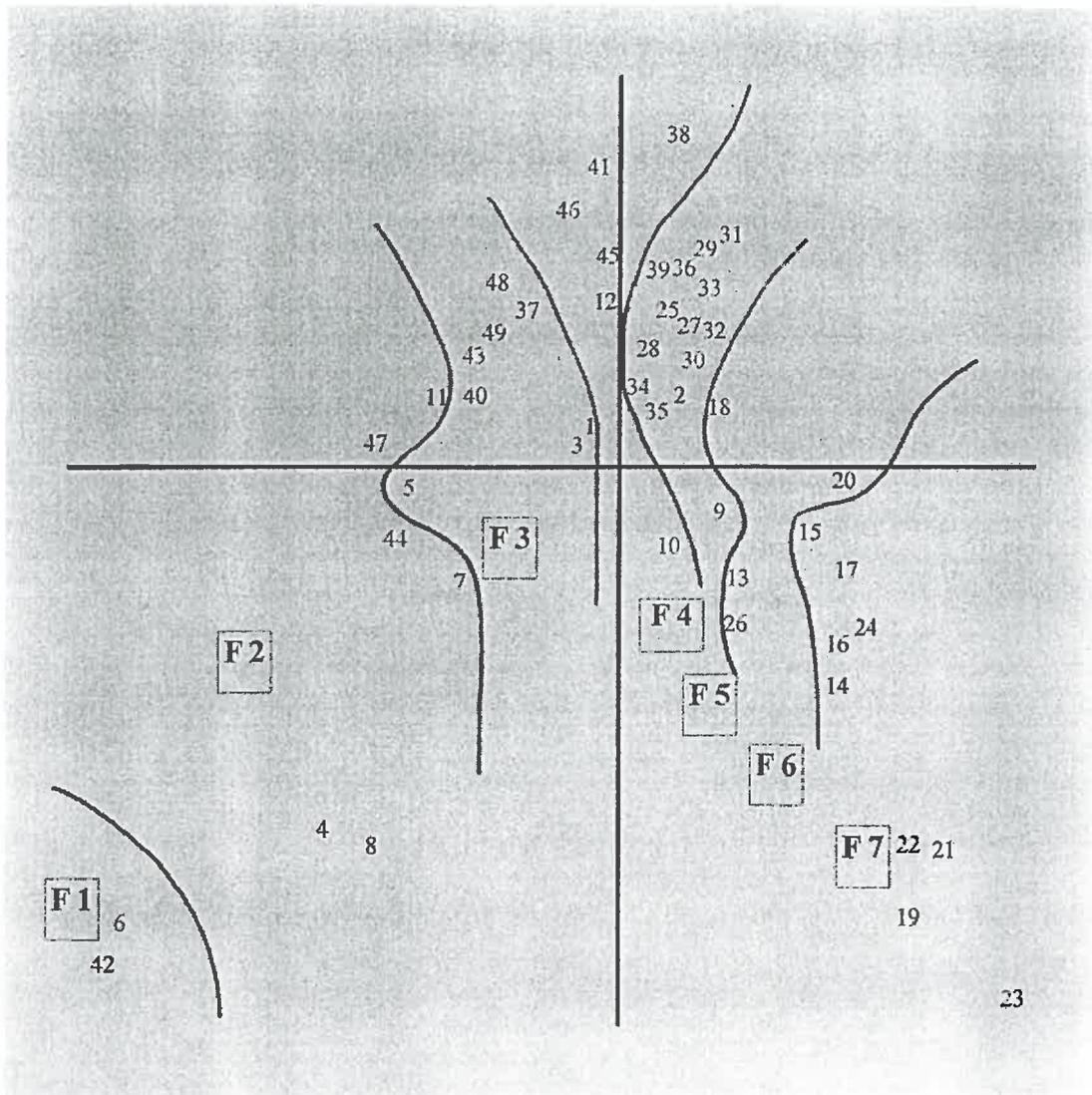
2ème colonne : corrélations au carré

Variables

Composantes principales

	AXE 1		AXE 2		AXE 3		AXE 4		AXE 5	
PH	-0.5824	0.3392	-0.0821	0.0067	-0.5924	0.3510	-0.1045	0.0109	-0.0546	0.0030
CACO	0.3673	0.1349	-0.2646	0.0700	-0.7775	0.6045	0.0783	0.0061	-0.0761	0.0058
MO	0.6255	0.3913	-0.6192	0.3834	0.2565	0.0658	0.3414	0.1166	0.0035	0.0000
CE	-0.4745	0.2152	-0.7707	0.5940	-0.0447	0.0020	0.2889	0.0835	-0.0043	0.0000
NAT	-0.8652	0.7486	-0.4349	0.1891	-0.1062	0.0113	0.0426	0.0018	-0.1403	0.0197
CAS	0.5672	0.3217	-0.5353	0.2866	0.0334	0.0011	-0.5737	0.3292	0.1548	0.0240
MGS	-0.7056	0.4979	-0.2705	0.0732	0.3621	0.1311	-0.3683	0.1356	-0.1554	0.0242
NAS	-0.1776	0.6047	-0.4263	0.1817	-0.2148	0.0452	0.2459	0.0605	0.0609	0.0037
KS	-0.6460	0.4173	-0.0603	0.0036	0.0497	0.0025	0.1937	0.0375	0.6662	0.4139
CAE	0.7831	0.6132	-0.5384	0.2899	0.1029	0.0106	0.2296	0.0527	0.0289	0.0008
MGE	-0.6685	0.4469	0.3162	0.1000	0.5171	0.2674	0.1727	0.0298	0.0449	0.0020
NAE	-0.8479	0.7189	-0.4864	0.2366	-0.0430	0.0018	0.0480	0.0023	-0.1410	0.0199
KE	-0.8216	0.6750	0.1067	0.0114	-0.1817	0.0330	-0.0738	0.0055	0.2199	0.0484
CEC	0.6875	0.4727	-0.6096	0.3716	0.1771	0.0313	0.2948	0.0869	0.0315	0.0005
SOLU	-0.0612	0.0037	0.7564	0.5721	0.1332	0.0177	-0.6188	0.3829	0.1286	0.0165
ID	-0.7934	0.6294	-0.1489	0.0222	0.3348	0.1121	0.0910	0.0083	-0.2677	0.0717

4 - Projection des individus sur le plan 1 - 2. Axe 1 horizontal, axe 2 vertical.



F 1, F 2, F 3, F 4, F 5, F 6, F 7 : Familles 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Points cachés

030	032	1.013423	1.386223
027	033	7700673	1.479087
028	034	5463707	1.406968
025	036	5777833	1.451676
012	045	1866567	1.462648
037	048	1.889712	1.145171

## 5 - Classification des échantillons.

Interprétation de la hiérarchie

### Troncature de la hiérarchie

N°CLAS	EFFECTIF	DESCRIPTION DES CLASSES	FAMILLE N°
1	4	001 003 048 049	3
2	16	002 009 025 026 027 028 029 030 031 032 033 034 035 036 039 045	5
3	2	039 045	2
4	4	005 037 040 043	3
5	2	006 042	1
6	3	007 011 044	2
7	2	010 012	4
8	2	013 018	6
9	2	014 016	7
10	2	015 024	7
11	1	017	7
12	2	019 022	7
13	1	020	6
14	1	021	7
15	1	023	7
16	3	038 041 046	4
17	1	047	2

## 6 - Classification des variables.

Interprétation de la hiérarchie

Troncature de la hiérarchie

HRZ 1

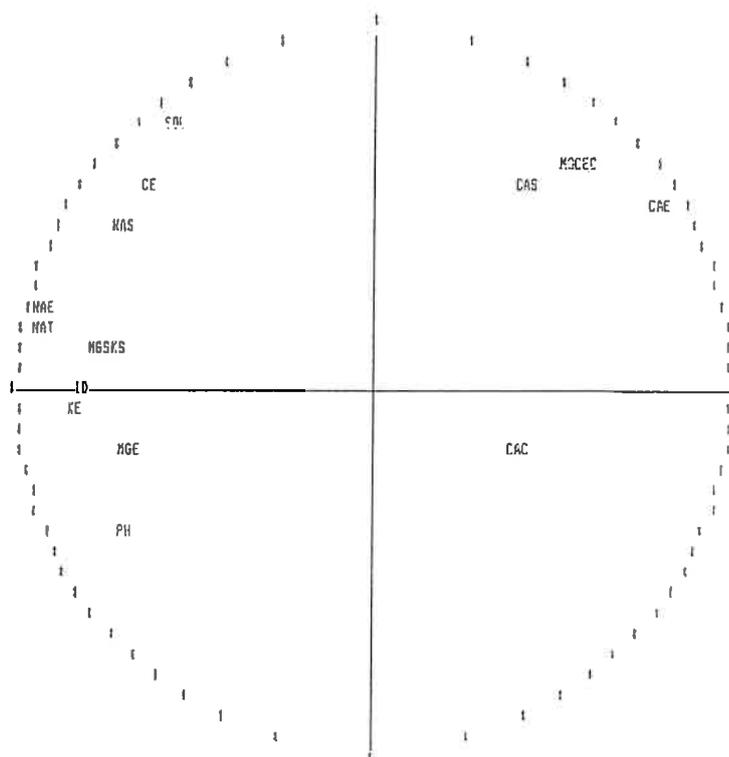
8 classes

N° CLAS	EFFECTIF	DESCRIPTION DES CLASSES
1	2	PH MGE
2	1	CAC
3	1	MO
4	8	CE CAS MGS NAS KS NAE KE SOL
5	1	NAT
6	1	CAE
7	1	CEC
8	1	ID

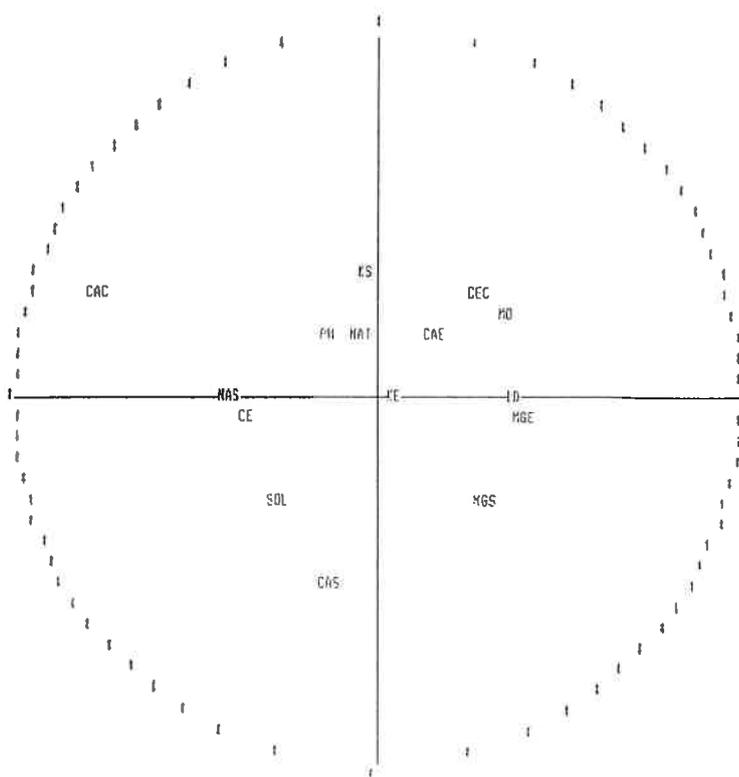
## Annexe II-3. Principaux résultats de l'ACP pour les échantillons des horizons H1, H2, H3.

### 1- Cercle des corrélations

\* Plan 1 - 2. (Axe 1 horizontal, Axe 2 vertical)



\* Plan 3 - 4. (Axe 1 horizontal, Axe 2 vertical)



## 2- Diagonalisation

Contribution à la variation totale (pourcentages expliqués par les axes principaux)

47.7 %	19,3 %	9,8 %	5,6 %	5.3 %
--------	--------	-------	-------	-------

Vecteurs propres (coefficients des variables centrées réduites dans l'équation linéaire des axes principaux).

