PIROT R., PERRET S., MANICHON H. (éds.), 1997.
Le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux.
Actes du colloque, 11-12 septembre 1996, Montpellier, France.
Montpellier, France, Cirad-Sar, collection Colloques, 160 p.

Traficabilité et gestion des opérations mécanisées : études expérimentales, modèles et formes d'aide à la décision en culture de canne à sucre

Sylvain PERRET
Cirad-Sar, 73 rue J. F. Breton, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

Résumé : Dans les conditions tropicales humides de la culture mécanisée de canne à sucre à la Réunion, la traficabilité du sol est déterminante au moment de la récolte annuelle, caractérisée par le passage d'engins lourds et par des problèmes de compaction. Dans un premier temps, on examine la traficabilité sous l'angle de la sensibilité au tassement. Un seuil de teneur en eau critique (38g. cm $^{-3}$) est mis en évidence par le test Proctor modifié, correspondant aux conditions de culture (140kJ. m $^{-3}$). Les performances d'un tracteur au labour sont mesurées au champ, selon différentes conditions de teneur en eau initiale dans la couche superficielle. On définit ainsi une teneur en eau critique, identique à la précédente, déterminante sur les états structuraux résultants, et sur le fonctionnement de la cellule motrice. Ce seuil semble déterminer à la fois la traficabilité, au sens restreint de la sensibilité au tassement du sol, et l'aptitude au labour, au sens de l'efficience d'intervention des matériels. Dans un second temps, un modèle d'évolution climatique de la teneur en eau dans la couche superficielle (0-20 cm) est élaboré. Il est calibré lors d'expérimentations et prend en compte des caractéristiques culturales de la canne à sucre. A partir du seuil de teneur en eau critique déterminé, le modèle peut constituer un outil d'aide à la décision (i) en temps réel sur des données climatiques récentes, (ii) prospectif, sur des scénarios virtuels, (iii) ou pour la planification annuelle, à partir d'analyse fréquentielle de l'occurrence de jours traficables.

Introduction

Position du problème

Les notions de traficabilité et d'aptitude au labour « *workability* » des anglophones expriment respectivement la capacité d'un sol à supporter le passage d'engins et à être travaillé correctement, *i.e.* à atteindre un état structural attendu et satisfaisant (Rounsevell, 1993). Elles supposent l'absence de dégradation du sol (compaction, dégradation des structures) et de dysfonctionnement du matériel (patinage, enfoncement des roues, déperdition énergétique). Les jours praticables « *field work-days* » des anglophones ; Rounsevell et Jones, 1993 ; Simalenga et Have, 1994 ; désignent les jours où les conditions édaphiques et météorologiques permettent la circulation et le travail des machines sur les parcelles *i.e.*, les parcelles sont traficables et/ou aptes au labour.

Dans les conditions tropicales humides de la culture mécanisée de canne à sucre à la Réunion, la traficabilité du sol est déterminante au moment de la récolte annuelle, caractérisée par le passage d'engins lourds (Siegmund *et al.*, 1989). L'aptitude au labour intéresse les opérations moins fréquentes (5 à 8 ans) de replantation et les travaux du sol qui y sont associés.

Ces travaux sont conduits essentiellement en prestation de service chez les petits producteurs, ou de façon autonome dans les grandes plantations. Dans les deux cas, les problèmes de planification des chantiers de récolte sont prédominants puisque cette opération est soumise (i) à des contraintes de calendrier (période d'ouverture des usines, délais maximum de transferts champs-usine, cycle cultural annuel de la canne en repousse), (ii) à des contraintes d'organisation (quotas de livraison attribués aux planteurs), et (iii) à des aléas (feux de parcelles, pannes, météorologie...).

Les producteurs évoquent les risques de dégradation du sol sous récolte mécanisée, et les baisses de rendement qui peuvent en découler par triturage / écrasement des souches et tassement du sol. Certains planteurs se sont équipés d'outils de décompactage, qu'ils passent systématiquement entre les rangs après

chaque récolte. D'une manière générale, Torres et Rodriguez (1996) soulignent l'importance du compactage lié aux passages d'engins en conditions humides en culture de canne à sucre.

Problématique et hypothèses

Par rapport au compactage, deux types de questions se posent aux opérateurs :

- quel risque sera pris, que sera le résultat probable de l'intervention réalisée à une période donnée et comment et quand remédier aux éventuels problèmes de tassement (décompactage après récolte) ;
- de façon complémentaire, dans un objectif de planification, quelle est la période, ou les jours probablement les plus adaptés à l'intervention dans une zone donnée ?

