

Classification agronomique des sols de marais à partir de la relation entre sodicité et stabilité structurale

Application au cas des marais de l'Ouest

Y. Pons et A. Gerbaud

INRA-SAD, Domaine expérimental, 17450 Saint Laurent de la Prée, France

RÉSUMÉ

Les marais de l'Ouest, autrefois utilisés principalement pour l'élevage extensif, ont été progressivement drainés et mis en culture à partir des années 70. Le drainage peut cependant être mis en échec par la nature imperméable du terrain, constitué majoritairement d'argiles gonflantes et souvent sodiques. La perméabilité de ces sols dépend du maintien d'une structure de mottes et d'agrégats, dont la stabilité dépend notamment de la sodicité et du taux de calcaire.

Un nouveau protocole de mesure de la dispersion, basé sur le test d'Emerson, fournit un indice de dispersion, noté de 0 à 16, adapté à l'estimation de la stabilité de ce type de sols. Les valeurs de 0 à 5, 6 à 9 et 10 à 16 correspondent respectivement aux sols stables, intermédiaires et instables. On a vérifié la bonne corrélation de l'indice de dispersion avec des caractéristiques agronomiques de parcelles cultivées : état de surface et profondeur de la nappe en hiver.

Par ailleurs l'indice de dispersion est corrélé avec les propriétés chimiques du sol : une analyse de la sensibilité de cet indice aux différents paramètres du sol montre que la sodicité et le taux de calcaire suffisent à expliquer 82 % de sa variabilité. L'indice de dispersion croît avec la sodicité. Le seuil d'instabilité du sol (indice de dispersion ≥ 10) est atteint pour une sodicité supérieure à 25 % en sol calcaire, mais seulement 8 % en sol peu ou non calcaire. La salinité de ces sols étant faible, son effet n'a pas été mis en évidence.

Ces résultats nous ont permis d'améliorer la classification agronomique des sols basée sur la sodicité en prenant en compte la teneur en calcaire. Cette classification peut également être effectuée à l'aide de la mesure de l'indice de dispersion. Cette méthode simple et rapide permet de prévoir les caractéristiques agronomiques (profondeur de la nappe, état de surface) et l'aptitude à la culture des terres des marais de l'Ouest.

Ces résultats devraient s'appliquer dans d'autres régions possédant des sols argileux sodiques déssalés (estuariers, polders). Une classification selon la stabilité structurale pourrait être utile pour les sols où la compacité limite la fertilité, ou bien pour les sols soumis à l'érosion.

Mots clés

Sodicité, argile, marais, classification agronomique des sols, stabilité structurale

SUMMARY**AN AGRICULTURAL CLASSIFICATION OF FRENCH WESTERN MARSHLAND SOILS BASED ON THE RELATION BETWEEN SODICITY AND STRUCTURAL STABILITY**

The French Atlantic marshlands, once mainly used as extensive grazing grounds, were progressively drained and cultivated from 1970 until recently. However drainage may be ineffective because the soils are mainly formed by swelling sodic clay, which is often very impermeable. The porosity of these soils is due to their structuration into aggregates, whose stability is dependant on soil sodicity, limestone concentration and other factors. The conservation of the soil structure and porosity conditions the possibility of cultivating the soil. We propose a new method of estimating soil stability, suited to this type of soils, by rating the dispersion in water from 0 to 16. Indexes from 0 to 5, 6 to 9 and 10 to 16 correspond respectively to stable, intermediate and instable soils. The dispersion index is well correlated with watertable depth in winter and lump structure of the surface layer.

The dispersion index is correlated with soil chemical parameters. An analysis of factors shows that 82 % of its variability is explained by sodicity and limestone content. Other parameters are mostly correlated with these.

The dispersion index increased with sodicity to a plateau and was higher in non-calcareous soils. Soils are unstable (dispersion index ≥ 10) if sodicity is higher than 25 % in calcareous soils, 8 % in non calcareous soils. The salinity of the studied soils was relatively low and no effect was found.

These results allow us to propose a classification of swelling clayey sodic soils based either on their sodicity and limestone content, or on measurements of the dispersion index in the three upper soil layers. It can be used to predict agronomic parameters measured in the field (depth of the watertable in winter, surface lump aggregation) and the agricultural possibilities of sodic clayey soils in the French Atlantic marshlands. These results should apply to other sodic clayey soils that are encountered in coastal marshlands and estuaries. A classification according to structural stability is of potential use when soil compacity is limiting fertility or when there are risks of erosion.

Key-words

Sodicity, sodic clay soil, marshland, agricultural soil classification, structural stability

RESUMEN**CLASIFICACIÓN AGRONÓMICA DE LOS SUELOS DE PANTANOS A PARTIR DE LA RELACIÓN ENTRE SODICIDAD Y ESTABILIDAD ESTRUCTURAL**

Los pantanos del Oeste, antaño usados principalmente por la ganadería extensiva, fueron progresivamente drenados y cultivados desde los años 70. El drenaje puede sin embargo funcionar mal debido a la naturaleza impermeable del terreno, constituido mayormente de arcillas expansibles y a menudo sódicas. La permeabilidad de los suelos depende del mantenimiento de una estructura de motas y de agregados cuyo estabilidad depende en particular de la sodicidad y de la tasa de calcáreo.

Un nuevo protocolo de medida de la dispersión, basado en el test de Emerson, procura un índice de dispersión notado de 0 a 16 adaptado a la estimación de la estabilidad de este tipo de suelos. Los valores de 0 a 5, 6 a 9, 10 a 16 corresponden respectivamente a los suelos estables, intermediarios y inestables. Se verificó la buena correlación del índice de dispersión con las características agronómicas de parcelas cultivadas: estado de superficie y profundidad del manto freático en invierno. Por otro lado, el índice de dispersión es correlacionado con las propiedades químicas del suelo: un análisis de la sensibilidad de este índice a los diferentes parámetros del suelo muestra que la sodicidad y la tasa de calcáreo son suficientes para explicar 82% de su variabilidad. El índice de dispersión crece con la sodicidad. El umbral de inestabilidad del suelo (índice de dispersión ≥ 10) está alcanzado para una sodicidad superior a 25% en suelo calcáreo, pero solamente 8% en suelo poco o no calcáreo. La salinidad de estos suelos es ligera y su efecto no se pone en evidencia.

Estos resultados nos permitieron mejorar la clasificación agronómica de los suelos basada sobre la sodicidad, teniendo en cuenta el contenido en calcáreo. Esta clasificación puede igualmente ser efectuada con ayuda de la medida del índice de dispersión. Este método simple y rápida permite prever las características agronómicas (profundidad del manto freático, estado de superficie) y la aptitud para cultivar las tierras de pantano del Oeste.

Estos resultados deberían aplicarse en otras regiones que tienen suelos arcillosos sódicos desalados (estuarios, pólderes). Una clasificación según la estabilidad estructural podría ser útil para los suelos donde la compacidad limita la fertilidad, o para los suelos sometidos a la erosión.

Palabras clave

Sodicidad, arcillas, pantanos, clasificación de suelos, estabilidad estructural

Fortement marqués par l'excès d'eau, les Marais de l'Ouest étaient traditionnellement utilisés en prairie pour un élevage extensif. Dans les années 70, le contexte économique favorable aux céréales a permis le développement du drainage. Malgré le risque d'échec que représente la sodicité des sols, de nombreuses prairies ont été drainées et mises en culture, avec des résultats extrêmement variables. Dans les cas les plus défavorables, on notait des résultats agronomiques très médiocres.