PH	-0.2441	-0.228	-0.0813	0.2234	0.4158
CACO	0.1508	-0.743	-0.5830	0.2995	0.3238
MO	0.1989	0.3825	0.2911	0.2760	0.0252
CE	-0.2200	0.3539	-0.2697	-0.0496	-0.2009
NAT	-0.3323	0.1102	-0.0248	0.3038	0.1990
CAS	0.1544	0.3525	-0.0852	-0.4891	0.2662
MGS	-0.2686	0.0835	0.2545	-0.2753	0.4579
NAS	-0.2464	0.2796	-0.3048	0.0368	-0.2922
KS	-0.2491	0.0966	-0.0051	0.3910	-0.1295
CAE	0.2853	0.2997	0.1367	0.2362	0.0778
MGE	-0.2448	-0.0762	0.3240	-0.0303	-0.3118
NAE	-0.3270	0.1524	-0.0140	0.2127	0.1558
KE	-0.2917	-0.0225	0.0573	0.0159	0.2336
CEC	0.2144	0.3821	0.2323	0.3083	0.0672
SOLU	-0.1990	0.4205	-0.2035	-0.2714	0.0332
ID	-0.2858	0.0102	0.3101	0.0049	0.2669

## 3 - Etude des variables

1ère colonne : corrélations entre les variables et les axes principaux

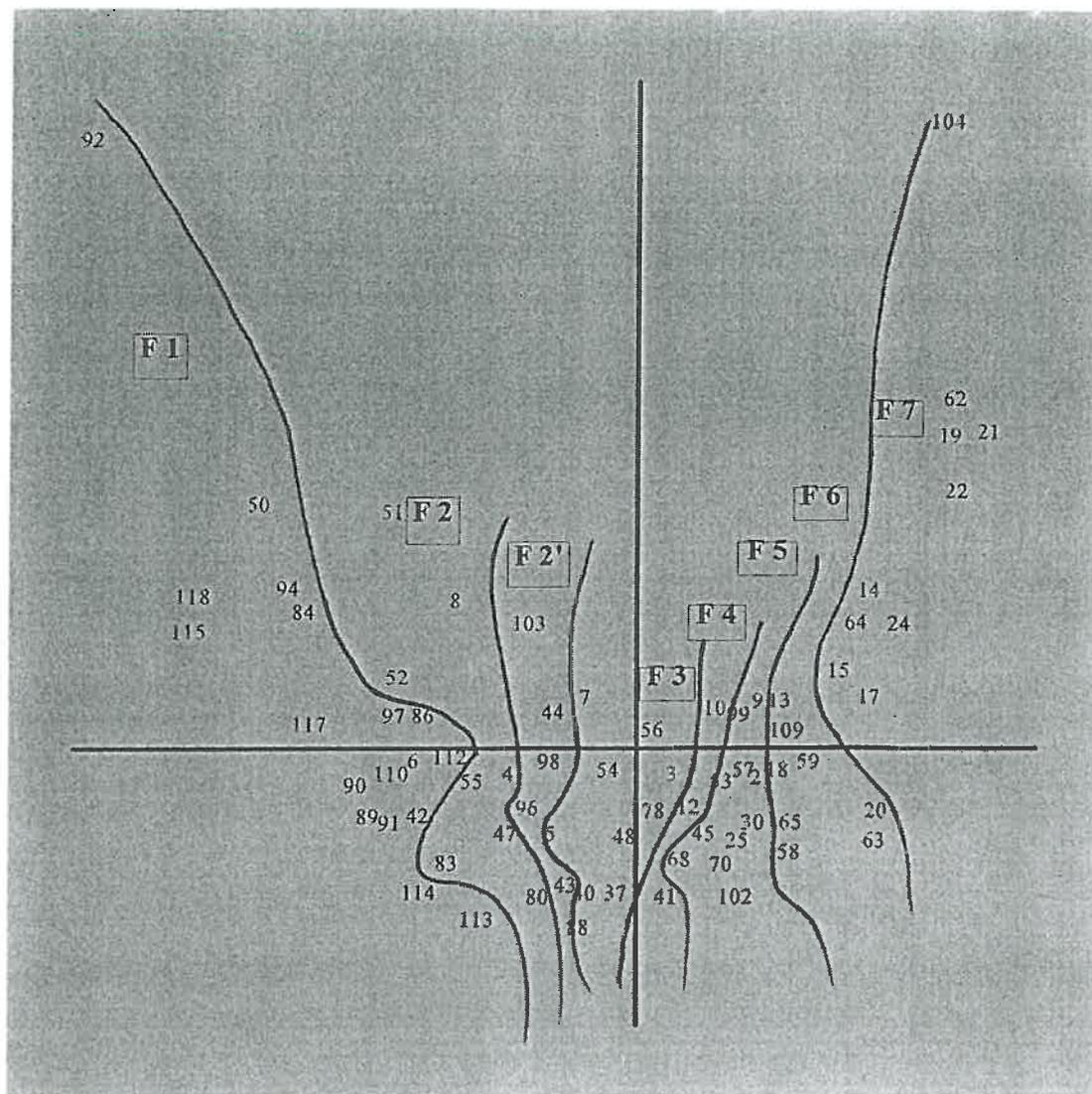
2ème colonne : corrélations au carré

Variables

Composantes principales

	AXE 1		AXE 2		AXE 3		AXE 4		AXE 5	
PH	0.6745	0.4550	-0.3915	0.1533	-0.1019	0.0104	0.2123	0.0451	0.3820	0.1459
CACO	0.4167	0.1736	-0.1305	0.0170	-0.7431	0.5522	0.2846	0.0810	0.2974	0.0884
MO	0.5496	0.3021	0.6720	0.4516	0.3647	0.1330	0.2623	0.0688	0.0232	0.0005
CE	-0.6080	0.3696	0.6217	0.3866	-0.3379	0.1142	-0.0471	0.0022	-0.1846	0.0341
NAT	-0.9183	0.8432	0.1936	0.0375	-0.0311	0.0010	0.1936	0.0375	0.1828	0.0334
CAS	0.4266	0.1820	0.6193	0.3835	-0.1068	0.0114	-0.4648	0.2160	0.02445	0.0598
MGS	-0.7424	0.5511	0.1466	0.0215	0.3189	0.1017	-0.2616	0.0684	0.4206	0.1769
NAS	-0.6808	0.4635	0.4912	0.2413	-0.3820	0.1459	0.0350	0.0012	-0.2684	0.0720
KS	-0.6885	0.4770	0.1696	0.0288	-0.0064	0.0000	0.3716	0.1381	-0.1189	0.0141
CAE	0.7885	0.6214	0.5264	0.2771	0.1713	0.0294	0.2244	0.0504	0.0714	0.0051
MGE	-0.6765	0.4576	-0.1339	0.0179	0.4061	0.1649	-0.0288	0.0008	-0.2864	0.0820
NAE	-0.9035	0.8164	0.2678	0.0717	-0.0176	0.0003	0.2022	0.0409	0.1431	0.0205
KE	-0.8062	0.6500	-0.0395	0.0016	0.0718	0.0052	0.0151	0.0002	-0.2146	0.0460
CEC	0.5924	0.3510	0.6713	0.4506	0.2910	0.0847	0.2930	0.0858	0.0617	0.0038
SOLU	-0.5501	0.3026	0.7388	0.5458	-0.2550	0.0650	-0.2579	0.0665	0.0305	0.009
ID	-0.7897	0.6236	0.0178	0.0003	0.3885	0.1510	0.0047	0.0000	0.2451	0.0601

4 - Projection des individus sur le plan 1 - 2. Axe 1 horizontal, axe 2 vertical.



F 1, F 2, F 2', F 3, F 4, F 5, F 6, F 7 : Familles 1, 2, 2', 3, 4, 5, 6, 7.

## 5 - Classification des échantillons.

### Interprétation de la hiérarchie

#### Troncature de la hiérarchie

(25 classes)

N°CLAS	EFFECTIF	DESCRIPTION DES CLASSES	FAMILLE N°
1	9	001 003 005 037 049 054 081	3
2	35	002 009 025 026 027 028 029 030 031 032 033 034 035 036 039 045 053 057 061 068 069 070 071 072 073 075 076 077 078 079 099 100 102 106 107	5
3	7	004 008 051 052 055 086 097	2
4	13	006 042 082 089 090 091 93 110 111 112 114 116 117	1
5	3	007 011 044	2
6	2	010 012	4
7	4	013 018 059 109	6
8	2	014 016	6
9	3	015 024 064	7
10	3	017 066 067	7
11	2	019 022	7
12	3	020 063 105	6
13	2	021 062	7
14	1	023	7
15	4	038 041 046 088	6
16	6	043 085 087 096 098 103	2'
17	3	047 080 083	2
18	3	050 084 115	1
19	2	056 095	3
20	5	058 060 065 101 108	6
21	1	074	5
22	1	092	1
23	2	094 118	1
24	1	104	7
25	1	113	2

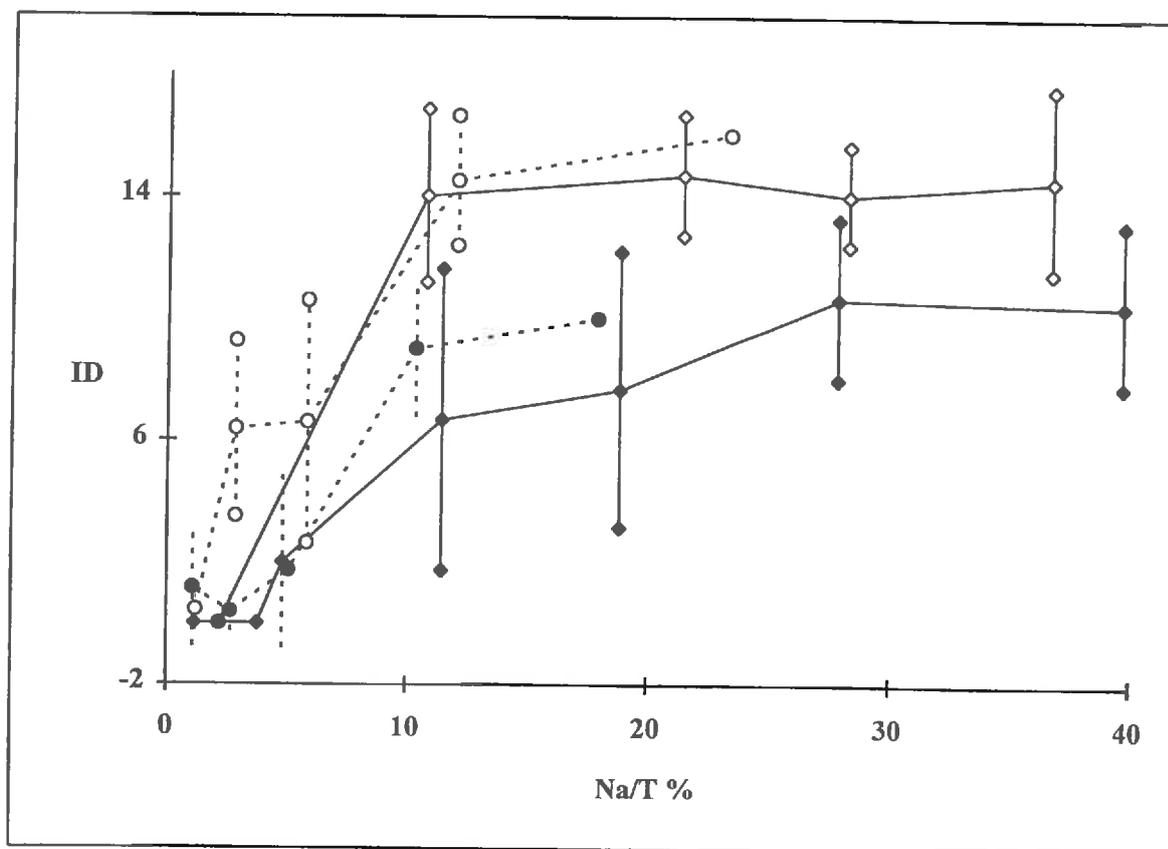
## ANNEXE II - 4

**A-II - 4 Tableau 1. Effet de la sodicité et de la teneur en CaCO<sub>3</sub> sur l'ID.**

**\* , \*\* : différence significative (5%), hautement significative (1%).**

Classe de % Na/T	Classe de % CaCO <sub>3</sub>	Nb d' échant.	Na/T	ID	CaCO <sub>3</sub>
< 2%	<= 6%	9	1.2	0.4	5.3
	>6%	29	1.1	1.0	** 13.1
[2 - 4]	<= 6%	9	2.8	5.7	2.3
	>6%	14	2.7	** 0.36	** 12.8
[5 - 8]	<= 6%	4	5.6	8.3	3.6
	>6%	7	5.3	** 1.6	** 12.0
[9 - 15]	<= 6%	4	11.4	14.3	0.2
	>6%	8	10.8	** 8.1	** 10.2
[18 - 24]	<= 6%	7	21.7	14.9	2.0
	>6%	4	** 18.6	** 8.3	** 11.8
[25 - 31]	<= 6%	4	28.3	14.0	2.9
	>6%	8	27.9	* 10.6	** 10.0
[34 - 39]	<= 6%	4	36.7	14.5	1.8
	>6%	7	39.7	** 10.4	** 8.0

## ANNEXE II - 4



A-II - 4 Figure 1. Effet du taux de calcaire et de la salinité sur la relation  $ID = f(Na/T)$ .  
 CaCO<sub>3</sub> < 6% (clair), > 6% (foncé) ; salinité < 0,4 mS (pointillé), > 0,4 mS (continuu).