La finalité de la démarche est d'apporter des informations aux opérateurs, sous la forme d'une aide à la planification des opérations de récolte, de décompactage post-récolte, et de travail du sol. Nous proposons (i) d'évaluer les risques associés à certaines conditions initiales, et (ii) d'établir un modèle d'évolution de ces risques.

La combinaison de ces deux types d'information apparaît essentielle, car la seule définition de jours praticables n'a pas toujours de sens pour l'opérateur (exploitant ou prestataire de service). Celui-ci doit souvent travailler de toute façon à une période donnée, contraint par un calendrier cultural, des engagements prévus sur d'autres exploitations, des concurrences entre activités, le partage du matériel sur un territoire... (Nezet, 1995). Il apparaît donc indispensable de pouvoir évaluer la qualité probable des travaux et les risques encourus en conditions peu favorables.

Le domaine de l'étude intéresse une zone d'environ 1 200 ha, sur laquelle la récolte mécanique représente plus de 50 % des surfaces récoltées, en raison des faibles pentes, de la pierrosité limitée et de la taille des parcelles (le ratio coupe mécanique-coupe manuelle est de 11 % sur l'ensemble de la surface en canne de l'île). Le sol est un sol brun ferrallitique faiblement désaturé, soumis à un climat tropical humide (1 500 à 1 800 mm par an) (Raunet, 1991). La figure 1 représente le domaine géographique de validité des résultats obtenus.

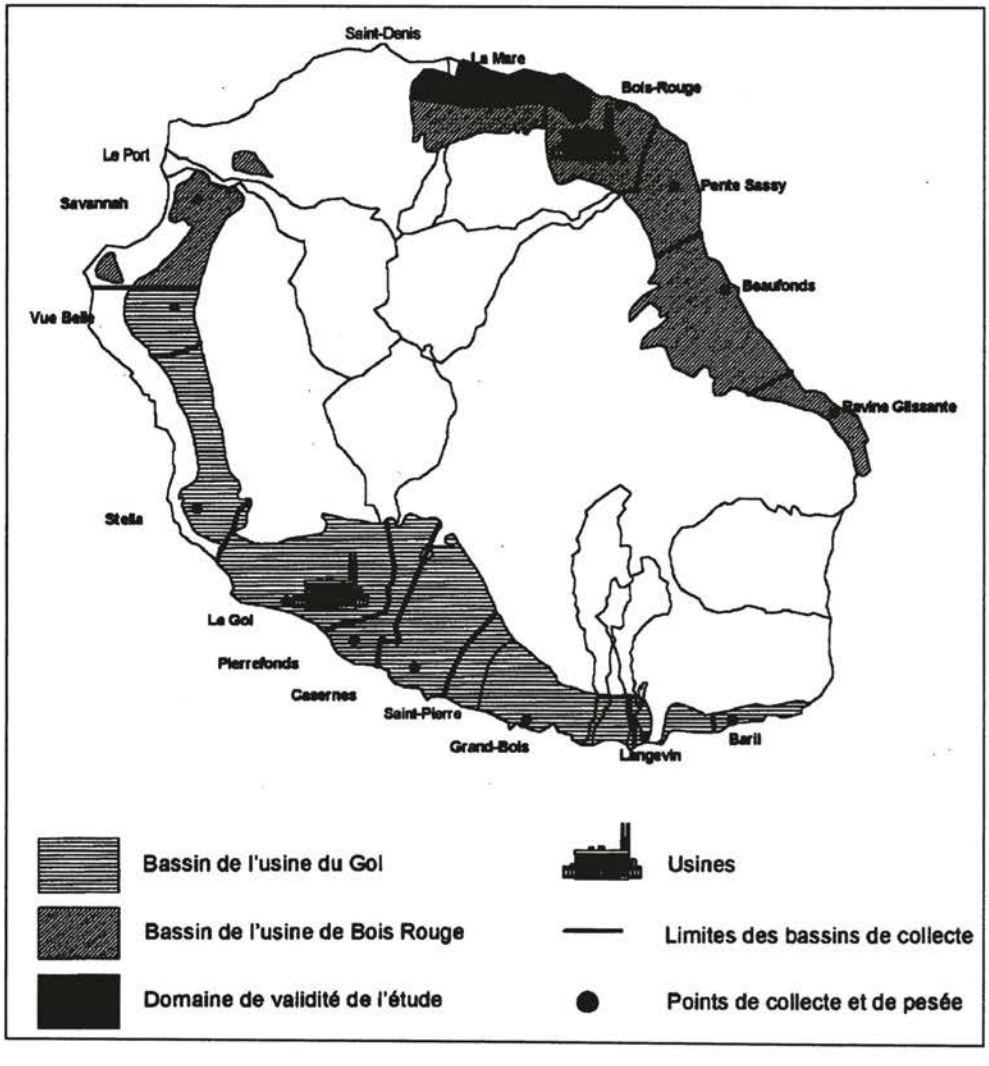

Figure 1. *Bassins canniers et usines à la Réunion en 1996 ; zone d'étude : 1 200 ha sur sol brun ferrallitique faiblement désaturé ; pluviométrie : 1 500-1 800 mm.*