Le contexte pédologique des marais

Les Marais de l'Ouest couvrent 250 000 ha environ de régions marécageuses, entre la Vilaine au nord et la Gironde au sud (figure 1). Ces marais résultent du comblement progressif et récent d'anciens golfes marins par des sédiments; les pentes sont faibles et l'altitude maximum avoisine les niveaux atteints par les plus fortes marées. Ces marais sont actuellement isolés de la mer et ne reçoivent plus que des eaux douces, mais conservent plus ou moins leur caractère salin.

Les sols sont formés de sédiments fluvio-marins appelés localement « bri » dont les conditions de dépôt sont restées identiques au cours du temps (Chevallier *et al.*, 1984). Aussi leurs caractères texturaux et minéralogiques varient peu: plus de 95 % d'éléments fins (argile et limon), parmi lesquels 70 à 80 % d'argiles gonflantes: illite (50 à 60 %) et montmorillonite (20 à 25 %) (Collas, 1985; Lafond et Verger, 1965; Morizet *et al.*, 1970). L'évolution pédologique a entraîné une différenciation chimique et physico-chimique se tra-

duisant par des gradients de salinité, de sodicité, de calcaire, de matière organique (Wilbert, 1978) et de couleur permettant de reconnaître leur âge.

Dans le référentiel pédologique français (Baize et Girard, 1995), ces sols appartiennent aux Salisols, Salisodisols, Sodisols et Thalassosols.

L'excédent hivernal des pluies provoque une lixiviation des sols, qui fait que leur sodicité et leur salinité augmentent généralement avec la profondeur. Cette évolution naturelle peut être accélérée par l'irrigation ou le drainage.

Dans les sols de marais (bri), la présence d'argiles gonflantes tend à donner au sol une structure compacte. Le potentiel agronomique de ces sols chimiquement fertiles est conditionné par l'existence d'une macroporosité permettant l'évacuation de l'eau vers les drains en hiver. Cette macroporosité, liée à la structure naturelle ou créée par le travail du sol, se dégrade plus ou moins, sous l'action des précipitations hivernales ou du tassement par les outils agricoles, en fonction de la stabilité structurale caractéristique du sol.

Dans les cas défavorables (forte instabilité), les sols deviennent imperméables, flaqués et peu portants en hiver. Ils durcissent et se fendent en séchant en été. L'instabilité des sols provoque le colmatage de la porosité du profil (Tessier et Pedro, 1980; Tessier, 1984; Azib, 1989; Hallaire *et al.*, 1996). Le drainage devient inefficace après quelques années, ce qui entraîne des coûts importants de travail du sol et une mauvaise réussite des cultures. Les terres deviennent alors impropres au travail et à la culture (Pons *et al.*, 2000).

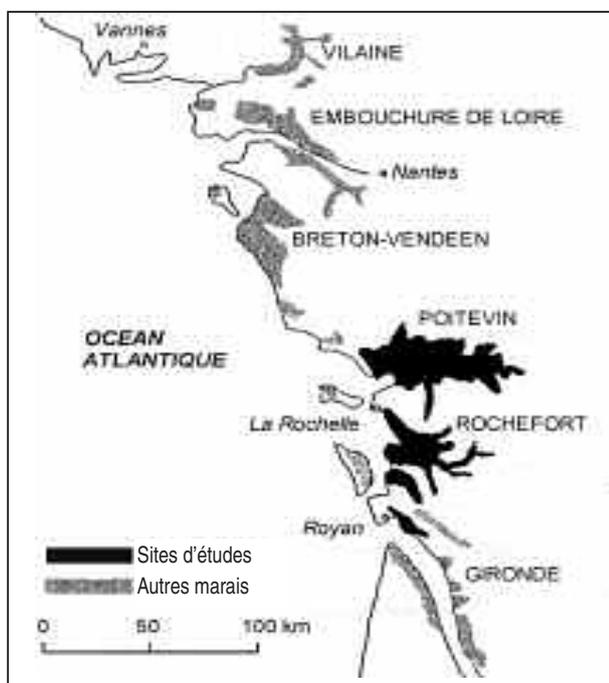
L'instabilité de la structure des sols sodiques est fortement liée à la présence de sodium échangeable ou sodicité (Sumner, 1993).

En pédologie, un sol est usuellement qualifié de sodique lorsque sa sodicité dépasse 15 % de sodium échangeable (Sposito, 1989; Baize, 2000). Il est admis que cette sodicité, entraîne une dégradation de la structure et un comportement défavorable. Les agronomes mettent plutôt l'accent sur les conséquences agronomiques, ce qui a conduit certains à définir comme sodique tout sol dont l'instabilité serait due au sodium échangeable, même avec une faible sodicité (Sumner, 1993).

La sodicité n'agit pas seule sur la stabilité du sol mais en interaction avec d'autres caractéristiques (texture, teneur en calcaire, salinité, matière organique). La salinité, fréquemment associée à la sodicité, joue en sens inverse et peut maintenir l'argile floculée même avec une sodicité élevée. La contribution de la dissolution du calcaire et l'effet de différents niveaux de sodicité sur la solubilité des minéraux du sol ont été montrés (Oster et Shainberg, 1979). Enfin le taux de matière organique agit positivement sur la stabilité, notamment dans les sols tourbeux. Les agriculteurs utilisent ces propriétés pour améliorer les sols sodiques, en apportant des amendements (calcaire, gypse) dont la dissolution augmente la concentration en sels, ou de très fortes quantités de fumier.

Dans l'étude des conséquences agronomiques de la sodicité des sols de marais, la stabilité structurale est un maillon central de la rela-

Figure 1 - Les marais de l'Ouest
Figure 1 - The French Atlantic marshlands



tion entre la composition chimique et les propriétés physiques du sol. Elle peut être mesurée de plusieurs façons, en faisant appel à l'un ou l'autre des processus de dégradation : la dispersion (Quirk et Schofield, 1955), le gonflement (Cass et Sumner, 1982) ou une combinaison de paramètres (éclatement, gonflement, dispersion) (Emerson, 1967; Greenland *et al.*, 1975). Elle peut aussi être mesurée directement par le pourcentage d'agrégats stables après divers prétraitements (Hénin *et al.*, 1969).

Ces différentes mesures de la stabilité structurale peuvent être comparées avec la mesure de perméabilité, propriété qui est une conséquence de la stabilité structurale et qui a *a priori* un intérêt direct sur le plan agronomique. Dans le cas particulier des sols de marais, cette comparaison ne montre pas de relation nette de la perméabilité avec les autres types de mesure (Hénin *et al.*, 1969 et nos mesures ci-après). D'autre part, en marais, la perméabilité telle qu'elle est mesurée en laboratoire ne permet pas de prévoir efficacement le comportement hydraulique du sol, selon nos observations. La dispersion, qui est le processus majeur de déstructuration dans les sols argileux sodiques, semble plus adaptée pour évaluer la stabilité (Quirk et Schofield, 1955; Shainberg *et al.*, 1981), mais les sols de marais sont mal différenciés par le test d'Emerson (1967), car des sols agronomiquement différents peuvent se retrouver dans la même classe (cas des classes 2 et 3).

La question se pose donc de savoir quel type de mesure est le plus adapté dans un cadre agricole.

Objectif de l'étude

Aujourd'hui, le problème de la classification des sols sodiques n'est pas résolu de façon satisfaisante pour les agronomes (Sumner, 1993). D'une part la classification pédologique, basée sur la seule mesure de sodicité, ne permet pas de prévoir de façon suffisamment précise le comportement agronomique des sols ; plus fondamentalement, les relations entre sodicité et stabilité structurale ne peuvent pas être généralisées, particulièrement pour les sols argileux gonflants plus ou moins sodiques. D'autre part, les mesures physiques sont mal corrélées entre elles pour les sols de marais et leur intérêt agronomique n'a pas été démontré, comme le confirment nos observations au champ.