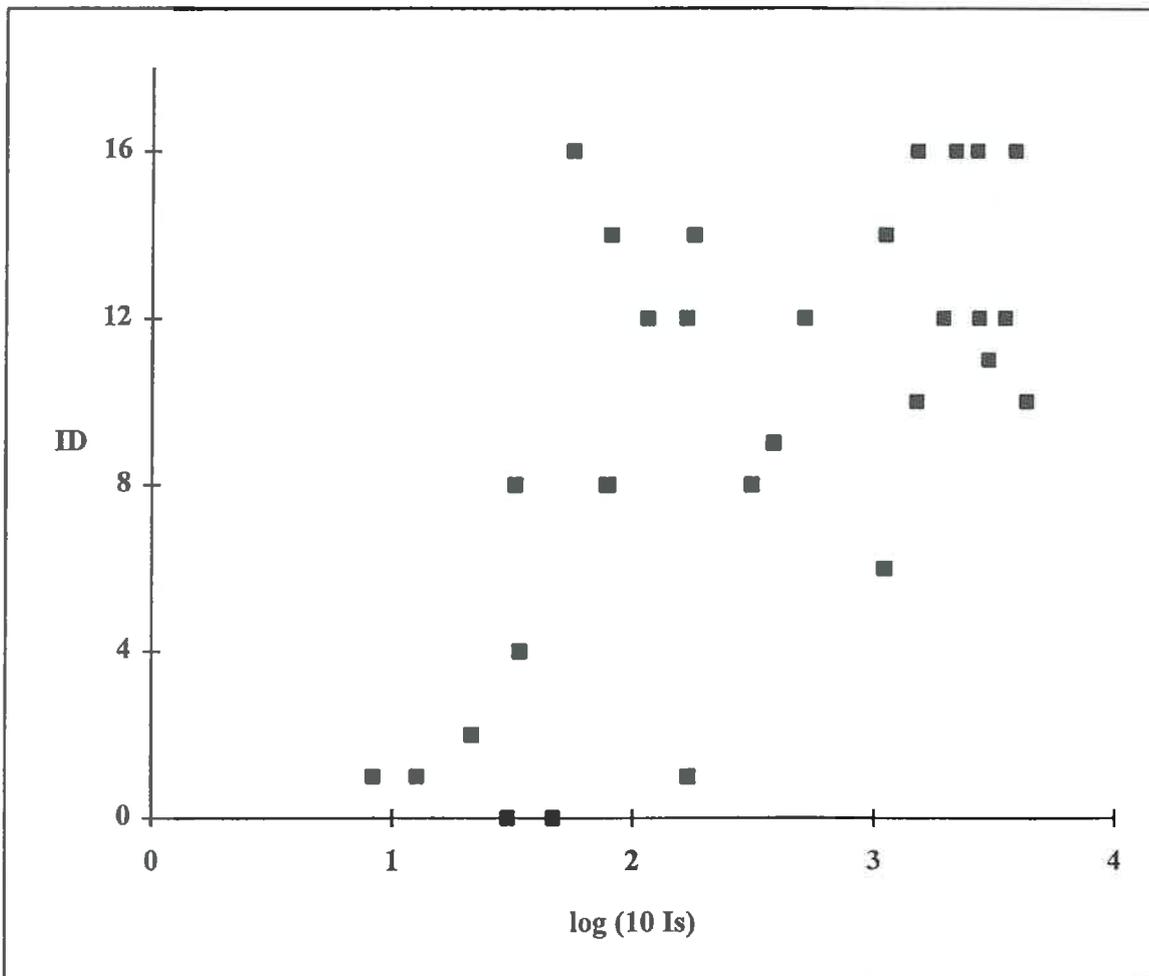
## ANNEXE II - 4

**A-II - 4 Tableau 2. Effet de la sodicité, de la teneur en CaCO<sub>3</sub> et de la salinité (CE) sur l'ID.**

\* , \*\* : différence significative (5%), hautement significative (1%).

Classe de % Na/T	Classe de % CaCO <sub>3</sub>	Classe CE en mS	Nb d' échant.	Na/T	ID	CaCO <sub>3</sub>	CE
< 2%	≤ 6%	< 0.4	9	1.2	0.4	5.3	0.2
		> 0.4	0	-	-	-	-
	> 6%	< 0.4	25	1.1	1.2	13.5	0.2
		> 0.4	4	1.2	** 0	10.6	** 0.6
[2 - 4]	≤ 6%	< 0.4	8	2.9	6.4	2.6	0.3
		> 0.4	1	2.2	0.0	0.0	1.8
	> 6%	< 0.4	13	2.7	0.4	13.1	0.2
		> 0.4	1	3.8	0.0	8.5	0.8
[5 - 8]	≤ 6%	< 0.4	4	5.6	8.3	3.6	0.2
		> 0.4	0	-	-	-	-
	> 6%	< 0.4	5	5.4	1.4	11.2	0.3
		> 0.4	2	4.9	2.0	14.0	0.7
[9 - 15]	≤ 6%	< 0.4	2	12.1	14.5	0.3	0.3
		> 0.4	2	10.8	14.0	0.1	* 0.48
	> 6%	< 0.4	5	10.4	9.0	9.1	0.3
		> 0.4	3	11.5	* 6.7	12.0	..70
[18 - 24]	≤ 6%	< 0.4	1	23.4	16.0	1.2	0.4
		> 0.4	6	21.4	14.7	2.1	1.1
	> 6%	< 0.4	1	17.9	10.0	7.0	0.4
		> 0.4	3	18.8	7.7	13.3	1.4
[25 - 31]	≤ 6%	< 0.4	0	-	-	-	-
		> 0.4	4	28.3	14.0	2.9	1.0
	> 6%	< 0.4	0	-	-	-	-
		> 0.4	8	27.9	10.6	10.0	0.9
[34 - 39]	≤ 6%	< 0.4	0	-	-	-	-
		> 0.4	4	36.7	14.5	1.8	1.2
	> 6%	< 0.4	0	-	-	-	-
		> 0.4	7	39.7	** 10.4	** 8.0	2.5

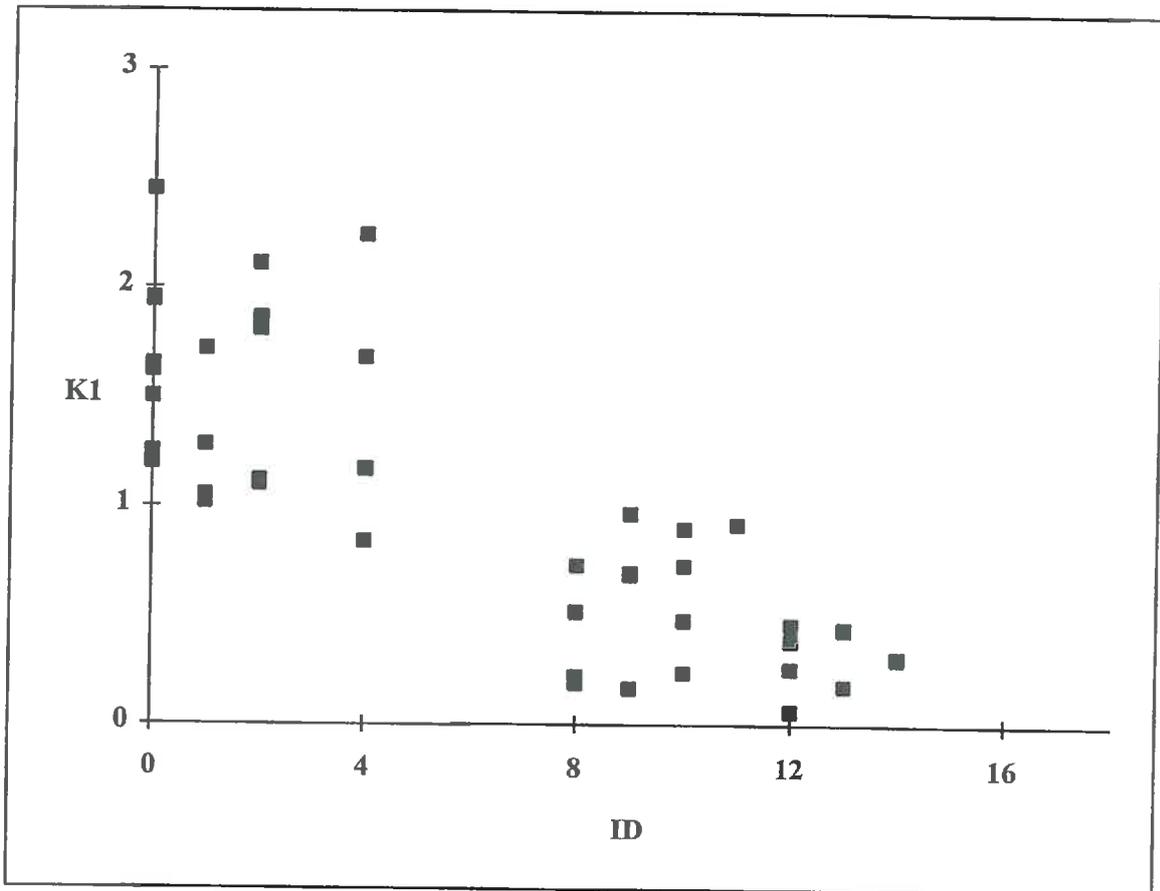
## ANNEXE II - 5



A-II - 5 Figure 1. Relation  $ID = f(\log 10 I_s)$ .

Regression linéaire :  $ID = 4.15 \log(10 I_s) - 0,8$  ;  $[R^2 = 0,43 ; n = 30]$ .

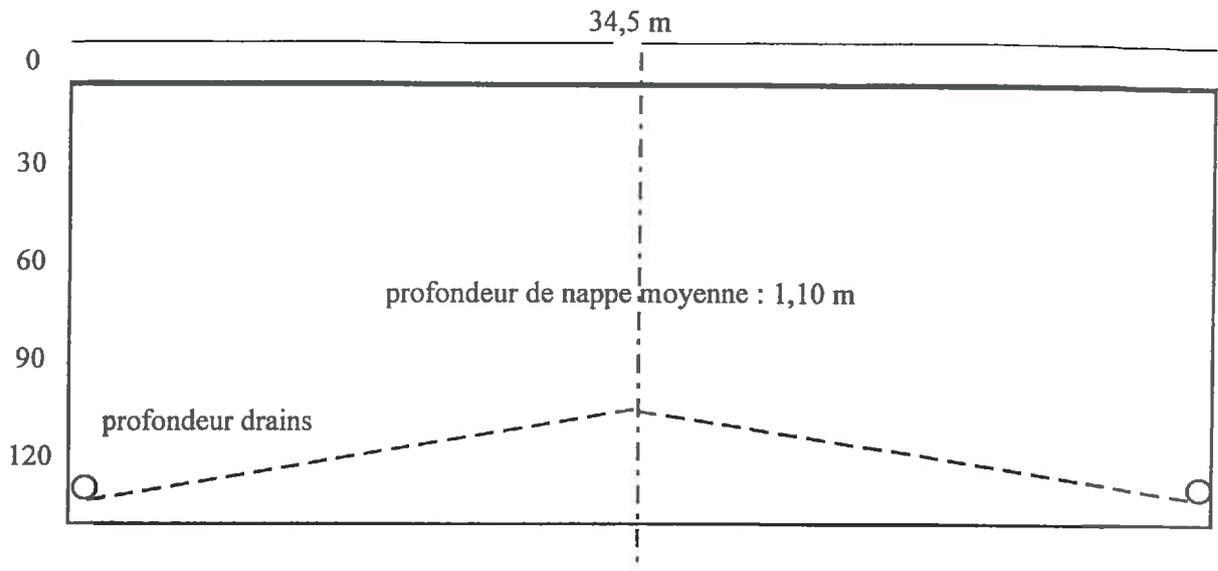
ANNEXE II - 5



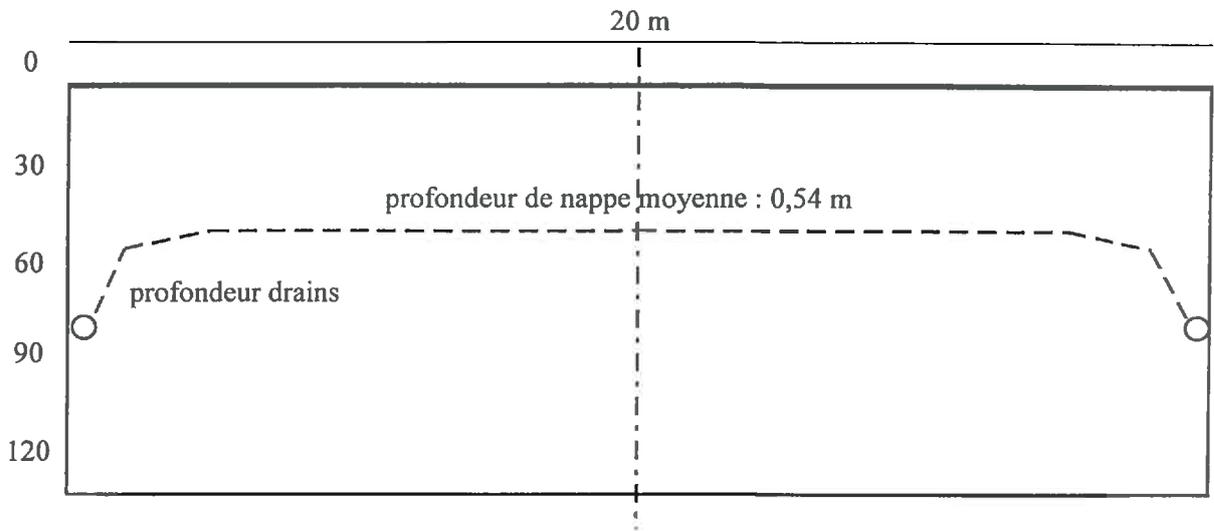
A-II - 5 Figure 2. Relation  $K1 = f(ID)$ .  
Regression linéaire :  $K1 = -0,11 ID + 1,7$ . [ $R^2 = 0,66$  ;  $n = 42$ ].