Notions de traficabilité et de jours praticables : revue bibliographique

La traficabilité et l'aptitude au labour d'un sol sont déterminées par la cohérence mécanique (soil strength des anglophones), qui résulte de forces interactives entre particules de la matrice du sol : la cohésion et la friction. La cohérence du sol peut être évaluée directement au champ par pénétrométrie à cône (Collas, 1987 ; Godwin *et al.*, 1991). Des relations existent également entre cohérence et succion matricielle, mesurée au champ par tensiométrie (Earl, 1996). Une évaluation immédiate de la traficabilité est possible par ces deux variables. Cependant, aucune de ces solutions ne permet la formulation d'un conseil prévisionnel en terme de calendrier cultural.

L'état hydrique, principal déterminant de la cohésion d'un sol donné (Godwin et Spoor, 1977), peut s'exprimer sous forme de teneur en eau. Dépendante du climat, la teneur en eau dans les couches superficielles du sol influence fortement les conditions de réalisation des opérations mécanisées. Elle constitue en effet le principal facteur de patinage des engins (Rounsevell, 1993), d'évolution du sol après travail (Papy, 1987 ; Braunack et McPhee, 1991), mais aussi de décision d'intervention pour les opérateurs (Reboul, 1982).

Des modèles bioclimatiques de l'évolution de l'état hydrique ont été élaborés dans différentes conditions et permettent d'estimer les jours praticables à partir de données météorologiques historiques (Reboul, 1982 ; Oskoui, 1988 ; Rounsevell et Jones, 1993 ; Simalenga et Have, 1994). On notera toutefois que les seuils retenus dans ces modèles font référence empiriquement soit à la capacité au champ ou à la limite de plasticité, soit à des perceptions d'experts. De plus, ils ne font explicitement référence ni au risque de dégradation physique encouru, ni au fonctionnement du matériel.

D'une manière générale, l'usage des modèles de bilan hydrique nécessite des données expérimentales déterminant des seuils critiques. Rounsevell (1993) évoque la nécessité de travaux complémentaires sur le rôle combiné du sol et du climat sur la traficabilité. Il convient en même temps d'accepter le caractère localisé des données obtenues, relatives à des conditions agricoles, pédologiques et climatiques données.

Dans la première partie de ce travail, l'objectif est de définir précisément les relations entre état hydrique du sol, traficabilité (risque de compactage) et aptitude au labour (état structural résultant) dans une situation donnée. En combinant des tests de laboratoire et des essais au champ, on cherche à valider une méthode simple et facilement reproductible pour définir les seuils critiques.

Teneurs en eau critiques et performances des matériels agricoles

Matériels et méthodes

L'appareillage métrologique embarqué

Les recherches pratiques sur les performances des tracteurs et des équipements en conditions réelles nécessitent un équipement portable. De nombreuses études ont été menées sur le sujet durant les années 80, et passées en revue par Mc Laughlin *et al.* (1993).

Les mesures au champ des performances des équipements de travail du sol sont à présent possibles par l'utilisation de capteurs peu coûteux et performants, issus de l'industrie, et associés à une centrale d'acquisition d'utilisation aisée (Pirot et Vaitilingom, 1987 ; Smith, 1990 ; Glancey et Upadhyaya, 1995). Une chaîne d'acquisition embarquable et modulable a ainsi été développée par le Cirad (Pirot, 1992 ; Perret *et al.*, 1994*b*).

Ce matériel permet de mesurer les paramètres caractéristiques d'intervention des tracteurs et de leur équipement associés ; par exemple, la consommation de carburant, la vitesse de rotation du moteur, la vitesse réelle de déplacement, la profondeur de travail, la pente, l'effort de traction. La combinaison de certains paramètres avec les caractéristiques spécifiques au tracteur conduit à d'autres paramètres tels que le glissement et la puissance à la prise de force (Pto). L'horloge interne de la centrale d'acquisition permet de calculer aisément les temps de travaux. De tels équipements offrent des possibilités nouvelles dans l'étude des performances des matériels en conditions réelles (Smith, 1993 ; Perret *et al.*, 1994a ; Perfect *et al.*, 1997).