Aussi, nous avons réabordé le problème en basant la mesure de stabilité structurale sur la mesure de la dispersion grâce à une nouvelle méthode d'interprétation du test d'Emerson (1967). L'indice de dispersion obtenu sera mis en relation d'une part avec des mesures chimiques et d'autre part avec des mesures agronomiques. On étudiera l'effet de la sodicité sur le comportement des sols en prenant en compte le rôle des autres facteurs physico-chimiques, et on recherchera la cohérence entre propriétés physico-chimiques et agronomiques du sol.

Une classification fondée sur l'indice de dispersion sera proposée et sa validité agronomique sera vérifiée au champ sur un ensemble de sols représentatifs des Marais de l'Ouest.

MATERIEL ET METHODES

Echantillonnage des sols

Les échantillons de sol ont été prélevés sur des parcelles du marais poitevin, du marais de Rochefort et de Gironde (*figure 1*), représentant une large gamme de situations de sols (ancienneté des dépôts, teneur en calcaire), d'aménagements (modes de drainage) et de systèmes de culture. Les échantillons concernent les trois horizons 0 – 30, 30 – 60, 60 – 90 cm.

Analyses physico-chimiques

118 échantillons provenant de 49 profils ont été utilisés pour l'analyse chimique et la mesure de l'indice de dispersion. Les caractéristiques physico-chimiques mesurées sont celles habituellement retenues pour l'analyse des sols salés ou sodiques : pH et conductivité électrique, teneur en CaCO₃, matière organique, cations solubles et échangeables. Les analyses chimiques ont été réalisées au Laboratoire Centre Atlantique de La Rochelle selon des procédures particulières adaptées aux sols salés et sodiques (Baize, 2000) (détail en annexe). Les mesures de cations solubles et échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC) sont exprimées par rapport au poids de sol. La portée des comparaisons est cependant relativisée par le fait que les méthodes d'extraction sont différentes.

Les analyses granulométriques ont été faites sur la moitié des échantillons après destruction de la matière organique et décarbonatation des échantillons.

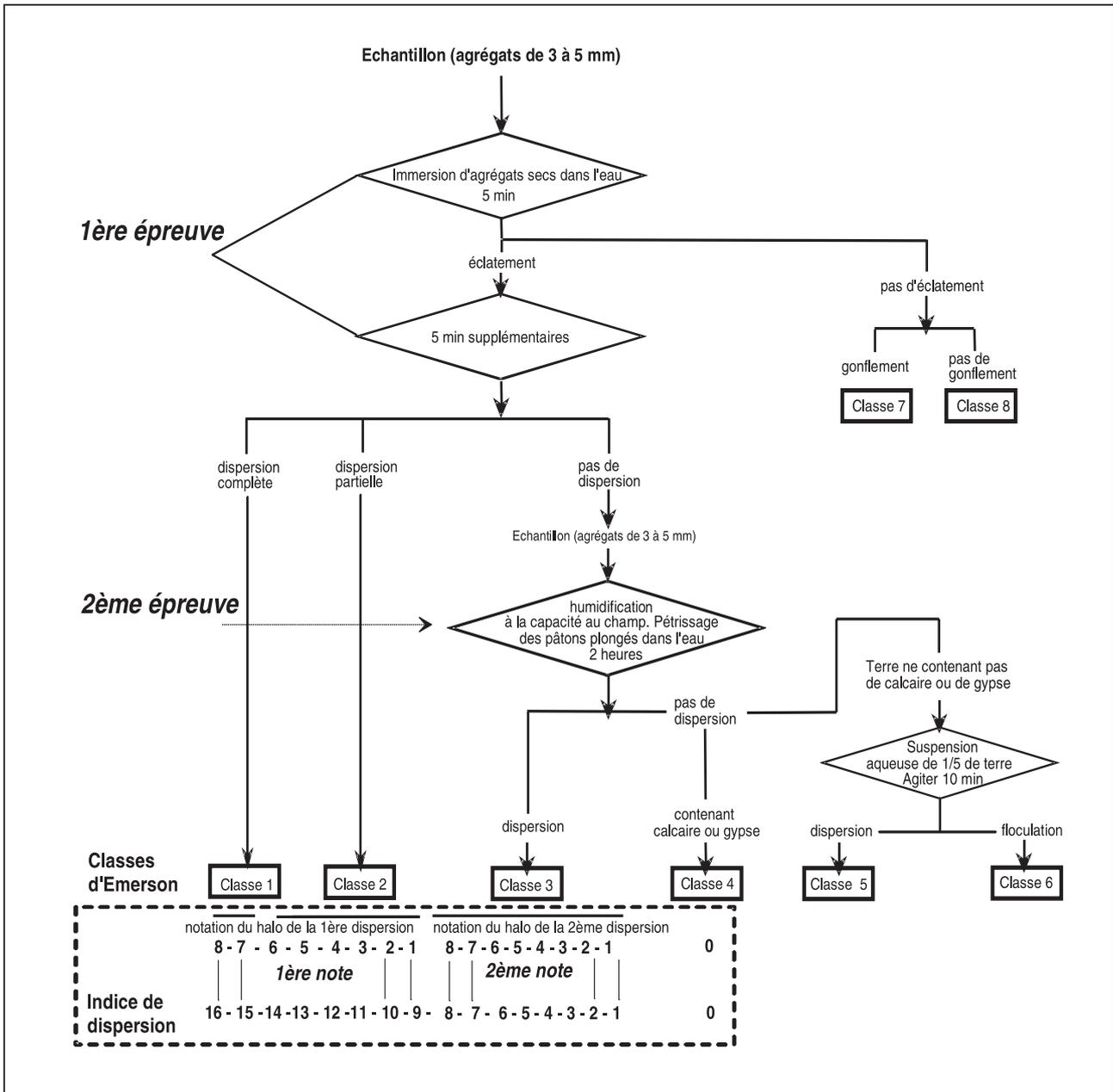
Evaluation de la stabilité structurale : adaptation du test d'Emerson pour le calcul d'un indice de dispersion.

La stabilité structurale a été estimée par 3 méthodes : la mesure de l'indice d'instabilité structurale (IS), de la perméabilité (K) ou de l'indice de dispersion (iD). Compte tenu de leur coût, les mesures de IS et de K n'ont porté respectivement que sur 29 et 40 échantillons. L'indice d'instabilité structurale est évalué à partir du pourcentage d'agrégats stables obtenus après divers prétraitements par la méthode de Hénin *et al.* (1969). La perméabilité est mesurée par un test de percolation réalisé sur agrégats tamisés à 2 mm, selon Baize (2000). La valeur donnée est la percolation de la première heure (K1). Pour la mesure de l'indice de dispersion, nous sommes partis du test de W.W. Emerson (1967). C'est un test qualitatif et dichotomique qui permet de situer un échantillon parmi 8 classes de comportement (*figure 2*).