# ANNEXE III - 1

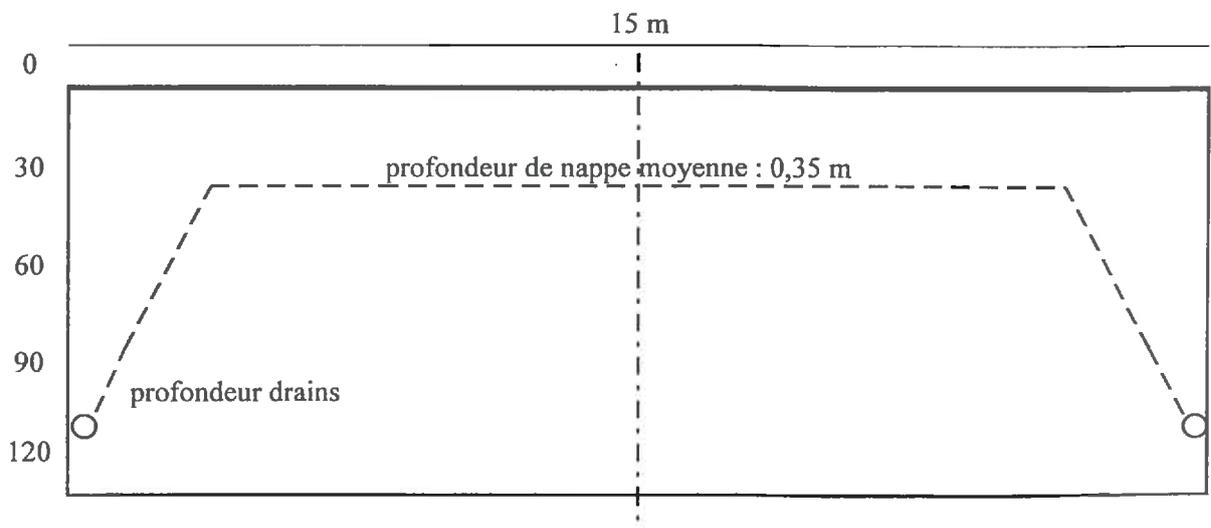
-A-  
Profil  
stable  
(type 1)



-B-  
Profil  
intermédiaire  
(type 8)



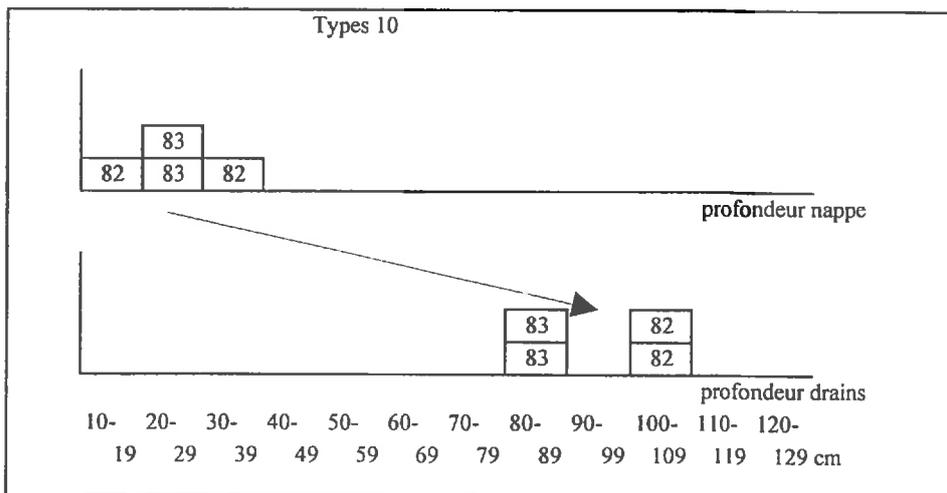
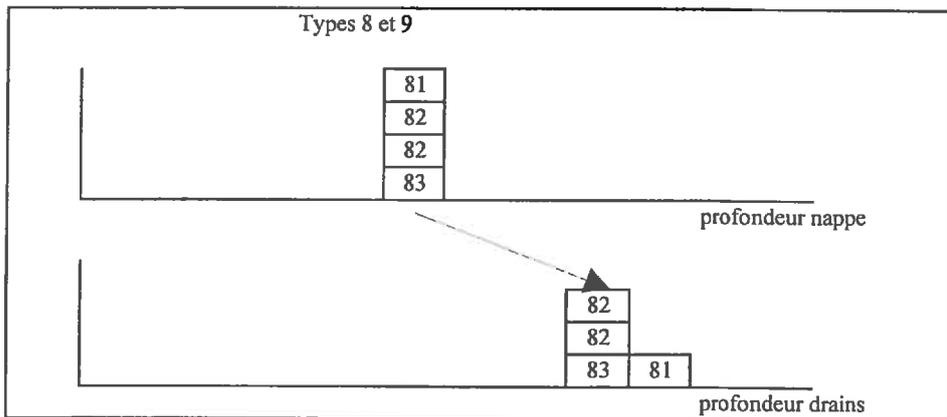
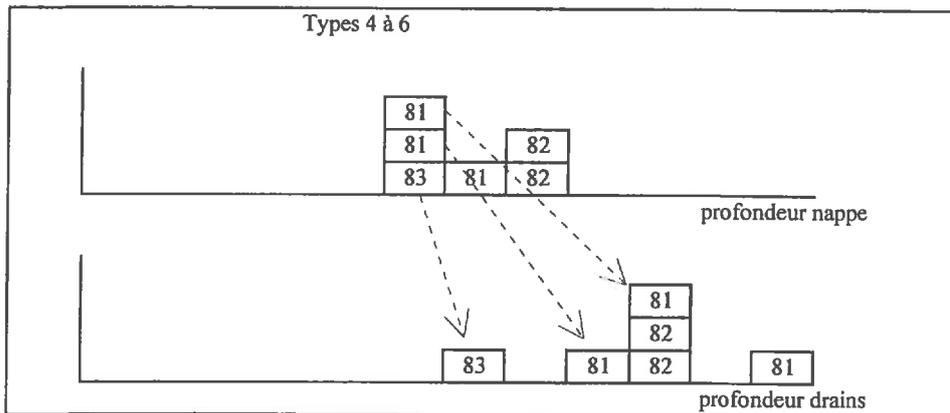
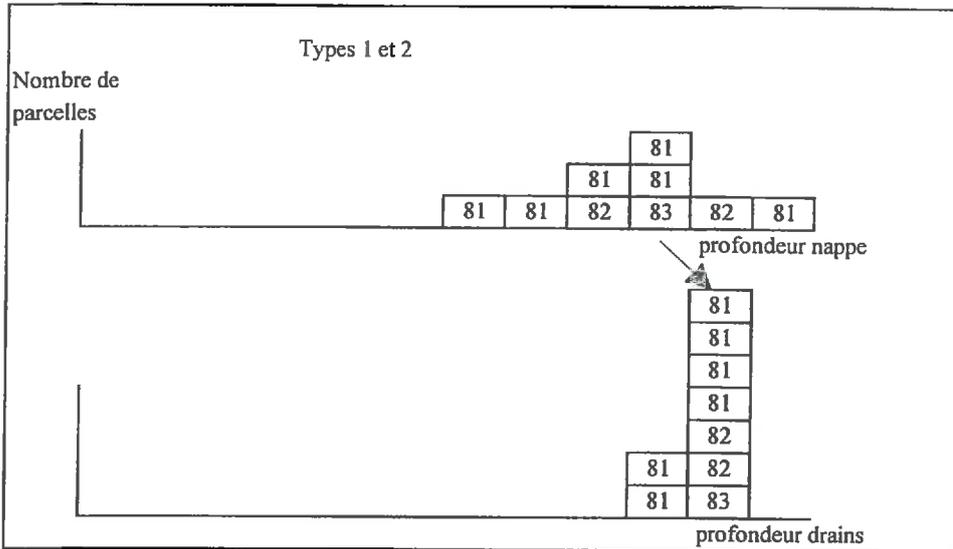
-C-  
Profil  
instable  
(type 10)



Formes de nappe en période saturée (moyenne sur un hiver) d'après Collas (1985).

-A-, -B-, -C- : profils stable, intermédiaire, instable.

## ANNEXE III- 2



Histogrammes des profondeurs de nappe et des drains selon les types de sols et les années.

ANNEXE III - 3

				Parcelles	E10	A80	A6	MC5	MB30	LS	DeG	F20	CC10	A70	PF
				N°	37'	28	20	5	1	19	2	37	21	27	6
				ID 0-30 cm	12	7	4	0	0	3	2	9	8	8	0
				Précédent	BLE	BLE	ME	ME	ME	TO	TO	TO	TO	MG	MG
Bilan climatique				Cc											
dates	P	ETP	P-ETP	Cumul P-ETP à/c TO											
Aout 28	0.4	2.6	-2.2												
29	0	2.9	-2.9		Chi										
30	0	3.4	-3.4												
31	0	3.4	-3.4												
sep-01		4	-4.5												
2		4.5	-3.6												
3		3.6	-1.3												
4	7.1	1.3	4.2												
5	0.2	2.9	-3.1												
6	0	3.3	-3.8												
7	0	3.8	-1.4												
8	0.5	1.4	-2.3												
9	0.9	2.8	-1		Chi										
10	2.6	1.9	1.2												
11	0	1.4	-1.5												
12	3.5	1.5	1												
13	0	2.5	-2												
14	0	2	-2.8												
15	0	2.8	-3												
16	0.3	3	-2.3						M: ME						
17	0	2.6	-2.6						Chb						
18	0.7	3.2	-2.5						Ch						
19	1.3	1.2	11.8												
20	5.8	0.9	16.7												
21	6.1	2.7	20.1												
22	0.8	2.5	18.4												
23	0	2.3	16.1		H										
24	0	2.3	13.8												
25	0	2.5	11.3												
26	0	2.3	9												
27	0.4	1.3	8.1												
28	0	1.7	6.4												
29	0	1.7	4.7												
30	0	1	3.7												
oct-01	0	1.5	2.2												
Groupe	Porosité														
I	forte														
II	moyenne														
III (travail profond)	faible														
IV (travail superficiel)	faible														
V	très faible														
11	4.5	0.9	51.7												
12	0	1.4	50.3												
13	2.8	1	52.1												
14	2.6	1.3	53.4												
15	11.5	0.8	64.1												
16	18.3	0.6	81.8												
17	5.5	0.9	86.4												
18	0	1.2	85.2												
19	0	0.7	84.5												
20	0	1.3	83.2												
21	0.5	1.1	82.6												
22	16.1	1.2	97.3												
23	5.8	1.1	102.2												
24	7.7	0.6	109.3												
25	0	0.8	108.5												
26	0.1	0.6	108												
27	0	1.3	106.7												
28	0.5	1.1	106.1												
29	0	0.5	105.6												
30	0	0.7	104.9												
31	0	0.7	104.2												
nov-01	0	1	103.2												
2	0	0.8	102.4												
3	0	1.3	101.1												
4	0	0.7	100.4												
5	0	0.6	99.8												
6	0	0.7	99.1												
7	5.7	0.8	104												
8	2.6	0.5	106.1												
9	0.1	0.4	105.8												
10	0	0.4	105.4												
11	6.2	0.3	111.3												
12	0	0.6	110.7												
13	0	0.1	110.6												
14	2.3	0.5	112.4												
ITK N°					2	3	1	7	7	9	8	12	13	7	16
groupe/porosité					I	II	I	II	II	II	III	IV	V	II	V
groupe/taille mottes surface					G	M	G	P	P	G	P	P	P	P	M

III - 3 Tableau 1. Campagne 1980-81. Bilan climatique, précédents et modalités de travail du sol.