Les mesures sur le sol et l'analyse des données sol-machine

Il est apparu intéressant d'associer ces mesures de performances avec certaines caractéristiques du sol au moment du travail. L'état du sol constitue en effet la principale cause de variation de ces performances au cours d'un chantier. Celles-ci peuvent alors être très différentes des références fournies par les constructeurs, obtenues sur banc ou en conditions standard.

L'objectif des expérimentations engagées était de cerner les relations entre certaines caractéristiques de fonctionnement du matériel au labour et la teneur en eau du sol au moment du travail.

Pour associer des données relatives au fonctionnement du matériel, et des données relatives au sol, il

faut convenir d'espaces élémentaires dans le champ travaillé, qui constitueront les mailles de base, auquel il est possible d'attribuer ces données.

Ainsi, chaque passage de charrue est découpé en segments virtuels, rectangulaire — appelés blocs —, dont la longueur dépend de la vitesse de déplacement et du temps de scrutation de la centrale d'acquisition. La largeur de ces blocs est la largeur de travail.

La démarche consiste à attribuer à ces blocs des variables caractérisant le sol au moment du travail. Or, on ne peut connaître à priori ni leur position dans la parcelle, ni leur taille avant la réalisation du chantier. Il faut donc adopter une méthode qui permette d'attribuer, à posteriori, à tout point ou à toute surface de la parcelle (les blocs) des données liées au sol, obtenues à partir d'un échantillonnage initial.

Un maillage régulier a donc été construit (2 m x 2 m), sur lequel ont été mesurées les teneurs en eau avant labour. Ces mesures ont été effectuées avec une sonde mixte gamma-neutrons (Campbell pacific nuclear 1501B), dans la souche 0-15 cm de profondeur. De la même façon, les mesures de masses volumiques sèches et humides ont été relevées. Enfin, l'utilisation d'un pénétromètre à cône à chaque nœud du maillage a permis de mesurer la résistance à la pénétration (cône index, surface du cône utilisé : 2 cm^2).

La méthode retenue est l'interpolation géostatistique par krigeage, pouvant être utilisée pour les propriétés du sol (Burgess et Webster, 1980*a*). C'est une forme de moyenne locale pondérée. Il est optimal dans le sens où il donne des estimations de valeurs en des points non relevés, en prenant en compte la variabilité spatiale du paramètre sur l'ensemble du dispositif. Par rapport à d'autres méthodes, il est non biaisé, il permet l'estimation de l'erreur d'interpolation, en minimisant cette erreur (variance minimum). Le logiciel Geo-Eas, développé par United States environmental protection agency, a été utilisé (Englund et Spark, 1991).

Le krigeage par point a permis de dresser une carte isovaleur de la teneur en eau superficielle. En utilisant le krigeage par bloc (Burgess et Webster, 1980*b*), il a été possible d'attribuer à chaque bloc une valeur de teneur en eau lors de l'expérimentation.

La parcelle expérimentale à labourer couvre 2 000 m^2, la zone d'étude cartographiée grâce au maillage initial puis labourée couvre 450 m^2 (45 m x 10 m). De façon pratique, la moitié de la parcelle a été irriguée pendant les deux jours précédant l'essai (maximum 30 mm dans la zone la plus arrosée), de façon à créer des conditions contrastées en teneur en eau. Les mesures de teneur en eau ont été effectuées quelques heures avant l'essai (mesures 6 à 8 heures avant la réalisation du labour, selon la position des blocs).

Le labour a été réalisé avec un tracteur Massey Fergusson 294 à 4 roues motrices, de 2 850 kg (dont 60 % sur les roues arrière), et une charrue Huard bisoc réversible, à versoirs hélicoïdaux de 14 pouces. Ce travail a été réalisé sous contrôle d'effort, des zones sèches vers les zones humides. Les versoirs ont été nettoyés avant chaque passage.

Enfin, quatre fosses ont été creusées après la réalisation des chantiers, dans des zones d'états hydriques initiaux différents. Les états structuraux obtenus dans la couche labourée ont été décrits.

Le test de sensibilité au tassement

Cette manipulation vise à étudier au laboratoire l'influence de l'énergie de compactage et de la teneur en eau initiale du matériau θ sur sa masse volumique apparente sèche γd *(bulk density)*. C'est, parfois appelé test Proctor, était initialement utilisé par le génie civil et routier américain *(American society for testing and materials*, 1979, cité par Bradford et Gupta, 1986). Il met en œuvre des énergies élevées (entre 530 et 2 710 kJ/m^3).