Cependant, le test d'Emerson n'était pas assez précis pour l'application aux sols de marais car de nombreux sols, certains considérés comme assez stables et d'autres comme instables, se retrouvaient dans la catégorie 3 d'Emerson. Pour affiner la classification, nous avons donc remplacé la dichotomie dispersion / pas de dis-

Figure 2 - Mesure de l'indice de dispersion. Protocole d'Emerson et modification proposée. Le cadre en pointillés contient la notation que nous avons apportée en complément à la procédure d'Emerson

Figure 2 - Diagram showing the Emerson procedure for measuring the dispersion index and the proposed modification. The dotted line frame contains the supplementary rating that we introduced to complement the Emerson procedure



persion par une notation de la dispersion (suivant l'idée de Loveday et Pyle, 1973) selon le diamètre du halo de dispersion. Lorsque la première épreuve de dispersion (après 5 minutes d'immersion dans l'eau) ne donne pas de dispersion, une deuxième épreuve est effectuée après une immersion de 2 heures. Pour chaque épreuve, deux lots de trois agrégats de 3 à 5 mm de diamètre sont immergés cha-

cun dans un becher de 20 ml d'eau distillée et sont notés de 0 à 4 (0 : pas de dispersion ; 1 : voile laiteux ; 2, 3, 4 : halo recouvrant respectivement le 1/3, les 2/3 ou la totalité du fond du récipient), donnant une note totale de 0 à 8. L'indice de dispersion reprend soit la note de la deuxième épreuve, soit la note de la première épreuve augmentée de 8 (sols se dispersant dès la première épreuve),

Tableau 1 - Matrice de corrélation entre les différents paramètres des sols. Les coefficients de corrélation > 0,75 ou < - 0,50 sont en gras. Les symboles et unités sont les mêmes que dans la figure 4

Table 1 - Correlation matrix between measured characteristics of the soil samples. Bold types indicate correlation coefficients > 0,75 or < - 0,50. Symbols and units as in figure 4

					Echangeables						Solubles				
	pH	CaCO ₃	MO	CE	Ca _e	Mg _e	Na _e	K _e	CEC	Na _e /CEC	Ca _s	Mg _s	Na _s	K _s	SOLU
pH	1,000	-0,015	-0,582	0,122	-0,657	0,441	0,566	0,501	-0,573	0,641	-0,479	0,474	0,237	0,373	0,092
CaCO ₃	-0,015	1,000	-0,026	-0,145	0,204	-0,565	-0,305	-0,435	0,045	-0,289	0,134	-0,499	-0,153	-0,236	-0,201
MO	-0,582	-0,026	1,000	-0,043	0,906	-0,294	-0,275	-0,424	0,954	-0,325	0,486	-0,255	-0,169	-0,236	0,033
CE	0,122	-0,145	-0,043	1,000	-0,231	0,261	0,685	0,423	-0,068	0,648	0,082	-0,375	-0,902	-0,443	0,858
Ca _e	-0,657	0,204	0,906	-0,231	1,000	-0,578	-0,530	-0,636	0,947	-0,579	0,544	-0,478	-0,341	-0,399	-0,140
Mg _e	0,441	-0,565	-0,294	0,261	-0,578	1,000	0,507	0,546	0,378	0,514	-0,395	0,480	0,300	0,450	0,190
Na _e	0,566	-0,305	-0,275	0,685	-0,530	0,507	1,000	0,682	-0,295	0,971	-0,274	0,699	0,706	0,710	0,636
K _e	0,501	-0,435	-0,424	0,423	-0,636	0,546	0,682	1,000	-0,472	0,684	-0,374	0,515	0,519	0,572	0,383
CEC	-0,573	0,045	0,954	-0,068	0,947	-0,378	-0,295	-0,472	1,000	-0,360	0,520	-0,301	-0,184	-0,220	0,027
Na _e /CEC	0,641	-0,289	-0,325	0,648	-0,579	0,514	0,971	0,684	-0,360	1,000	-0,320	0,708	0,689	0,673	0,600
Ca _s	-0,479	0,134	0,486	0,082	0,544	-0,395	-0,274	-0,374	0,520	-0,320	1,000	-0,086	-0,102	-0,254	0,391
Mg _s	0,474	-0,499	-0,255	0,375	-0,478	0,480	0,699	0,515	-0,301	0,708	-0,086	1,000	0,337	0,411	0,517
Na _s	0,237	-0,153	-0,169	0,902	-0,341	0,300	0,706	0,519	-0,184	0,689	-0,102	0,337	1,000	0,498	0,831
K _s	0,373	-0,236	-0,236	0,443	-0,399	0,450	0,710	0,572	-0,220	0,673	-0,254	0,411	0,498	1,000	0,429
SOLU	0,092	-0,201	0,033	0,858	-0,140	0,190	0,636	0,383	0,027	0,600	0,391	0,517	0,831	0,429	1,000

comme indiqué sur le schéma. On obtient ainsi un indice de 0 (sols les plus stables) à 16 (sols les plus instables), les notes 1 à 8 correspondent à la classe 3 d'Emerson (figure 2).

Une modification mineure a été effectuée dans le protocole pour une raison pratique : au lieu d'humidifier les échantillons à la capacité au champ en les soumettant pendant 72 heures à une tension de 100 mm de succion dans une enceinte, ils sont posés pendant 36 heures sur un bloc de mousse imbibé d'eau distillée. Les échantillons sont prélevés dans la partie ressuyée de la motte (Pons et Martineau, 1983). Cette modification n'apporte pas de changement dans la classification obtenue.

Analyse des données

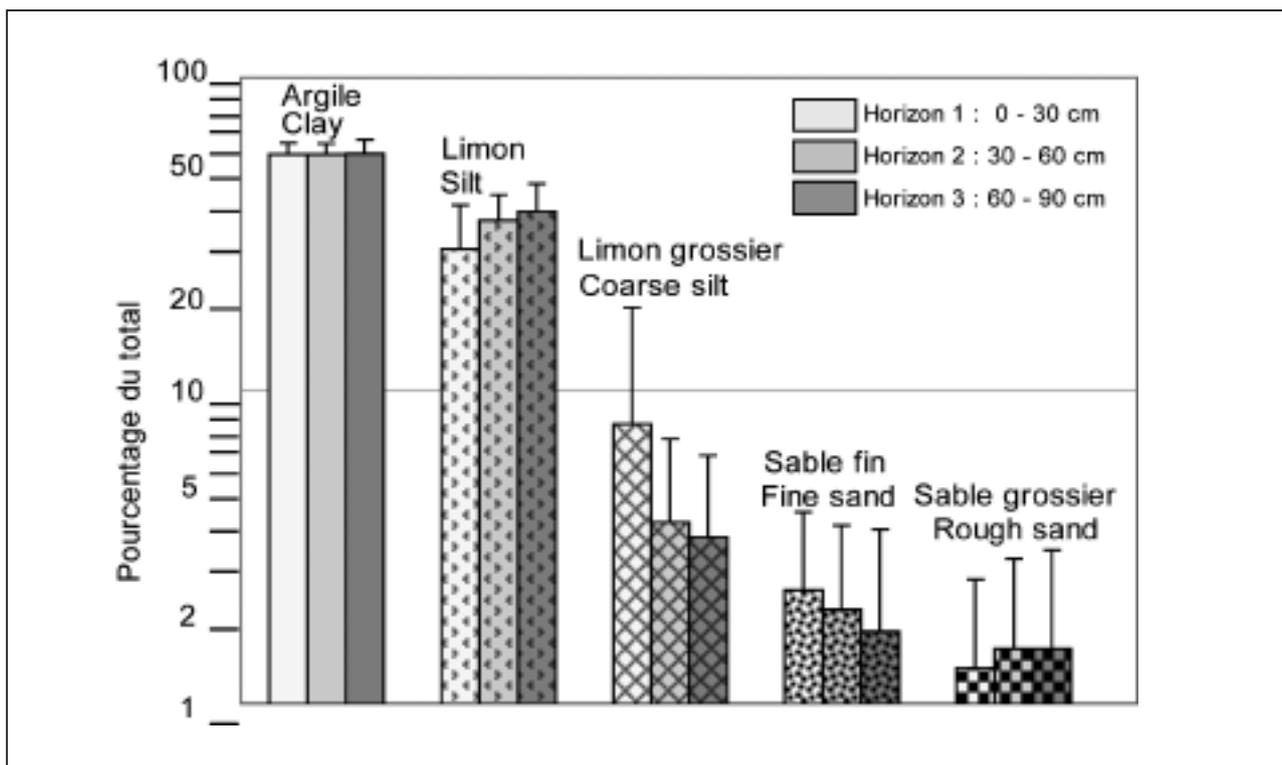
Pour dégager les variables pertinentes dans l'estimation de l'indice de dispersion, les mesures des 15 variables chimiques et de l'indice de dispersion réalisées sur 118 échantillons ont été traitées par plusieurs techniques statistiques avec le logiciel STAT – ITCF (version 5). La matrice de corrélation (tableau 1) indique l'intensité des relations entre les variables. La technique de régression multiple a été appliquée pour trouver les variables les plus explicatives de la valeur de l'indice de dispersion (Tomassone, 1987).