- Interventions : outils
- M : récolte
  - Br : broyage
  - Cc : cover-crop
  - Rota : rotavator
  - Chi : chisel
  - Chb : charrue-bêche
  - Ch : charrue
  - Cv : cultivateur
  - Vb : vibroculteur
  - H : herse animée
  - S : semis
  - H-S : semis combiné
  - Ht herse trainée
  - Ck crosskill
  - Gyp : gypse

- Cultures
- BLE : blé tendre
  - AVO : avoine
  - FEV : féverole
  - JAC : jachère
  - ME : maïs ensilage
  - MG : maïs grain
  - TO : toumesol

- Groupes d'ITK
- Par rapport à la porosité attendue de la couche travaillée
- Groupe I forte
  - Groupe II moyenne
  - Groupe III (travail profond) faible
  - Groupe IV (travail superficiel) faible
  - Groupe V très faible

- Par rapport à la taille attendue des mottes de surface
- Groupe G > 8 cm
  - Groupe M 4 à 8
  - Groupe P < 4

- Etat sec
- Réhumecté
- Humide

ANNEXE III-3

Parcelles N° ID 0-30 cm Précédent	A7F	A7B	A8	DGF60	GG	G0G	BES	GAR	BUL	MIG	GAT	MEN	OUV
	25 6	24 4	32 4	30 8	33 8	34 12	31 6/8	13 3	9 2	4 2	14 2	8 0	29 7
dates	Bilan climatique												
	P	ETP	P-ETP	Cumul P-ETP à/c TO									
août-08	1.3	2.2	-0.9		Chb	Chb							
9	0	4.7	-4.7										
10	0	3.4	-3.4										
11	0	4.9	-4.9			Chb							
20	4.9	2.3	2.6										
24	0	4.2	-4.2										
25	0	4.7	-4.7										
26	0	4.7	-4.7										
27	0	5.1	-5.1										
28	0	4.8	-4.8										
29	0	4.7	-4.7										
30	5.6	2.5	3.1										
31	0.4	2.1	-1.7										
sep-01	0	2.8	-2.8			Chi							
2	0	3.1	-3.1										
3	0	2.8	-2.8				Chi	Chi					
4	0	3.7	-3.7										
5	0	3.9	-3.9										
6	0	3.2	-3.2						Chi				
7	0	3.4	-3.4										
8	0	1.6	-1.6										
9	0	2.1	-2.1										
10	1.5	2.3	-0.8										
11	0	2.8	-2.8										
12	6	2	4										
13	0	2.3	-2.3										
14	0	2	-2										
15	2.1	1.2	0.9		Ck	Ck	Ck						
16	0	2.5	-2.5										
17	0.3	3.1	-2.8										
18	3.2	1.5	1.7										
19	0.4	1.6	-1.2										
20	0.2	2.5	-2.3										
21	6.6	2.3	4.3	4.3									
22	0.2	1.3	-1	3.3									
23	0	2.2	-2.2	1.1									
24	14.1	1.9	12.2	13.3									
25	19.5	2.7	16.8	30.1									
26	21.2	2.1	19.1	49.2									
27	9.4	1.9	7.5	56.7									
28	0	1.9	-1.9	54.8									
29	0	1.2	-1.2	53.6									
30	7.2	2.9	4.3	57.9									
oct-01	11.1	1.7	9.4	67.3									
2	20.3	1.9	18.4	85.7									
3	1.2	1.6	-0.4	85.3									
4	3.8	1.2	2.6	87.9									
5	16.2	1.2	15	102.9									
6	0	2.5	-2.5	100.4									
7	0	1.7	-1.7	98.7									
8	0	1.8	-1.8	96.9									
9	1.2	0.9	0.3	97.2									
10	6.2	2	4.2	101.4									
11	6	1.8	1.2	105.6									
12	0.2	0.9	-0.7	104.9									
13	6.5	1.4	5.1	110									
14	15	0.6	14.4	124.4									
15	1.2	1.2	0	124.4									
16	0.6	1	-0.4	124									
17	0	1.8	-1.8	122.2									
18	0	1.5	-1.5	120.7									
19	0	1.1	-1.1	119.6									
20	1.2	0.8	0.4	120									
21	1.3	0.9	0.4	120.4									
22	3	0.5	2.5	122.9									
23	0	0.5	-0.5	122.4									
24	6.9	0.7	6.2	128.6									
25	13.2	1.2	12	140.6									
26	1.4	1.4	0	140.6									
27	5.4	0.4	5	145.6									
28	0	0.7	-0.7	144.9									
29	20.4	1.3	19.1	164									
30	7	0.4	6.6	170.6									
31	1.2	0.5	0.7	171.3									
nov-01	0.3	0.5	-0.2	171.1									
2	0	0.8	-0.8	170.3									
3	0	0.5	-0.5	169.8									
4	0	0.4	-0.4	169.4									
5	0	0.7	-0.7	168.7									
6	0	0.7	-0.7	168									
7	0	0.7	-0.7	167.3									
8	0	1.1	-1.1	166.2									
9	0	0.7	-0.7	165.5									
10	0	0.4	-0.4	163.1									
11	0	0.3	-0.3	164.8									
12	0	0.3	-0.3	164.5									
13	0	0.4	-0.4	164.1									
14	0	0.1	-0.1	164									
15	0	0.2	-0.2	163.8									
16	0	0.5	-0.5	163.3									
17	0	0.3	-0.3	163									
18	0	0.2	-0.2	162.8									
19	0	0.6	-0.6	162.2									
20	0	0.2	-0.2	162									
21	0	0.2	-0.2	161.8									
22	0.3	0.1	0.2	162									

A-III - 3 - Tableau 2. Campagne 1981-82.  
Bilan climatique, précédents et modalités de travail du sol.

- Interventions : outils  
M : récolte  
Br : broyage  
Cc : cover-crop  
Rota : rotavator  
Chi : chisel  
Chb : charrue-bêche  
Ch : charrue  
Cv : cultivateur  
Vb : vibroculteur  
H : herse animée  
S : semis  
H-S : semis combiné  
Ht herse trainée  
Ck crosskill  
Gyp : gypse
- Cultures  
BLE : blé tendre  
AVO : avoine  
FEV : féverole  
JAC : jachère  
ME : maïs ensilage  
MG : maïs grain  
TO : tournesol

Groupes d'ITK	
Par rapport à la porosité attendue de la couche travaillée	
Groupe	Porosité
I	forte
II	moyenne
III (travail profond)	faible
IV (travail superficiel)	faible
V	très faible
Par rapport à la taille attendue des mottes de surface	
Groupe	Taille mottes (cm)
G	> 8 cm
M	4 à 8
P	< 4

Etat sec	
Réhumecté	
Humide	

ANNEXE III-3

A-III - 3 - Tableau 3. Campagne 1982-83.  
Bilan climatique, précédents et modalités de travail du sol.

Interventions : outils

- M : récolte
- Br : broyage
- Cc : cover-crop
- Rota : rotavator
- Chi : chisel
- Chb : charrue-bêche
- Ch : charrue
- Cv : cultivateur
- Vb : vibroculteur
- H : herse animée
- S : semis
- H-S : semis combiné
- Ht herse trainée
- Ck crosskill
- Gyp : gypse

Cultures

- BLE : blé tendre
- AVO : avoine
- FEV : féverole
- JAC : jachère
- ME : maïs ensilage
- MG : maïs grain
- TO : tourmesol

Groupes d'ITK

Par rapport à la porosité

attendue de la couche travaillée

- | Groupe                   | Porosité    |
|--------------------------|-------------|
| I                        | forte       |
| II                       | moyenne     |
| III (travail profond)    | faible      |
| IV (travail superficiel) | faible      |
| V                        | très faible |

Par rapport à la taille attendue des mottes de surface

- | Groupe | Taille mottes (cm) |
|--------|--------------------|
| G      | > 8 cm             |
| M      | 4 à 8              |
| P      | < 4                |

Etat sec	
Réhumecté	
Humide	

Parcelles N° ID 0-30 cm Précédent	Bilan climatique				A7 26 6 AVO	BG 35 8 JAC	BT 36 10 JAC	BES 22 6 FEV	BUL 10 2 MG	GAT 15 0 TO
	dates	P	ETP	P-ETP						
aoù-03	0	4.3	-4.3		Chb					
....	8	2.7	2.8	-0.1						
....	12	0	2.8	-2.8		H	H			
....	20	1.2	2	-0.8		Chi	Chi	SS		
....	21	0.4	3.3	-2.9				Chi		
....	31	10.1	1.3	8.8						
sep-01	2	3.3	2.2	1.1	Cc					
....	2	1.9	2.5	-0.6						
....	3	0.1	3	-2.9						
....	4	0.3	3.2	-2.9						
....	5	0.5	1.1	-0.6						
....	6	0	1.5	-1.5						
....	7	0	3.6	-3.6						
....	8	2.2	2.8	-0.6						
....	9	2.1	2.1	0						
....	10	5.9	3.4	2.5					M : MG	
....	11	0.2	2.3	-2.1						
....	14	2	2.9	-0.9						
TO	15	13.1	2.1	11						
....	16	17.1	2.8	14.3						
....	17	0	2.2	-2.2						
....	18	0.3	2.3	-2.2						
....	19	10.2	0.9	9.3						
....	20	0	2.1	-2.1					Ch	
....	25	0	3	-3						M TO
....	26	0	2.1	-2.1						
....	27	0	2.2	-2.2		gypsc				Ch
....	28	0	2.4	-2.4						
....	29	0	2.8	-2.8						
....	30	0	2.5	-2.5						
....	oct-01	11.1	1.7	9.4						
....	2	20.3	1.8	18.5						
....	3	1.2	2.9	-1.7						
....	4	3.8	3.1	0.7						
....	5	16.2	1.6	14.6						
....	9	1.2	1.1	0.1						
....	10	6.2	0.9	5.3						
....	11	6	1.5	4.5						
....	12	0.2	1.7	-1.5						
....	13	6.5	1.8	4.7						
TO	14	15	1	14						
....	15	1.2	1.6	-0.4						
....	24	6.9	1	5.9						
....	25	13.2	0.9	12.3						
....	26	1.4	0.8	0.6						
....	27	5.4	0.7	4.7						
....	28	0	0.7	-0.7						
....	29	20.4	0.9	19.5						
....	30	7	0.7	6.3						
....	31	1.2	0.3	0.9						
....	nov-01	0	0.6	-0.6						
....	2	0	0.9	-0.9					H-S	H-S
....	3	0	0.8	-0.8	H-S			H-S		
....	4	0	0.7	-0.7					Ht	
....	5	0	0.6	-0.6				Ht		
....	6	0	0.7	-0.7						
....	7	0	1.7	-1.7						
....	8	0	1.5	-1.5		H-S	H-S			
....	9	0	1.1	-1.1						
....	23	0.3	0.6	-0.3						
....	24	0.7	0	0.7						
....	25	10.1	0.7	9.4						
....	26	12.2	0.4	11.8						
....	27	4.1	1.1	3						
ITK N°					I	2	2	4	7	6
groupe/porosité					I	I	I	II	II	I
groupe/taille mottes surface					G	G	G	M	P	M

**Annexe III- 4**

**Les types de sol et les modalités de travail du sol : dispositif d'étude.**  
**Les parcelles sont identifiées par leur N° et caractérisées par les précédents (BLE, AVO, FEV, TO, ME, MG:**  
**blé, avoine, féverole, maïs ensilage, maïs grain), la stabilité de la couche travaillée (types de sol) et les**  
**modalités de travail du sol pratiquées (ITK) pendant les trois campagnes.**

Types de sol :		1 à 6		8 et 9		10				
ID 0-30 :		< 4		4 à 6		7/9		instable >= 10		
Travail après récolte	Nombre de reprises en condition sèche ou réhumectée	ITK N°	Groupes ITK par rapport à porosité mottes surface		année				Nb	
<b>profond (30 cm)</b>										
sec	1	1	1	I	G	1981	20	(ME)		1
						1982	23	(BLE)		
							24/25	(BL/FV)		3
						1983	26	(AVO)		1
	0	1	2	I	G	1981			31 (BLE)	37' (BLE)
						1982			35 (AVO)	36 (AVO)
					1983					2
	1	2	3	II	M	1981			28 (BLE)	
						1982			33 (AVO)	34 (AVO)
	0	2	4	II	M	1983	22	(FEV)		
	0	3	5	III	M	1982			30 (AVO)	
réhu- mectée		1	6	I	M	1982	9	(MG)		
						1983	15	(TO)		
		2	7	II	M	1981	1	(ME)	27	(MG)
							5	(ME)		
						1983	10	(MG)		
	3	8	III	M	1981	2	(TO)			1
humide	1	9	II	G	1981	19	(TO)			1
	2	10	III	G	1982	4	(ME)			
						14	(TO)			2
<b>superficiel (15 cm)</b>										
sec		2	11	IV	P	1982	13	(ME)		1
réhu- mectée		2	12	IV	P	1981			37 (TO)	1
		3	13	V	P	1981			21 TO(PN)	1
humide	1	14	IV	G	1982				29 (TO)	1
	2	15	V	G	1982	8	(TO)			1
<b>semis direct</b>										
		16	V	P	1981	6	(MG)			1
						12		6		9
								3		30

## Annexe III-5

### **Démarche pour le pronostic de la porosité de la couche travaillée** **Typologie des modalités de travail du sol pour le semis de blé.**

Le but de cette démarche est de *classer* l'ensemble des pratiques grâce à une typologie dont la finalité est de juger l'aptitude de la couche travaillée à la circulation de l'eau pendant la période d'excès. Cette aptitude sera jugée favorable si la porosité de la surface et de la couche travaillée sont élevées. 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 soit la circulation de l'eau et la densité d'enracinement dans la couche travaillée soit la levée (diamètre des mottes en surface).