Les couples $\theta/\gamma d$ obtenus permettent d'établir une courbe caractéristique de la sensibilité au compactage d'un matériau pour une énergie donnée (figure 2). L'adaptation de ce test à des sols et à des énergies agricoles est assez récente (Faure et Fiès, 1972). Le moule Protor original de 950 cm^3 est généralement conservé, mais la gamme de teneur en eau est étendue et l'énergie utilisée est réduite.

Si l'on peut proposer des plages de consistance liées à l'énergie de compactage développée, il devient très pertinent de définir les énergies mises en jeu par différentes machines ou niveaux de mécanisation.

Siegmund (1982) a mesuré *in-situ* des couples $\theta/\gamma d$ obtenus sous chantier de récolte de canne à sucre intégralement mécanisée à la Réunion. Un calage graphique avec des courbes de sensibilité au compactage établies en laboratoire a permis de déterminer expérimentalement l'énergie de compactage mise en jeu au champ : 140 kJ/m^3, soit un compactage réalisé en 3 couches, dans le moule, avec une dame de 1 105 g, tombant de 18,6 cm en 22 coups par couches. Compte tenu du niveau de mécanisation agricole atteint à la Réunion, cette énergie représente virtuellement le risque maximum de compactage possible. de plus, elle correspond à une énergie de 100 kWh.ha^{-1} pour un travail réalisé à 25 cm, avec un tracteur de 2 850 kg et 6 kW de puissance moteur. C'est le niveau d'énergie qui sera mis en œuvre lors des tests de compactage réalisés sur nos échantillons.

Résultats : mise en évidence de teneurs en eau critiques

Sensibilité au tassement et rétention de l'eau

Les résultats des tests sont relatés en figure 2. Aux faibles teneurs en eau θ le matériau est peu sensible aux effets du compactage : la masse volumique apparente sèche n'augmente pas en fonction de l'augmentation d'humidité initiale (elle diminue même en présence d'argiles gonflantes). A partir de 35 % de teneur en eau, le matériau se déforme, sa porosité diminue sous la contrainte appliquée, la masse volumique apparente γd sèche augmente jusqu'à un maximum, correspondant à une teneur en eau optimale. Faure (1978) considère que le matériau est à la consistance plastique dans cette plage de teneur en eau.

Au-delà, on se trouve en présence d'un fluide incompressible (boue biphasée, consistance liquide), la masse volumique décroît en fonction de la quantité d'eau introduite, la courbe devient tangente assymptotiquement à une droite d'équation :

$\gamma d = (1 - \theta) * \gamma s$

γs étant la densité de la phase solide (2,7)

θ étant la teneur en eau volumique ($cm^3.cm^{-3}$).

Cette droite délimite la saturation en eau, elle coupe l'axe des ordonnées à la volumique du solide (γd = γd), étant représentant le matériau hypothétiquement monophasé (porosité nulle).

Le sol dépasse la densité de 1,2 à partir de 38 %. Cette densité est celle habituellement mesurée au champ dans des systèmes faiblement motorisés, *i.e.* sans compaction. La compaction maximale est atteinte au-delà de 45 %, pour une densité de 1,32. La teneur en eau à la capacité au champ (évaluée sous pression d'air à 6,3 kPa, soit pF1.8) est de 41 % dans des mottes de densité 1,2. La teneur en eau à saturation est de 48 % dans des mottes de densité 1,2. On constate que ces teneurs en eau caractéristiques sont cohérentes avec celles observées sur les éprouvettes Proctor, en terme de couple densité/humidité.

Performances des matériels et teneur en eau initiale

Compte tenu de la gamme de variation des teneurs en eau obtenues sur le terrain et des seuils mis en évi-