Evaluation du comportement structural au champ

Tous les comportements au champ ont été observés en période saturée (mi-janvier à fin mars) sur 29 parcelles drainées (profondeur 1 m, espacement interdrain 15 à 25 m), cultivées en blé.

La profondeur de la nappe en hiver est obtenue à partir de la moyenne des mesures réalisées à équidistance des drains pendant la période hivernale, toutes les semaines de la mi-janvier à la mi-mars.

L'état structural de surface du sol est noté visuellement, de 0 pour une surface complètement déstructurée, dispersée et flaquée, à 4 pour une surface composée de 100 % de mottes de 1 à 5 cm (tableau 2). Chaque point de mesure est la moyenne de 4 carrés de 30 cm de côté choisis dans une zone homogène, éloignée des drains. Toutes les observations ont été réalisées fin février.

Figure 3 - Granulométrie des profils de sol représentée en échelle logarithmique**Figure 3** - Particule size distribution of soil layers (log scale)

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'état physico-chimique des sols

La granulométrie des sols (*figure 3*) est à peu près constante à la fois dans les profils, qui sont peu différenciés, et entre les différents points de prélèvement. Les sols sont argileux (40 à 60 %) et possèdent très peu d'éléments plus grossiers que les limons (6 à 15 %), ce qui entraîne une forte capacité d'échange cationique.

Les résultats des analyses chimiques des 118 échantillons et les corrélations entre les différents paramètres sont présentés dans la *figure 4* et le *tableau 1*.

Le pH a une valeur alcaline élevée ($8,3 \pm 0,5$), ce qui indique que le complexe argilo-humique est saturé.

Par ordre d'abondance, les cations présents dans le sol sont le calcium, qui représente 50 à 75 % de l'ensemble des cations solubles ou échangeables, le magnésium, le sodium et le potassium. Les cations solubles représentent, selon les espèces, environ 10 % (horizon 1) à 20 % (horizon 3) des cations échangeables. Selon les ions, leur concentration présente un gradient positif avec la profondeur (Mg^{2+} , Na^+ , K^+ soluble), négatif (Ca^{2+} échangeable) ou nul (Ca^{2+} soluble et K^+ échangeable). La sodicité moyenne augmente de 6 % dans le premier horizon à 20 % dans le troisième.

Tableau 2 - Notation de l'état de surface**Table 2** - Rating of the soil surface status

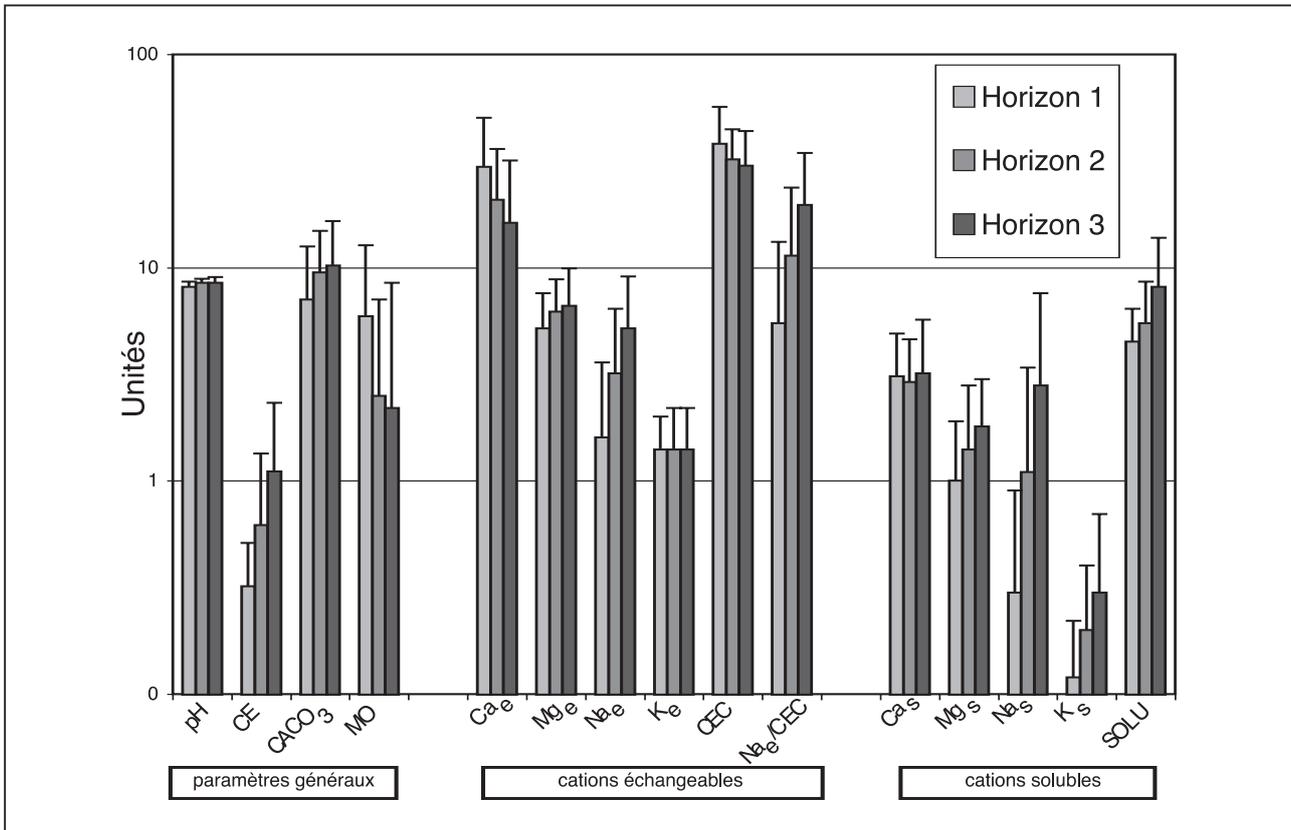
Critères d'état de surface	Note
Aucun relief sur la surface	0
Absence de mottes	
Structure de surface massive et dispersée	
Mottes sur < 20 % de la surface	1
Mottes > 15 cm, fondues, soudées, érodées, aplaties	
Structure massive sur > 80 % de la surface	
Mottes sur 20 à 50 % de la surface	2
Présence de mottes > 5 cm, arrondies, érodées, aplaties	
Structure massive sur 50 à 80 % de la surface	
Mottes sur 50 à < 100 % de la surface	3
Présence de mottes > 1 cm, arrondies ou anguleuses	
Structure massive sur < 50 % de la surface	
Mottes sur 100 % de la surface	4
Présence de mottes > 1 cm, individualisées	
Pas de structure massive	

Figure 4 - Analyse des échantillons, représentée en échelle logarithmique

CE conductivité électrique (dS.m^{-1}); CaCO_3 : teneur en calcaire (% du poids de sol sec); MO: matière organique (% du poids de sol sec). Toutes les autres concentrations et la CEC (capacité d'échange cationique) sont exprimées en cmol.kg^{-1} de sol sec. Les indices s et e dénotent respectivement les concentrations des ions solubles ou échangeables. Na_e/CEC : sodicité (%); SOLU: somme des cations solubles. Les barres représentent les écarts-types.

Figure 4 - Soil sample analysis in log scale.