Sa construction s'appuie sur les travaux de Collectif (1980), Pellerin (1984) et Laporte et al. (1984), Manichon (1988). 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. Ainsi, Pellerin (1984) 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) (Tableau 1).

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). Le but de cette démarche étant de *classer* les 16 modalités de travail du sol par rapport à la porosité attendue lors du semis de blé, nous faisons les hypothèses (simplificatrices) suivantes :

**A-III - 5 Tableau 1. Les propriétés physiques et l'état hydrique du profil en fin d'été. Conséquences sur l'effet de la date de labour sur l'état créé par le travail profond et sur les possibilités de fissuration (inspiré de Pellerin, 1984).**

Etat hydrique du profil	T0			T60	T120/T160	Somme de (P-ETP) →
	sec	réhumecté	humide	limite de portance		
<i>Propriétés mécaniques du sol</i>	Résistance mécanique très forte	Résistance mécanique minimum	Adhésivité forte, plasticité			
<i>Conséquences sur l'état créé par le travail profond (labour)</i>	Fragmentation faible	Fragmentation forte	Pas de fragmentation (moulage)			
Taille des mottes	Blocs > 20 cm	Mottes hétérogènes 10/15 cm	Pas de motte			
Tassement	nul	faible	maximum			
<i>Possibilité d'évolution par fissuration du sol</i>	Forte	Moyenne	nulle			

**A-III - 5 Tableau 2. Effet du précédent sur les modalités de travail du sol après récolte. Evaluation grossière du volume des zones tassées et non remaniées pour pronostiquer les effets sur la circulation de l'eau et l'enracinement.**

Conséquences attendues sur			Porosité créée		% de zones tassées ou non remaniées sur 0 - 30 cm			Circulation de l'eau dans le sol	Enracinement
			quantité	tassement	(a) tassées	(b) non remaniées	(a) + (b)		
Récolte	Caractéristiques et conditions du travail du sol après récolte Potentiel de fissuration								
Cultures hiver ou printemps à récolte très précoce	Travail profond (0 - 30 cm)								
	sec	++	Forte	nul	0	0	0	++	++
Cultures de printemps et récoltes de plus en plus tardives	réhumecté		Forte	faible	# 0	0	0	++	++
	humide		Forte (creux)	fort bande labour lissage	#30	0	30	-	-
	Travail superficiel (0-15 cm)								
	sec		moyenne	nul	0	50	50	=	=
	réhumecté		moyenne	faible	# 0	50	# 50	=	=
	humide		moyenne (creux)	fort lissage	#30 % de la zone 0 -15 cm	50	# 65	-	-
	Semis direct (0 - 6 cm)								
	humide		nulle	hétérogène	20	90	> 90	0	-

**A-III - 5 Tableau 3. Effets attendus des reprises sur -a- le pourcentage de zones tassées et non remaniées et sur -b- l'état de surface (taille des mottes) après le travail du sol qui suit la récolte. Le rapport de la largeur des passages de roue par rapport à la largeur d'outil est d'environ 25 %. Lorsque on reprend en condition humide on suppose qu'on repasse sur les mêmes passages de roues (premier chiffre) ou non ((deuxième chiffre). Entre parenthèses le n° d'ITK**

Situations rencontrées

Effets attendus sur		-a- % zones tassées ou non remaniées			-b- l'état de surface : taille des mottes (cm)				
initiale		après reprises en condition			initiale				
		sèche ou réhumectée			sèche réhumectée ou humide				
		(1)	1	2	3	(1)	1	2	3
Caractéristiques et conditions du travail du sol après récolte	Potentiel de fissuration								
Travail profond (0 - 30 cm)									
sec	++	0	oui	25	25/50	> 20	15/20	7/9	5/6
				(1)	(3)	aplani	(1)	(3)	
		0	non	25	25/50	> 20	16/25	8/12	5/8
				(2)	(4)		(2)	(4)	(5)
réhumecté humide	+	0		25	25/50	10	7	6	6
				(6)	(7)		(6)	(7)	(8)
	0	30		55	55/80	bandes	> 8	> 8	
				(9)	(10)		(9)	(10)	
mottes lissées									
Travail superficiel (0-15 cm)									
sec	++	50	50		63/75	10/15	5/7	3/4	
					(11)		aplani	(11)	
réhumecté humide	+	50	50		63/75	5/8	3/5	3/5	3/4
					(12)			(12)	(13)
	0	65		78	78/90	mottes lissées	> 8	> 8	
				(14)	(15)		(14)	(15)	
mottes lissées									
Semis direct (0 - 6 cm)									
humide	0	>90		95					
				(16)					(16)

\* Les zones défavorables à la circulation de l'eau dans le sol sont les zones tassées et non remaniées par le travail de l'année.

\* Le travail profond est réalisé à 30 cm environ, les reprises concernent la moitié de la profondeur du travail profond.

\* Le tassement est provoqué par le travail en condition humide. Pour le labour, on peut estimer le volume tassé à 30 % du volume de la couche travaillée (bandes de labour). Le volume tassé par les reprises est proportionnel au rapport largeur de passage de roue / largeur de travail de l'outil (Manichon, 1988). Il est de l'ordre de 25 % pour l'ensemble des parcelles. Il est proportionnel au nombre de passages si on suppose qu'on ne repasse pas sur les zones tassées une première fois. On fait ainsi une surestimation des volumes tassés. S'il y a passage toujours au même endroit, le volume tassé est constant et égal à celui d'un passage (25 %).

\* Le potentiel de fissuration se réduit au fur et à mesure de la réhumectation jusqu'à devenir nul en condition humide. C'est pour tenir compte de ce phénomène que nous prévoyons une division importante de la première reprise (réduction de moitié de la taille des mottes) puis une division moins importante à la deuxième (réduction du 1/3) pour être pratiquement nulle à la 3<sup>ème</sup> reprise en condition humide (réduction de 10 %).

Ceci aboutit à classer (Tableau 3) puis à regrouper les ITK (Tableau 4) qui produisent des états prévus proches.

L'état de surface sera d'autant plus favorable à la circulation des fluides qu'il y aura des mottes en surface et qu'elles se maintiendront 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 : état G mottes > 8 cm, M mottes comprises entre 4 et 8 cm, P mottes < 4 cm.

Si nous jugeons l'état de surface par rapport à l'aptitude à la levée, le classement sera inverse. Le groupe P est favorable, M peu favorable et G défavorable à la levée.

Ces ensembles d'hypothèses nous amènent à pronostiquer une contradiction entre assurer une bonne perméabilité de surface et réaliser un lit de semence favorable à la levée.

**A-III - 5 Tableau 4. Regroupement des ITK ayant des états proches par rapport -a- au volume de zones non remaniées et tassées (chiffres romains) et -b- à la taille des mottes en surface (G : mottes > 8 cm, M : mottes comprises entre 4 et 8 cm, P : mottes < 4 cm).**

Effets attendus sur	initiale	-a- % zones tassées ou non remaniées après reprises en condition			-b- l'état de surface : taille des mottes			
		sèche ou réhumectée (1)	1	2	3	initiale sèche (1)	après reprises réhumectée ou humide cm 1 2	
<b>Caractéristiques et conditions du travail du sol après récolte</b>								
<b>Travail profond (0 - 30 cm)</b>								
sec	0	0	25 I	25/50 II			> 20	G M
	0	0	25	25/50	25/75			G M
réhumecté	0	#0	25 I	25/50 II	25/75 III		10/15	M M
humide	30		55 II	50/80 III			bandes	G G mottes lissées
<b>Travail superficiel (0-15 cm)</b>								
réhumecté	50	50		63/75 IV	63/87 V		5/8	P
humide	65		78 IV	78/90 V			mottes lissées	G G mottes lissées
<b>Semis direct (0 - 6 cm)</b>								
humide	>90		90 V					P

## ANNEXE III - 6

## A- LA DESCRIPTION DES ETATS STRUCTURAUX

## 1- Identification des différents horizons par rapport à leur origine :

On distinguera les états structuraux "naturels" c'est-à-dire résultant de l'action des agents "naturels" (climat x sol x végétation) de ceux créés qui résultent de l'action de diverses interventions mécaniques sur la parcelle.

On désignera les divers horizons de la façon suivante :

H	Horizon profondeur (cm)	Origine	
		si sol travaillé	si prairie naturelle
H0	0 surface du sol	travail du sol + climat	mat = débris végétaux 0 - 8 cm.
H20	< H50	reprises de labour, façons superficielles + climat	pédologique enracinement dense (8 - 15 cm)
H50	25 à 30	travail profond non repris de l'année, + climat	
H51	> H50	d'une année antérieure. + climat	
H60	> H51	travail très profond de l'année	
H61	40 à 60	ou d'une année antérieure (sous solage, taupage)	
H70	>H60	pédologique	pédologique avec racines (jusqu'à 50-70 cm)
H71	> H70	pédologique	pédologique sans racine
H72		pédologique	pédologique sans racine
H73		pédologique	pédologique sans racine

## 2- Etat structural de la couche travaillée : les divers niveaux d'organisation et leur état.

Il est le résultat de l'action des outils de travail du sol; nous sommes en présence d'un horizon constitué d'un assemblage d'éléments structuraux plus ou moins homogène. Cet état a été décrit par Manichon (1982 a, b), Manichon 1986, Gautronneau et Manichon (1987), Manichon et Lestrade (1990). Il a été utilisé par Pellerin (1984) dans les sols de marais. Ces auteurs décrivent la technique de description de l'état structural en déterminant trois niveaux d'organisation de la structure : l'état interne des mottes, le mode d'assemblage des mottes et enfin le regroupement des modes d'assemblage.

### a- Mode d'assemblage des mottes :

- Un seul élément structural : Structure continue : *Massif* (M);
- Plusieurs éléments structuraux :
- Soudés entre eux : *Difficilement discernables* (SD), *Facilement discernables* (SF),
- Individualisés : *Fragmentaires* (F).

### b- Etat interne des mottes

*Delta* : Aspect continu, les faces de fragmentation sont peu rugueuses, de forme conchoïdale. Porosité structurale nulle, la porosité tend vers la porosité texturale. Résulte d'un compactage sévère d'origine anthropique ; cohésion élevée en sec.

*Phi* : Proche de Delta, mais contient des amorces de fissures, révélées lors des essais de fragmentation (cas des matériaux ayant une certaine aptitude à la fissuration). Résulte typiquement de l'action du gel.

*Gamma* : Les agrégats dont la morphologie est variable (en relation avec la texture et les agents naturels), sont discernables dans les mottes. Rugosité assez importante des faces de fragmentation des mottes. Porosité structurale non nulle assez variable. Cohésion plus faible que Delta.

### c- Regroupement des modes d'assemblage.

\* *Type o* : Dominance de modes d'assemblage F et SF sans motte décimétrique, ni cavité importante (V). Terre fine abondante. Typiquement : bande "labour" fortement émietlée.

\* *Type b* : Dominance de M et FV mottes décimétriques, séparées par des cavités structurales importantes. Peu de terre fine. Typiquement : bande de labour peu fragmentée (grosses mottes).