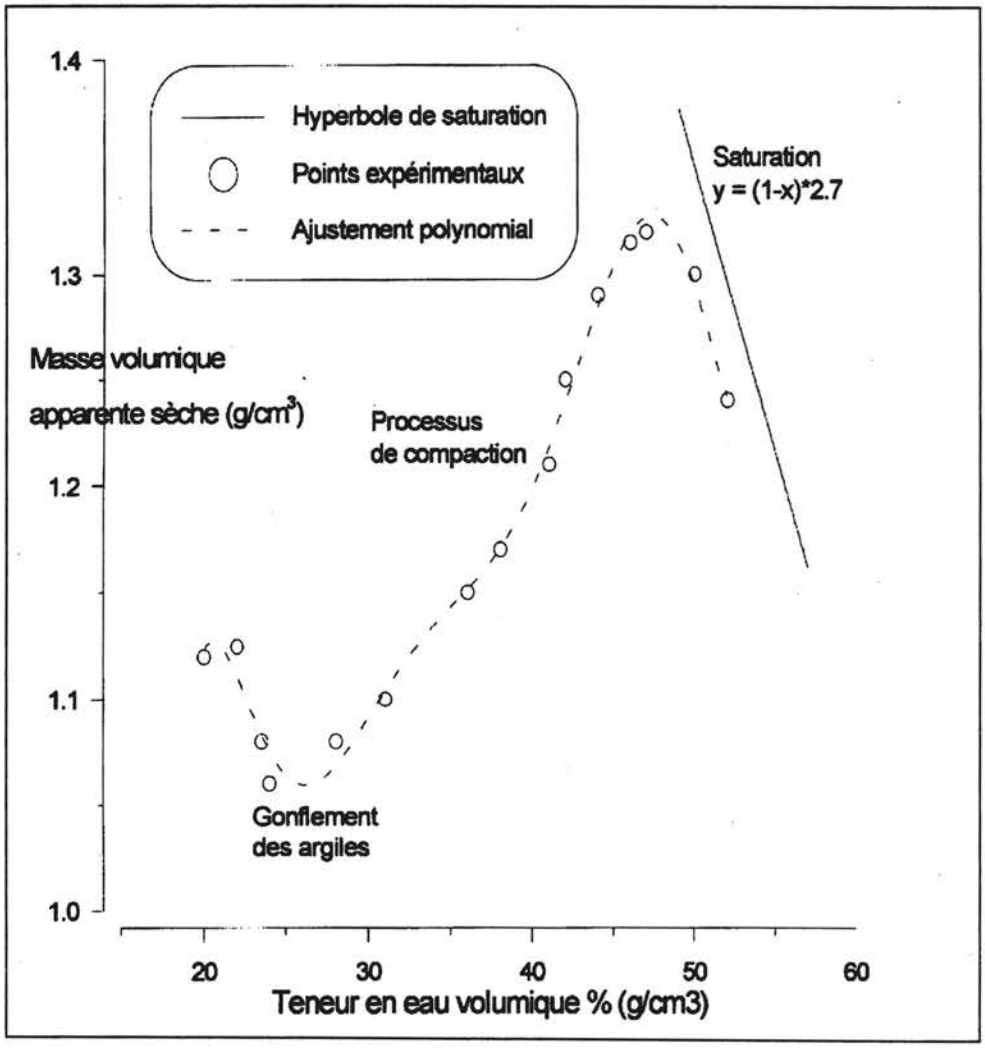

Figure 2. *Test de sensibilité au compactage dynamique (Proctor modifié) sous contrainte dynamique de 140kJ. m⁻³.*

dence, les données relative aux blocs labourés ont été classées par teneur en eau et évoquées au tableau I.

Ces résultats sont cohérents avec le mode de travail en contrôle d'effort automatique : pour maintenir l'effort à la barre constant, l'action du relevage automatique a occasionné un travail moins profond lorsque le sol était plus sec et plus cohérent. Au contraire, la profondeur travaillée a été plus importante lorsque le sol était plus humide.

On observe que la dépense énergétique globale a tendance à diminuer avec l'augmentation de la teneur en eau du sol, puis elle augmente à nouveau au-delà de 40 % en raison des pertes dues au glissement. Les différences de consommation entre classes de teneur en eau ne sont toutefois pas significatives en raison de la grande variabilité des données obtenues (capteur fuel-pet peu précis dans la gamme de consommation).

En termes de traficabilité, le glissement est limité jusqu'aux teneurs en eau inférieures à 40 %, puis augmente de façon significative. Ce processus est cohérent avec les données obtenues en laboratoire avec les tests de compactage dynamique.

Etats résultant du sol et teneur en eau initiale

Après travail, l'observation des fosses indique des états structuraux différents. Dans les zones à teneurs en eau inférieure à 30 %, les mottes préexistantes ne sont pas émiettées mais brisées en mottes plus petites, le travail a engendré peu de terre fine. Aux teneurs en eau comprise entre 30 et 40 %, le travail a été plus efficient. Le retournement est bien réalisé, seules quelques mottes tassées décimétriques préexistantes subsistent, la couche travaillée est constituée d'un mélange de terre fine et de petites mottes. Dans les zones à teneurs en eau supérieures à 40 %, le retournement s'est mal réalisé, notamment en raison du collage de la terre au versoir. on observe par endroit des figures de tassement et de lissage dans le profil (terre comprimée par le versoir ou par les pneumatiques en surface, passage de pneumatiques en fond d'enrayure).