CE: electrical conductivity (dS.m^{-1}); CaCO_3 : limestone (% of soil dry weight); MO: organic matter (% of soil dry weight); All ion concentrations and CEC (total exchangeable cation concentration) are expressed in cmol.kg^{-1} soil dry weight; s and e indexes respectively indicate soluble and exchangeable ion concentration. Na_e/CEC : sodicity (%); SOLU: total of soluble cations. Bars represent standard deviations.



Les concentrations des différents cations sont positivement corrélées entre elles (tableau 1), sauf le calcium qui varie à l'inverse des autres cations. La concentration en Ca^{2+} échangeable est très fortement corrélée avec la teneur en matière organique.

Relation entre les tests de stabilité structurale des sols de marais: indice de dispersion, indice d'instabilité structurale et perméabilité

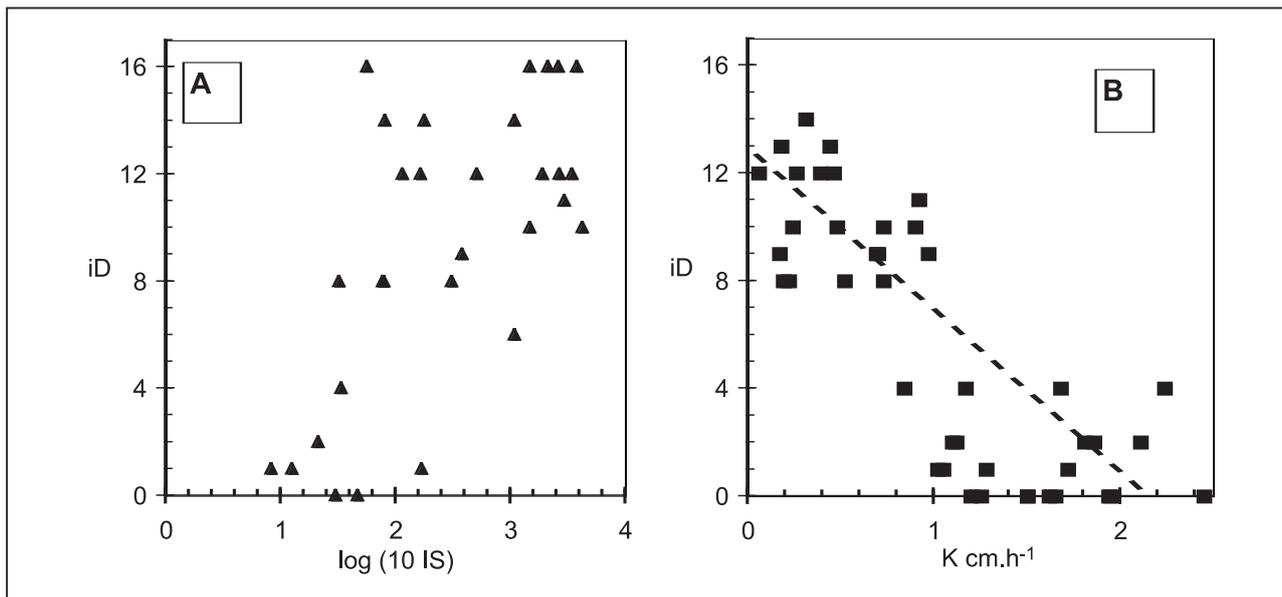
La relation entre l'indice de dispersion (iD) et l'indice d'instabilité structurale (IS) (figure 5A) montre une faible corrélation ($r^2 = 0,43$)

pour les sols sodiques, ce qui traduit la différence de nature des phénomènes mesurés. La corrélation entre iD et la perméabilité K (figure 5B) est meilleure ($r^2 = 0,66$).

Les faibles corrélations entre les différentes mesures de stabilité structurale confirment que l'emploi de l'un ou l'autre test ne donnera pas les mêmes résultats et pourrait conduire à des conclusions différentes. Au champ, nous n'avons pas observé de corrélation entre l'indice d'instabilité structurale et l'état de surface du sol. Avec la perméabilité, la corrélation est faible (données non présentées). De plus la mesure de l'iD est la plus simple à réaliser. C'est pourquoi dans la suite nous travaillerons seulement avec l'indice de dispersion.

Figure 5 - Relation entre l'indice de dispersion (iD) et l'indice d'instabilité structurale (IS)(A) et la perméabilité (K)(B).

Figure 5 - Relationship between the dispersion index (iD) and the measurements of structural instability (IS) (A) and permeability (K)(B).



Recherche des variables explicatives de l'indice de dispersion

Les indices de dispersion mesurés sur les mêmes échantillons de sol couvrent toute la gamme de 0 à 16. Pour déterminer quelles variables expliquent le mieux les variations de l'indice de dispersion, nous avons d'abord recherché les corrélations.

Les variables les plus fortement corrélées avec l'indice de dispersion sont les concentrations Mg_s ($r = 0,79$) et Na_e ou Na_e/CEC (CEC capacité d'échange cationique) ($r = 0,74$ et $0,76$) (tableau 3). Ca_e est la variable la plus anticorrélée ($-0,53$). Na_e/CEC (sodicité) peut être considéré comme équivalent à Na_e , mais nous préférons cette formulation car elle a une portée plus générale en permettant de comparer des sols de capacités d'échange cationique très différentes.

Pour obtenir la meilleure détermination de l'iD par un plus petit nombre de variables, le choix des variables à retenir n'est pas forcément celui des premières variables les plus corrélées, à cause de l'interdépendance entre les variables. Pour choisir un ensemble restreint de variables déterminant l'iD, nous avons regardé l'évolution du coefficient de détermination de iD avec l'ensemble des 15 variables explicatives classées par ordre décroissant de contribution à la détermination de l'iD (tableau 4), puis en retenant des sous-ensembles de 7, 5, 3 et 2 variables. Avec l'ensemble des 15 variables, le coefficient de détermination maximum est de 0,89 et ne varie plus à partir de la 12^e variable. Lorsqu'on réduit de 15 à 2 (Na_e/CEC , $CaCO_3$) le nombre de variables, le coefficient de détermination de l'iD passe de 0,89 (soit 89 %) à 0,82 (82 %) avec une perte de seu-

lement 0,07 (7 %) du coefficient de détermination. On trouverait une aussi bonne détermination en prenant, par exemple, Mg_s et Ca_s ou Mg_s et $CaCO_3$, ce qui s'explique par les corrélations observées entre les concentrations de magnésium et de sodium. Pour la suite de notre travail, nous préférons utiliser le couple Na_e/CEC (sodicité) - $CaCO_3$, car nous disposons de bien plus de références et de mesures sur la sodicité que sur les teneurs en magnésium.

On notera que la MO, le pH et la salinité (appréciée par la conductivité électrique CE) n'interviennent pas de façon importante comme variables explicatives de l'iD dans les sols échantillonnés.

Effet du calcaire et de la sodicité sur l'indice de dispersion

Pour représenter la relation de l'iD avec la sodicité, les points de mesure des 118 échantillons ont été regroupés en deux gammes selon leur teneur en calcaire, dites soit « peu ou pas calcaires » (taux < 6 %, en moyenne 3 %) soit « calcaires » (taux > 6 %, en moyenne 12 %) (figure 6).

Selon le taux de calcaire, on obtient deux courbes similaires de l'effet de la sodicité sur l'indice de dispersion. La courbe représentant les échantillons peu calcaires ($CaCO_3 < 6\%$) est décalée d'environ 6 unités de l'indice de dispersion par rapport à la courbe représentant les échantillons calcaires ($CaCO_3 > 6\%$). La dispersion augmente avec la sodicité jusqu'à un palier voisin de 10 pour les sols calcaires et de 14 pour les sols non calcaires, qui est atteint à partir d'une sodicité d'environ 12 %.