\* *Type c* : Pas de discontinuité structurale notable, dominance de M et SD. Typiquement : effet de compactage post "labour" sur terre très fortement émietlée.

Cette description de l'organisation de la structure permet de discuter des divers types de porosité de la couche travaillée, de leur origine et de leur fonction vis-à-vis de la circulation des fluides et du passage des racines.

### 3 - L'état structural et la notation de la porosité :

#### 3 -1- Rappel des divers types de porosité et de leur origine

Origine	Eléments concernés par la description	Type de porosité
1 Matériau	Texture	Très fine porosité texturale
2 Etat structural	Etat interne des mottes	Variable (fine) porosité structurale
	Arrangement des éléments	Variable porosité structurale
3 Biologique	Trous et canaux de vers de terre ; passage d'anciennes racines	Présence/ absence, abondance. porosité biologique
4 Sédimentaire	Lit de coquilles Lit de sable	Présence/ absence porosité sédimentaire

La porosité globale d'un horizon c'est la somme (1)+(2)+(3)+(4).

Pour la couche travaillée, l'observation de l'état structural conduit à évaluer la porosité structurale (2), à travers la description de l'état interne des mottes et de leur arrangement. La texture du matériau étant homogène, la porosité texturale (1) est supposée constante. On note donc la porosité utile aux racines.

Pour les horizons d'origine pédologique nous aurons un état structural plus homogène. La porosité globale de l'horizon sera appréciée en analysant chacune des composantes de la porosité.

Porosité texturale + porosité structurale + porosité biologique + porosité sédimentaire.

Ainsi la *porosité globale* d'un horizon sera toujours  $> ou =$  à sa *porosité structurale*.

A-III - 6 Tableau 1. 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	Profondeur (cm)	QUALIFICATIF DE LA STRUCTURE pour une zone structurale homogène.	note de porosité	Symbole	Manichon (1982) Mode d'assemblage Etat interne	
<u>H20</u>	<u>0-6 à 0-15 cm</u>	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	
<u>H50</u>	<u>6 à 30 cm</u>	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, entraînement 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	Mf + vides PHI DELTA	Phi (Delta)
		Massif plastique (très humide) Sous structure non visible Plus ou moins compact selon les tassements Vides rares	1	M	M C+V DELTA	Mpl  DELTA

**A-III - 6 Tableau 1 (suite). Description des états structuraux et définition des notes de porosité dans les profils de sols de marais en fin d'hiver.**

Horizon	Profondeur (cm)	QUALIFICATIF DE LA STRUCTURE pour une zone structurale homogène.	note de porosité	Symbole	Manichon (1982) Mode d'assemblage Etat interne	
<u>H60 H61</u>	<u>20 à 35 cm</u>	Massif transition H50 H70 Fissuration interne très forte Ponctuation interne forte  Si sous structure existe, humide, ponctuation forte.  Si sous structure peu visible, peu fissuré, très humide, plastique ponctuation faible	1+  1	M SD PHI  M SD DELTA	M SD  M SD	PHI  DELTA
<u>H70 cm</u>	<u>&gt; 35</u>	Massif fissuré Fortement fissuré et ponctué Bcp de vers de terre  SS petite  Massif fissuré Très fissuré et ponctué peu de vers de terre  SS moyenne  Massif fissuré peu fissuré et ponctué pas de vers de terre Compact  SS absente	1+  1  1-	Mf  Mf	Mf  Mf	DELTA (Phi)  DELTA (Phi)  DELTA (Phi)

### **3-2- Note de porosité structurale.**

On peut affecter une note de porosité à chacun des arrangements structuraux décrits. Cette correspondance est issue de la description de plus d'une centaine de profils faite en fin d'hiver début printemps.

Le tableau 1 donne la description des diverses zones structurales homogènes. On remarquera que la note de porosité peut aller de 0 à 4, mais que la gamme de note se réduit au fur et à mesure que la profondeur augmente. On tient ainsi compte de la gamme restreinte de porosité que l'on trouve dans le sous-sol par rapport à celle observée dans la couche travaillée et à fortiori par rapport à l'état de surface. Normalement on observe un gradient de porosité :  $H_0 > H_{20} > H_{50} > H_{60} > H_{70} > H_{71}, \dots$

Il peut exister quelques exceptions : fermeture de la porosité de surface par la dispersion du matériau, présence de lits sédimentaires d'épaisseur centimétrique (lits coquillés).

**3-3- Pour évaluer la porosité des horizons**, il faut ajouter à la *porosité structurale*, les porosités biologique et sédimentaire : présence et abondance de galeries de vers de terre, lits sédimentaires de sable ou de coquillages, chenaux gainés de revêtements ferro-manganiques. On peut alors majorer la porosité structurale de 0.25 à 0.75 point.

A la description de l'état structural au sens strict s'ajoutent des observations révélatrices de l'état physico-chimique, conséquences de l'état structural : présence et abondance de boue dans le profil, de gleys réduits et/ou oxydés. La présence de ces éléments et leur intensité permettent de juger des notes de porosité qui correspondent à un transfert difficile des fluides à travers le profil.

## **4- Les débris végétaux**

Dans la couche travaillée, on observe l'abondance, la nature, la localisation et l'état de décomposition des débris végétaux ainsi que la présence, l'abondance et la localisation du pseudogley.

## B- L'OBSERVATION DE L'ENRACINEMENT.

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 :

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

Le choix de la maille est justifié par un compromis entre le temps d'observation et la stabilité des notations, en particulier effectuées par des observateurs différents. Une maille de 5 x 5 permet de noter les densités sur la base d'impressions visuelles, étalonnées régulièrement par des comptages exacts sur un certain nombre de cases.

### *Profondeur d'enracinement*

La *profondeur d'enracinement* est estimée à partir des profils de densité. Par convention, la profondeur d'enracinement est atteinte lorsqu'on observe moins d'une racine par carré de 10 sur 10 cm.

### Annexe III - 7

**A-III - 7 Tableau 1. Comparaison des porosités observées en fin d'hiver. Effet des modalités de travail du sol et de la stabilité structurale**

**1- Cas des parcelles à stabilité les plus élevées (ID ≤ 3 et 4 ≤ ID ≤ 6).**

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	IV
<b>Stabilité structurale</b>								
Très stable	2.67	2.37	2.29	1.98				
ID ≤ 3	2.76	2.02	2.26	1.62				
(S)		2.12	2.22					
		1.91	2.32					
<b>moyenne</b>	2.72	2.11	2.27	1.80				
	S							
	S							
	S							
	NS							
	NS							
	S							

**2- Cas des parcelles 4 ≤ ID ≤ 6**

Stable 4 ≤ ID ≤ 6	2.70	1.95						
	2.62							
	2.12							
	2.40							
	2.85							
<b>moyenne</b>	2.54	1.95						
	S							
	S							
	S							
	NS							
	NS							
	S							

**3- Cas des parcelles à stabilité intermédiaire et faible (ID ≥ 7)**

Modalités de travail du sol (groupe d'ITK)	porosité prévue de plus en plus faible			Cas particulier	I	II	III=IV	IV
	I	II	III=IV	gypse PN				
intermédiaire	1.91	1.61	1.16	2.67				
et Instable	1.55	1.77	1.60	3.02				
ID > 7		1.60	1.70	2.32				
		1.54						
<b>moyenne</b>	1.73	1.63	1.49	2.67				
	NS							
	NS							
	S							
	NS							
	S							
	S							

## ANNEXE IV- 1

**Modèles et relations établis sur blé (Meynard, 1985, Lariri-Souki et al., 1992).**

Modèle	Phase du cycle	Forme de l'équation	Valeurs des paramètres	
			Blé tendre var. FIDEL. Bassin parisien	Blé dur var. KARIM. Tunisie
<i>Modèles établis en conditions non limitantes (seul le rayonnement intercepté est limitant).</i>				
1	Levée - début montaison	MSA2 = $\alpha$ NP si $\alpha$ NP $\leq$ MSA2 seuil  MSA2 = NP / (a + bNP) si $\alpha$ NP > MSA2 seuil	MSA2 seuil = 60 g/m <sup>2</sup> $\alpha$ = 0,32 g/plante  a = 1.48 g/m <sup>2</sup> b = 8.18 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /g	MSA2 $\leq$ 70 g/m <sup>2</sup> NP $\leq$ 160 pieds/m <sup>2</sup> $\alpha$ = 0.44 g/plante. a = 1.91 g/m <sup>2</sup> b = 4.3 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /g
2	début montaison - épiaison	NE = c MSA2 <sup>d</sup>	c = 181.4  d = 0.274	
3	début montaison - fécondation	NG = u NE + v	u = 15.6  v = 9450	u = 27.2  v = 3759
4	fécondation - maturité	PMG = PMG max si NG $\leq$ NG seuil PMG = m / NG si NG > NG seuil	NG seuil = 19750 grains/m <sup>2</sup> PMGmax = 45.6 g m = 90 x 10 <sup>-5</sup> g/grain	PMGmax = 46.3 g
<i>Modèles valables même en présence de certains facteurs limitants.</i>				
5	fécondation	NG = e PP si pas d'accident à la fécondation	e = 21.5 grains/g	e = 16.6 grains/g

## ANNEXE IV- 2.

### Les conditions climatiques et l'élaboration du rendement.

L'analyse globale des conditions thermiques et hydriques (Tableau 1) montre que la campagne 1981 a été froide, et que l'année 1983 a été très humide par rapport aux deux autres campagnes.

es conditions de semis sont sèches en 1980/81, ré humectées en 1981/82 et humides en 1982/83. Pendant la phase de levée, les pluies sont faibles et les températures basses en 1980 ; les pluies sont faibles et les températures "moyennes" en 1981 ; les pluies sont importantes et les températures élevées en 1982. Du point de vue des conditions climatiques de levée, on peut juger 1980 défavorable, 1982 favorable, 1981 favorable sauf si le semis est suivi par une période sèche (cas des semis entre le 7 et 10 novembre).

Pendant le tallage, le bilan climatique est toujours excédentaire et les températures sont basses. C'est 1982 qui a le bilan le plus excédentaire et la température la plus élevée. 1981 et 1983 sont très voisines pendant cette période.

Lors de la phase montaison-floraison, alors que le bilan est déficitaire en 1981 et très déficitaire en 1982, l'année 1983 se distingue par un excédent climatique important.

**Elaboration du rendement du blé, périodes et conditions climatiques.  
Données décadaires pour les campagnes 1981, 82, 83.**

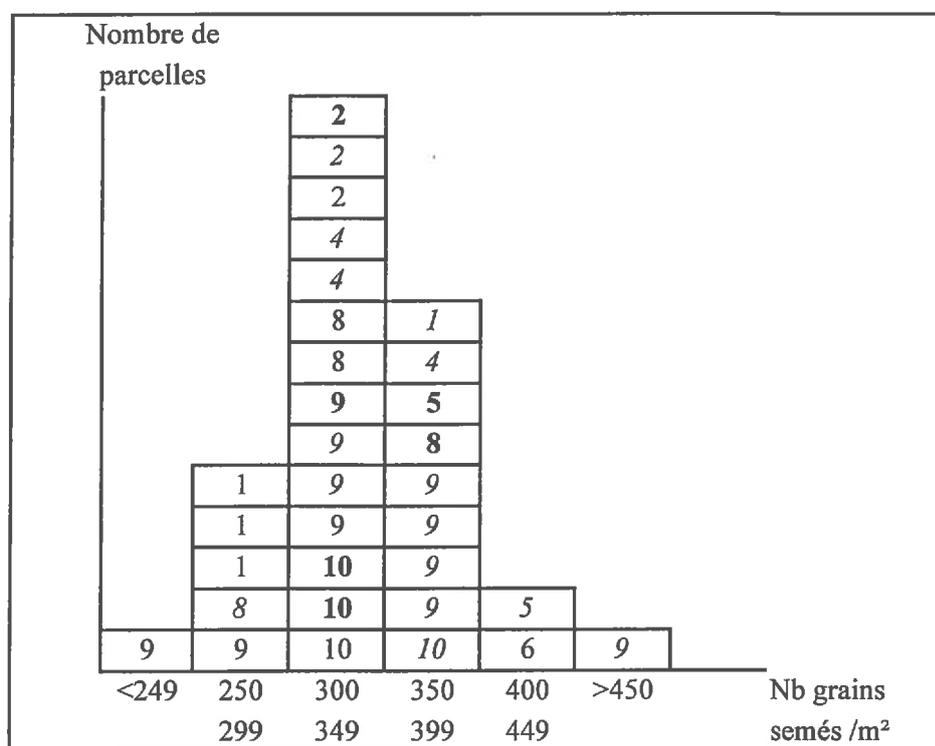
Stade du blé	Composante élaborée	Périodes climatiques	Bilan climatique P - ETP (mm)			Températures moyennes (°C)		
			1981	1982	1983	1981	1982	1983
			*Avant semis		*1/09 au 20/10	0	63	123
*Semis		*21/10 au 21/11	39	42	86	8.4	9.2	12.5
*Levée	NP	*1/11 au 10/12	33	38	163	5.9	8.4	10.0
*début tallage début montaison.	MS st B2	*1/01 au 30/03	73	116	52	6.9	7.8	6.9
*montaison floraison	NE NG	*1/04 au 10/05	-38	-94	87	11.2	10.2	10.8
*formation du grain	PIG	*1/06 au 30/06	-51	-44	-105	16.1	18.1	17.6
Semis à maturité	R	*Nov à fin juin	117	122	368	9.3	10.3	10.0

## ANNEXE IV- 3.

## Analyse des conditions et du taux de levée.

Le peuplement pied (NP) observé est lié au taux de levée d'une part et à la quantité semée (NPS) d'autre part. Le taux de levée, lui, dépend des conditions de levée : état structural du lit de semence et conditions climatiques lors de la phase semis-levée. Il s'agit d'analyser les conditions de levée et le taux de levée pour expliquer le NP.