Discussion

Le tableau II propose une synthèse des résultats. Ils soulignent le caractère relatif de la notion de performance des matériels. Les conditions initiales influencent nettement ces performances et sans doute les coûts qui en peuvent en découler, mais aussi les produits des travaux réalisés. Dans la situation étudiée, on met en évidence une plage de teneur en eau plus favorable au passage d'engins, en terme de traficabilité et d'aptitude au labour. Les risques les plus importants apparaissent au-delà de 40 %. Le compactage devient significatif au-delà de 38 %. C'est le seuil de traficabilité qui est retenu. Cette valeur est cohérente avec celles habituellement utilisées, situées entre 90 % et 95 % de la capacité au champ (Rounsevell, 1993 ; Simalenga et Have, 1994). On peut ajouter qu'en dessous de 30 %, l'aptitude au labour est atténuée si l'on considère les structures résultantes motteuses et la dépense énergétique plus forte (forte résistance à la pénétration).

Tableau I. Performances moyennes obtenues par classes de teneur en eau superficielle (tracteur MF 292, 4 RM, charrue bisoc réversible 14 pouces).

Teneur en eau	Cone index MPa	Régime moteur (rpm)	Vitesse réelle ($m.s^{-1}$)	Consommation ($l.h^{-1}$)	Glissement %	Profondeur de travail (cm)	Puissance à la barre (kW)
25-29 %	7.3^{a}	2042^{a}	0.65^{a}	6.7^{a}	7.6^{a}	24.7^{a}	7.8^{a}
30-34 %	6.2^{ab}	1911^{bc}	0.60^{b}	6.5^{a}	8.8^{a}	28^{a}	7.7^{a}
35-40 %	5.7^{bc}	1964^{bc}	0.63^{ab}	6.5^{a}	8.7^{a}	26.7^{a}	8.2^{a}
40-45 %	4.6^{c}	1897^{bc}	0.60^{ab}	7.0^{a}	15.5^{b}	29.6^{a}	7.8^{a}

Des lettres différentes attribuées en exposant aux chiffres indiquent une différence significative à $P < 0,01$ (Test student bilateral).

Tableau II. Relations entre état hydrique initial, propriétés du sol, performances et états résultants.

Etat initial	Teneur en eau superficielle Résistance à la pénétration	< 35 %. forte	35-40 %. modérée	> 40 %. faible
Etat résultant	Risque de compaction Structures	nul persistance de mottes compactes, peu de terre fine	modéré mottes centimétriques et terre fine	fort mottes collantes et mal retournées, zones compactées
Performances	Glissement Dépense énergétique globale	faible forte	faible modérée	fort forte

Cette convergence des résultats permet d'envisager l'extension de la démarche vers d'autres situations pédo-climatiques sans avoir recours aux expérimentations lourdes qui ont été conduites ici. En effet, il apparaît que la combinaison de test de sensibilité à la compaction et de déterminations de teneurs en eau caractéristiques peut suffire à déterminer une teneur en eau critique pour l'intervention des matériels. Ces différentes valeurs vont être retenues pour construire les modèles de prédiction des jours traficables.

Modélisation et élaboration d'un conseil

Justification, domaine de validité du conseil

Les opérateurs n'ont souvent accès à la variable « teneur en eau » que de façon empirique, en mobilisant une expertise personnelle et des indicateurs visuels (état et couleur du sol en surface, climatologie récente...). Pour valoriser les résultats obtenus, c'est-à-dire compléter le système d'information dont disposent les opérateurs et répondre aux questions posées, il s'agit d'estimer la teneur en eau probable sur une période à venir (prévoir les risques) et/ou proposer un calendrier probabilisé associant un niveau de risque à une période.

Pour cela, il faut appréhender (i) l'évolution de la teneur en eau superficielle en fonction du climat par la modélisation du bilan hydrique, puis (ii) l'analyse des jours ou périodes traficables.

On notera que la démarche se focalise sur la détermination de jours agronomiquement traficables. Comme évoqué plus haut, cette information n'est opératoire, sur le calendrier de l'exploitation ou du parc de matériel, qu'une fois combinée avec les autres composantes des systèmes d'information et de décision de l'entreprise.

Le modèle de bilan hydrique

Principes et limites

La démarche consiste en l'élaboration d'un modèle bioclimatique de bilan hydrique quotidien, appliqué sur les couches superficielles et en relation avec les seuils mis en évidence plus haut. Maraux (1994) évoque l'intérêt comparé des modèles fonctionnels les plus couramment cités par la littérature. Celui qui est construit ici est parmi les plus simples car seules la couche supérieure du sol est prise en compte, considérée comme uniforme. Il s'agit d'un réservoir qui se remplit avec les pluies, qui déborde à saturation, qui se vide par drainage rapide entre la saturation et la capacité au champ ; par évapotranspiration seule entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. Enfin, la validité du modèle est restreinte à la canne à sucre, en tant que système extracteur d'eau et couvert évaporant.