Dans des sols argileux sodiques australiens, Rengasamy *et al.*

Tableau 3 - Coefficients de corrélation entre l'indice de dispersion et les paramètres de l'analyse chimique**Table 3** - Correlation coefficients between the dispersion index and the chemical characteristics of the soil samples.

Mg _s	Na _e /CEC	Na _e	K _e	Mg _e	Ca _e	CaCO ₃	pH	K _s	Ca _s	Na _s	CEC	CE	SOLU	MO
0,79	0,76	0,74	0,57	0,56	-0,53	-0,53	0,50	0,46	-0,37	0,37	-0,35	0,35	0,336	-0,28

Tableau 4 - Coefficient de détermination de l'indice de dispersion par différents groupes de variables : évolution du coefficient de détermination de iD en fonction du nombre et de la nature des variables caractérisant les échantillons. Pour chaque ensemble de variables (sur une ligne), le coefficient de détermination est indiqué à chaque étape de la régression multiple.**Table 4** - Determination coefficients of the dispersion index by various variable groups. Evolution of the determination coefficient of iD according to the number of variables retained for the regression. For each set of variables (shown on the same line), the determination coefficient is shown at each step of the determination.

		N° étape de la régression												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	14	
		Variables retenues												
		Coefficients de détermination												
Nombre de variables explicatives	15	Mg _s 0,618	Cas 0,844	Na _e 0,865	CaCO ₃ 0,877	SOLU 0,881	Na _s 0,884	Na _e /CEC 0,885	pH 0,887	MO 0,89	CE 0,89	...	0,89	
	7	Mg _s 0,618	Na _e /CEC 0,836	CaCO ₃ 0,856	CE 0,866	Mg _e 0,867	pH 0,867	MO 0,868						
	5	Na _e /CEC 0,574	CaCO ₃ 0,823	CE 0,838	MO 0,839	pH 0,839								
	3	Na _e /CEC 0,574	CaCO ₃ 0,823	CE 0,838										
	2	Na _e /CEC 0,574	CaCO ₃ 0,823											

(1986) ont trouvé une relation tout à fait similaire, mais où le second facteur explicatif de la dispersion est la salinité de la solution du sol et non pas le taux de calcaire. Nous faisons l'hypothèse que cette différence s'explique parce que les sols en question sont à la fois beaucoup plus salés et moins calcaires que ceux que nous avons étudiés.

Application à la classification des sols argileux sodiques

L'aptitude à la mise en culture des sols de marais repose principalement sur leur état hydrique et structural en hiver. Les sols inondés ne sont ni accessibles ni cultivables. Pour que le drainage soit efficace, il faut que l'eau puisse s'infiltrer jusqu'au drain en traversant le profil de sol. La nappe mesurée à équidistance des drains est d'autant plus profonde que l'eau peut s'écouler rapidement vers les drains grâce à une porosité élevée. Comme les drains sont enterrés à environ 1 m de profondeur, les trois horizons considérés dans cette étude sont impliqués dans ce transfert.

Dans la mesure où le gradient d'indice de dispersion entre les horizons est relativement constant (l'iD augmentant en profondeur), on peut penser que l'iD moyen peut permettre une classification correspondant aux propriétés de drainage des profils.

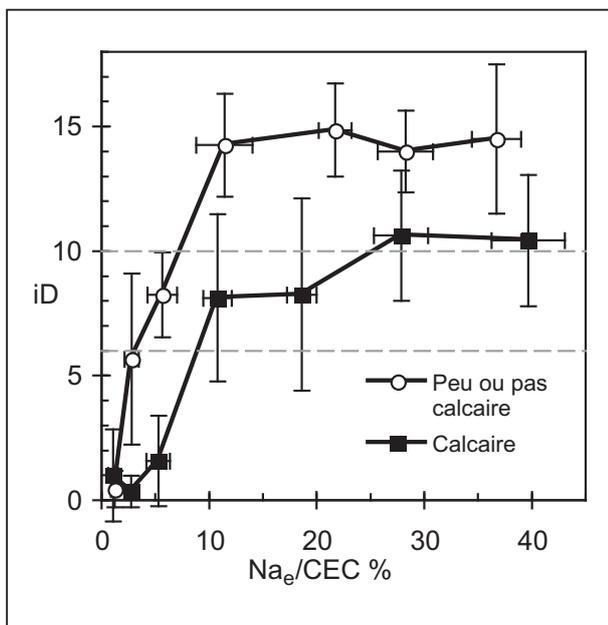
Effectivement en traçant la profondeur de la nappe en fonction de l'indice de dispersion moyen du profil (*figure 7*), on observe une forte corrélation entre l'iD moyen et la profondeur de nappe : plus le sol est dispersif, moins la nappe est profonde. On distingue 3 classes : pour les iD < 6, la nappe reste au niveau du drain, ce qui indique que le sol reste poreux dans toute sa profondeur ; pour les iD de 6 à 10, la nappe remonte jusqu'à 60 cm de profondeur et le drainage se fait donc plus difficilement, mais sans que le terrain soit inondé en surface ; pour des iD > 10, la nappe remonte près du niveau du sol. Nous prendrons donc les valeurs de 6 et 10 comme valeurs seuils pour qualifier les horizons de stables, intermédiaires et instables.

En l'absence de mesures de l'indice de dispersion, une classification équivalente des échantillons de sol peut être effectuée lorsqu'on dispose d'analyses chimiques, à partir de la teneur en calcaire

Figure 6 - Relation entre indice de dispersion (iD) et sodicité, (Na_e/CEC) selon la teneur en calcaire. On a regroupé les échantillons selon leur teneur en calcaire (faible: < 6 %, moyenne 3 %; forte: > 6 %, moyenne 12 %). Chaque point représente la moyenne et l'écart type de 4 à 29 échantillons. Les droites en pointillés séparent des zones d'échantillons stables, intermédiaires et instables selon la classification des sols présentée au paragraphe suivant.

Figure 6 - Relationship between dispersion index (iD) and sodicity (Na_e/CEC), according to limestone content. The relation between the dispersion index and sodicity is represented for samples of either low (<6%, mean 3%) or high (> 6%, mean 12%) limestone content. Each point represents the mean of 4 to 29 samples.

Dotted straight lines delimit areas of stable, intermediate or unstable samples, as discussed in the next paragraph.



et de la sodicité. La *figure 8* montre que les trois classes d'indice de dispersion (0-5, 6-9 et 10-16) correspondant aux sols stables, intermédiaires et instables peuvent être retrouvées en connaissant la teneur en calcaire et la sodicité des échantillons. On remarque qu'entre 10 et 15 % des échantillons ne sont pas dans la catégorie d'iD attendue au vu de leur analyse chimique, ce qui s'explique, pour certains cas, par l'intervention de facteurs non pris en compte, par exemple une forte salinité, rencontrée dans des terrains très sodiques.