## 1- La quantité semée (NPS) Fig. 1.

A-IV - 3. Figure 1. Histogramme du nombre de grains semés par m<sup>2</sup>.

x	N° type de sol
---	----------------

Caractère normal : 1981

*italique* : 1982**gras** : 1983

## 2- Les conditions de levée.

### *Conditions climatiques.*

On peut construire une grille d'analyse des conditions de levée pour l'ensemble des situations grâce à deux tableaux. Le tableau 1 analyse les conditions climatiques lors de la période semis-levée des différentes campagnes (pluviométrie et température moyenne). Il permet de juger les conditions climatiques de levée : 1980 est défavorable, 1982 favorable et 1981 favorable sauf si le semis est suivi par une période sèche (cas des semis entre le 7 et 10 novembre).

**A-IV - 3. Tableau 1. Les conditions climatiques pendant la période de semis-levée pour les campagnes 1980/81, 1981/82, 1982/83. Classement des années par rapport aux conditions de levée.**

Campagne :	1980/81	1981/82	1982/83	[Moyenne 15 ans]
<b>Températures moyennes (t°C)</b>				
Oct.	12,5	13,4	13,1	[13,3]
Nov.	6,8	8,7	10,5	[8,5]
Déc.	5,0	7,3	7,3	[5,9]
<b>Pluviométrie (mm)</b>				
Oct.	131	151	158	[63]
Nov.	44	20	111	[95]
Déc.	56	167	219	[85]
<b>Jugement des années par rapport aux conditions climatiques semis-levée.</b>				
Température	basse	moyenne	élevée	
Pluviométrie après semis	faible	variable selon dates	forte	
Jugement	défavorable	favorable si semis précoce	favorable	

*Etat du lit de semence.*

Le tableau 2 analyse la qualité du lit de semence vis-à-vis de la levée en combinant le diamètre des mottes en surface et la structure rassise ou non de l'horizon sous jacent au semis. On obtient six combinaisons dont 5 sont possibles. On répartit les ITK réalisés dans les différentes possibilités. On notera que les classements obtenus sont concordants avec l'analyse des histogrammes des NP.

**A-IV - 3 Tableau 2. Grille d'analyse des ITK par rapport à l'état structural du lit de semence. Classement et jugement des ITK par rapport à la grosseur des mottes en surface et à la présence de creux dans la couche sous-jacente au semis.**

	Diamètre des mottes en surface	G > 8 cm	M entre 4 et 8	P < 4 cm
	Horizon sous-jacent au semis :			
Travail profond (ITK n° 1 à 10) Groupes I, II, III	creux plus ou moins abondants	<b>Très défavorable</b> (ITK n° 1, 2, 9, 10)	<b>Défavorable</b> (ITK n°3, 4, 5, 6, 7, 8)	<b>absent</b>
Pas de travail profond (ITK n° 11 à 16) Groupes IV, V	tassé	<b>Favorable ?</b> (ITK n° 14, 15 si conditions de levée humides)	<b>absent</b>	<b>Très favorable</b> (ITK n°1, 12, 13, 16)

*Conditions de levée.*

Le tableau 3 combine conditions climatiques et état du lit de semence. Nous obtenons alors deux groupes de parcelles : les parcelles (9) où les conditions sont défavorables (années et états structuraux) et les autres (21) où une condition est favorable (soit l'année, soit l'état structural).

**A-IV - 3 Tableau 3. Répartition des parcelles en fonction des conditions de levée : conditions climatiques, modalités de travail du sol (ITK), dates de semis.**

Année	1980/81	1981/82	1982/83
Conditions climatiques de levée.	Défavorable	Défavorable	Favorable
	si semis du 7/10 nov		Favorable
Etat structural du lit :			
de semence	ITK N°	Humidité	
<b>Défavorable</b>	1 à 10		
		MC50	GAT82
		MB30	
		LS	BUL
		A80	A7B
		A6	A7F
		A70	BES1/2
		E10	A8
			GG
			G0G
<b>Favorable</b>	11 à 16	14, 15	
		si	
		conditions	DeG
		de levée	OUV
		humides	PF
			GAR
			CC10
			F20
			MEN1/2
			F60
			MIG
			BUL83
			BES83

### 3- Taux de levée et peuplement (Tableau 4).

**A-IV - 3. Tableau 4. Effet des types de sol (Indice de Dispersion de l'horizon 0-30 cm) et des conditions de levée sur le taux de levée (% levée) et le peuplement NP/m<sup>2</sup> ; parcelle gypsée absente. m : moyenne, et : écart-type, cv : coefficient de variation, n : nombre de situations.**

Types de sol		N°	1 à 6 (0-3)	8 (4-8)	9 (4-9)	10 (>=10)	Ensemble parcelles
(ID 0-30 cm)							
ENSEMBLE	% levée	m	71	70	60	48	65
		et	16	9	17	9	17
		cv	23	13	29	19	26
		n	13	4	10	3	30
	NP	m	242	212	206	157	219
		et	59	23	87	24	67
		cv	24	11	42	15	31
		n	13	4	10	3	30
<b>Conditions de levée</b>							
FAVORABLE	% levée	m	79	71	69	52	72
		et	12	11	9	9	13
		cv %	15	15	14	18	18
		n	9	3	7	2	21
	NP	m	266	209	248	168	243
		et	43	27	61	21	54
		cv	16	13	24	13	22
		n	9	3	7	2	21
DEFAVORABLE	% levée	m	53	67	40	40	49
		et	8		13		13
		cv	16		33		26
		n	4	1	3	1	9
	NP	m	189	220	109	136	160
		et	59		52		63
		cv	32		48		39
		n	4	1	3	1	9

**A-IV- 4 Tableau 1. Définition et relations entre les variables : croissance (MSA2), vitesse de croissance (V2), vitesse de croissance par pied (V2p) et peuplement pieds (NP).**

Variables	Définition	Dimensions (Unités)	Relations avec le peuplement (NP)	
MSA2	Matière sèche aérienne début montaison (stade B2)	g /m <sup>2</sup>	(1) MSA2 = f(NP)	(1') MSA2 = a NP si (NP, MSA2 <seuil) (1'') MSA2 = b si (NP, MSA2 >seuil)
V2	Vitesse de croissance moyenne (levée-stade B2) V2 = MSA2/durée levée - stade B2	g/m <sup>2</sup> x °Cxj	(2) V2 = g(NP)	(2') V2 = a' NP si (NP, V2 <seuil) (2'') V2 = b' si (NP, V2 >seuil)
V2p	Vitesse de croissance moyenne par pied (levée - stade B2) V2p = V2/NP V2p = MSA2/NP/durée phase levée - stade B2	g/NP x °Cxj	(3) V2p = h(NP)	(3') V2p = a' si (NP, V2p <seuil) (3'') V2p = b'/NP si (NP, V2p >seuil)

**A-IV- 4 Tableau 2. Effet des types de sol sur la relation MSA2 = f(NP).**

**Valeurs des paramètres des courbes enveloppes :**

**(1) MSA2 = a NP : partie croissante ; a en g/pied**

**(1') MSA2 = b : partie constante ; b en g/m<sup>2</sup>**

**K : point d'intersection (NP = b/a ; MSA2 = b).**

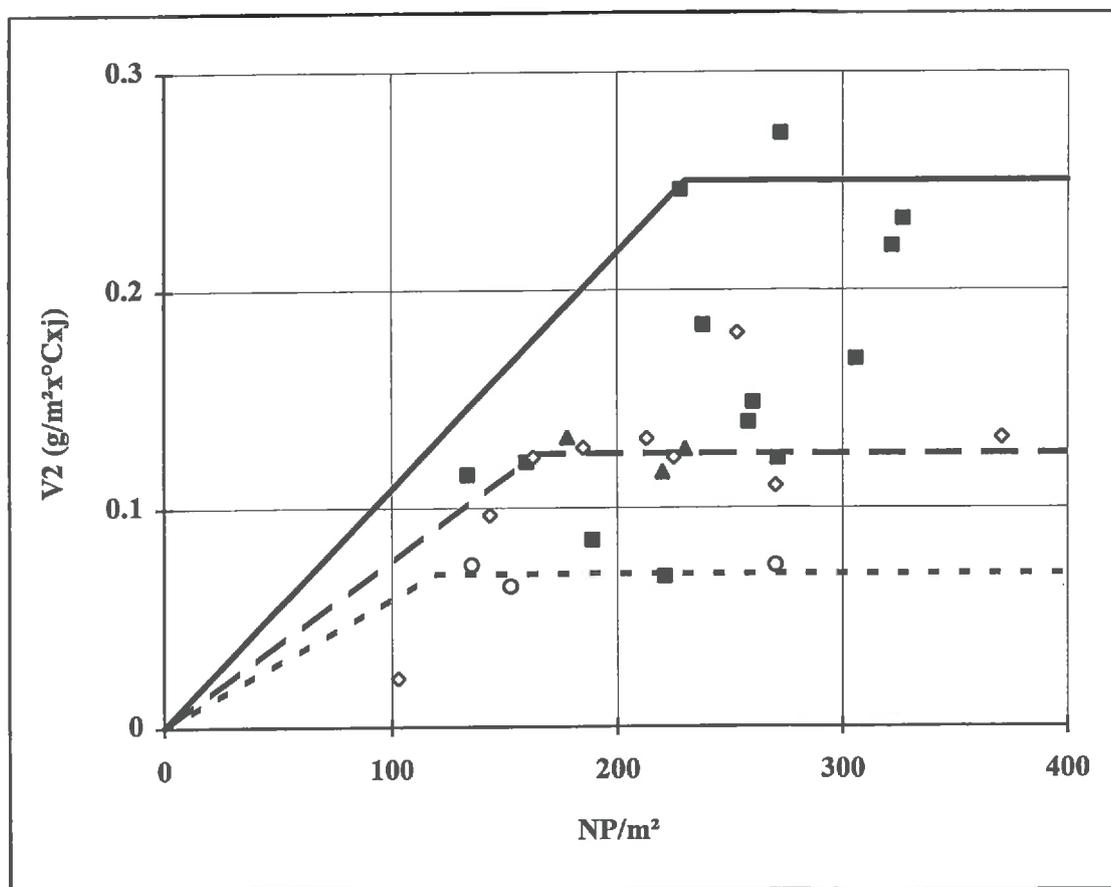
**Zone de transition : zone de jonction entre les 2 parties.**

		Types de sol		
		<=6	8/9	10
Relation	Paramètres			
(1)	a	1	0.8	0.5
(1')	b	250	150	75
Point d'intersection	NP = b/a	250	188	150
K	MSA2 = b	250	150	75
Zone de transition	NP	[200, 250]	[150, 200]	[100, 150]

**A-IV-4 Tableau 3. Régression durée de la phase levée-stade B2 X date de levée. Effet de la qualité des sols (variété TOP).**

**m : pente ; b : ordonnée à l'origine ; R<sup>2</sup> : coefficient de détermination ; n : nombre de parcelles.**

	Types de sol		
	<=6	9 et 10	Ensemble
m	-0.274	-5.805	-2.631
b	10397	202170	92116
R <sup>2</sup>	0.004	0.49	0.11
n	13	12	28



**A-IV - 4 Figure 1. Vitesse de croissance moyenne jusqu'au début montaison (V2) et peuplement (NP/m<sup>2</sup>). Effet des types de sol.**

**Types <= 6, 8, 9, 10 : carré noir, triangle noir, losange blanc, rond blanc.**

**Enveloppes types de sol <= 6, 8/9, 10 : continu, tirets, pointillés.**