Afin de tenir compte des rôles de chaque horizon de sol (zone de travail du sol, zone de pénétration des racines, zone d'accès au drain), nous proposons une classification des profils basée sur la stabilité structurale des trois premiers horizons de sol (*tableau 5*). Chaque type de profil représente une combinaison des trois valeurs

Figure 7 - Relation entre iD et profondeur de la nappe en hiver
Figure 7 - Relationship between dispersion index and water table depth in winter

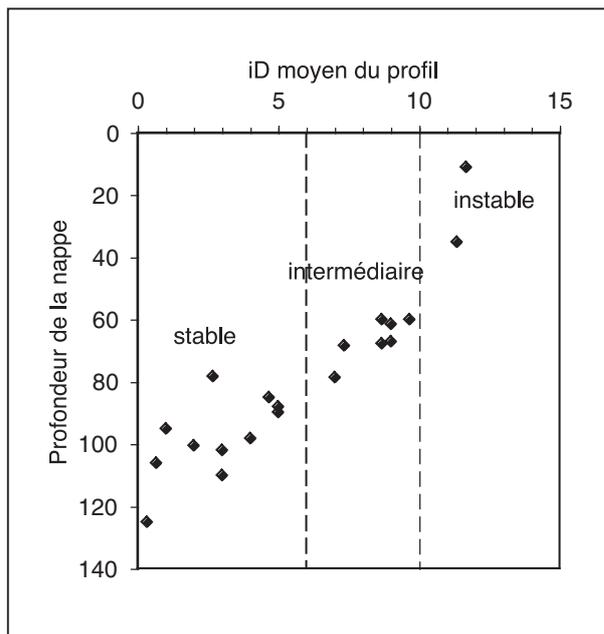


Figure 8 - Classification des sols selon leurs teneurs en calcaire et leur sodicité

Figure 8 - Classification of soils according to limestone content and sodicity

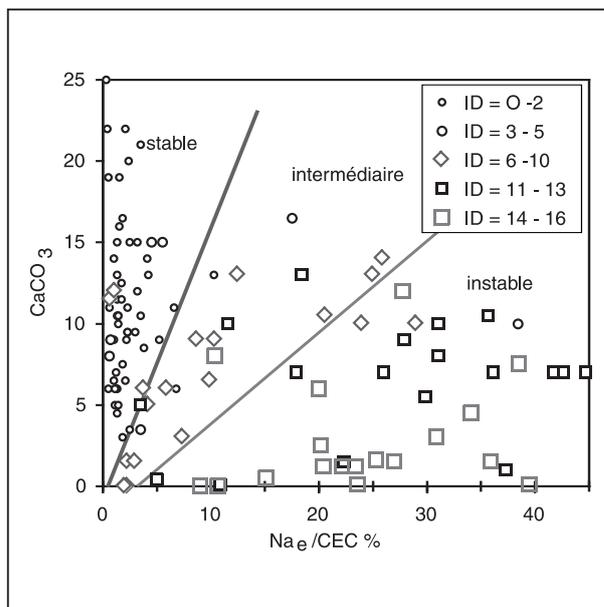


Tableau 5 - Classification des profils de sol selon la stabilité structurale (S : stable, x : intermédiaire, I : instable) des 3 premiers horizons de surface

Table 5 - Proposed classification of soils profiles according to the structural stability class (S = stable, x = intermediate, I = instable) of the 3 upper soil layers

	Profils types n°									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Horizons	Stable						Intermédiaire			Instable
0-30 cm	S	S	S	S	S	S	x	x	x	I
30-60 cm	S	S	S	x	x	I	x	x	I	I
60-90 cm	S	x	I	x	I	I	x	I	I	I

S (stable), x (intermédiaire) et I (instable) des 3 horizons. Dans la pratique, seules les combinaisons où l'instabilité croît avec la profondeur sont représentées sur le terrain. Nous obtenons donc dix classes représentatives des profils de sol rencontrés en marais.

Validation agronomique

Pour vérifier l'applicabilité aux problèmes concrets de l'agriculture des mesures d'indice de dispersion et de la classification proposée ci-dessus, nous avons étudié leur corrélation avec la profondeur de la nappe en hiver et l'agrégation en mottes dans des sols cultivés, drainés par des drains enterrés à 1 m de profondeur. De façon peu surprenante, la relation entre la profondeur de la nappe et la classe de profil de sol (*figure 9*) est très semblable à la relation entre la profondeur et l'indice de dispersion montrée dans la *figure 7*.

Pour la corrélation entre l'indice de dispersion et l'état de surface du sol, nous ne disposons de la mesure de l'indice de dispersion que dans l'horizon superficiel, mais il paraît vraisemblable que pour l'état de surface du sol, l'horizon superficiel joue un rôle prépondérant. L'état de surface du sol était noté visuellement de 0 pour une surface complètement déstructurée, dispersée et flaquée à 4 pour une surface composée de 100 % de mottes de 1 à 5 cm (*tableau 1*). Là aussi il se confirme que l'état de surface du sol est bien corrélé à l'indice de dispersion moyen des parcelles (*figure 10*).

CONCLUSION

Les résultats obtenus montrent une relation entre la sodicité, le taux de calcaire et la stabilité structurale des sols argileux gonflants dans les marais de l'Ouest. Un nouveau protocole de mesure de la dispersion fournit un indice de dispersion, noté de 0 à 16, et adapté à la mesure de la stabilité structurale de ce type de sols. On a vérifié la bonne corrélation de l'indice de dispersion avec cer-

taines caractéristiques agronomiques des parcelles cultivées : état de surface et profondeur de la nappe en hiver. Les valeurs de 0 à 5, 6 à 9 et 10 à 16 définissent respectivement des sols stables, intermédiaires et instables.

Par ailleurs, l'indice de dispersion est corrélé avec les propriétés chimiques du sol : il croît avec la sodicité jusqu'à un palier voisin de 10 pour les sols calcaires et de 14 pour les sols non calcaires. Le seuil d'instabilité du sol est atteint pour une sodicité supérieure à 25 % en sol calcaire, mais seulement à 8 % en sol non calcaire. La salinité des sols étudiés étant faible, son effet n'a pas été mis en évidence.

Ces résultats nous ont permis d'améliorer la classification des sols basée sur la sodicité en prenant en compte la teneur en calcaire. Au cours du travail nous nous sommes rendus compte que le lien entre les paramètres analytiques du sol et ses propriétés agronomiques pouvait être résumé par un paramètre unique, l'indice de dispersion, traduisant la propriété de stabilité structurale du sol. L'indice de dispersion est facile à mesurer et a un bon pouvoir prédictif du comportement du sol. Il peut donc être utilisé comme une alternative économique et efficace à l'analyse chimique, lorsque l'objectif est seulement de connaître la stabilité structurale du sol ou de prévoir son comportement hydraulique.

Ces résultats ont-ils une utilité hors des marais de l'Ouest ? Ils devraient pouvoir s'appliquer directement dans des régions ayant une histoire pédologique semblable : sols argileux sodiques dessalés, par exemple en estuaires ou en zones de polders. Le principe d'une classification des sols selon leur stabilité structurale est général et devrait avoir une utilité chaque fois que la stabilité limite les possibilités culturales (par la perméabilité et la compacité) ou constitue un facteur d'érosion.

- Sumner M.E., 1993 - Sodic soils : new perspectives. *Aust. J. Soil Res* 31, pp. 683-750.
- Tomassone R., 1987 - Comment interpréter les résultats d'une régression linéaire ? *STAT - ITCF*, 55 p.
- Tessier D., 1984 - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Université ; Paris VII ; 342 p.
- Tessier D., Pedro G., 1980 - Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols. *C. R. Acad. Sc. Paris* 291, pp. 461-464.
- Wilbert J., 1978 - Notice explicative de la carte pédologique de Lesparre (G-17). Rapport INRA, Service d'étude des sols-220 p.

ANNEXE

Méthodes pour le dosage des sels solubles et échangeables des terres argileuses salées et sodiques

Laboratoire Centre Atlantique de La Rochelle (1985).

Dosage du calcium soluble et du magnésium soluble	2 g de terre dans 100 ml 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 ml 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 ml de méthanol et 50 ml d'éthanol (lessivage des sels solubles) Percolation par 33 ml d'acétate d'ammonium (permet l'extraction du Na et K échangeables).

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 ml d'acétate de Na 1 N à pH 8.2.
--	---

Le magnésium échangeable est obtenu par différence.

Détermination de la CEC	Saturation d'une colonne comprenant 5 g 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.
--------------------------------	---

La détermination du calcium échangeable dans les terres alcalines de marais, se fait par différence :

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

Détermination du pH et de la CE 1/5	20 g de terre dans 100 ml d'eau distillée. Mesure de la CE au résistivimètre
--	---