Les précipitations P et le rayonnement solaire global Rg quotidiens sont fournis par une station météorologique automatique. L'évapotranspiration potentielle Etp-Penman est calculée à partir du rayonnement global selon un ajustement validé localement (Généré, 1990). L'évapotranspiration réelle Etr est évaluée à partir de Etp et en fonction de l'enracinement, de l'état du couvert aérien (Indice foliaire, converti en coefficient cultural Kc ; Martiné, 1996) et de l'état hydrique du sol (Vaksman, 1986).

On cherche à estimer quotidiennement le stock moyen sur 20 cm, Sj mm, en début de journée j, à 7 h 00, *i.e.* heure théorique de début de chantier. Cette estimation est régionalisée, relative à des conditions agro-pédo-climatiques données (une station météorologique, une micro-région de culture et de collecte de canne, un type de sol, soit environ 1 200 ha dans la situation étudiée, voir figure 1).

L'hypothèse majeure préalable à ce modèle est la suivante : la couche 0-20 cm est considérée comme indépendante et objet unique d'interactions avec les opérations mécanisées. On néglige en effet les interactions possibles entre couches plus profondes, fonctionnement hydrique superficiel, et fonctionnement du matériel.

A l'échelle de la prévision journalière, les problèmes de calage sont de deux ordres (Rounsevell, 1993). Tout d'abord, la contribution des processus bioclimatiques est considérée comme chronologique durant le jour météorologique (7 h-7 h) pour faciliter le calcul. Considérant toutefois que la pluie peut être répartie sur l'ensemble des 24 h, alors que l'évapotranspiration concerne essentiellement les heures à fort ensoleillement (10 h-17 h), on propose la répartition suivante : 1/2 P et processus associés éventuels (ruissellement et drainage) ; évapotranspiration, puis 1/2 P et processus associés éventuels. Sous fortes précipitations, ce principe permet à la fois d'étaler pluies et processus associés et de ne pas atténuer le stock sous l'effet de la demande climatique.

Le deuxième problème est la dynamique hydrique entre la saturation et la capacité au champ, *i.e.* le drainage dans la couche superficielle qui détermine le retour à la traficabilité. Ce point nécessite une instrumentation et des références spécifiques par type de sol pour caler le modèle.

Etablissement du modèle

Les données de base du modèle ont été obtenues soit en laboratoire (rétention d'eau dans des mottes sous

pression d'air -pF-), soit au champ par humidimétrie Tdr. La teneur en eau critique représente la limite de disponibilité totale (Réserve facilement utilisable) de l'eau du sol par la plante, soit 2/3 de la réserve utile (Cc-Pfp) (Hillel, 1975).

Rappelons que le seuil de traficabilité retenu se situe à un stock de 76 mm (0,38 cm^{-3}. cm^{-3} sur 20 cm). Les risques maximum de dégradation et de tassement interviennent au-delà de 80 mm.

Le texte qui suit pose les principes de calcul du modèle. les hypothèses et les différents paramètres retenus ont été ajustés lors de phase de calage décrites par la suite.

ALGORITHME GÉNÉRAL

Sj est la teneur en eau moyenne sur 20 cm (stock) au jour j à 7 h 00.

Sj mm = θ $cm^{-3}.cm^{-3}$ * 200 mm

Pour calculer Sj, l'algorithme considère de façon chronologique :

Sj = Sj – 1 + (1/2 Pj – 1 – (R + D)) – Etrj – 1 + (1/2Pj – 1 – (R + D))

Sj-1 mm, teneur en eau au jour j – 1 à 7 h 00.

CALCULS RELATIFS AUX APPORTS D'EAU

Pj-1 mm, précipitations en j –1 (7 h 00 à 7 h 00)

R mm, ruissellement associé aux précipitations P, si P > 20 mm :

si P < 20, alors R = 0 ; sinon, R = 0,3*(P – 20) (Perret, 1993)

D mm, drainage associé aux précipitations P, chaque fois que le stock dépasse la capacité au champ, *i.e.* 82 mm.

si Sj-1 + (1/2 Pj – 1 – Rj – 1)> 82 mm, Sj – 1 = 82 mm (alors 1/2 pj – 1)

sinon, pas de drainage.

CALCULS RELATIFS À LA DEMANDE ÉVAPORATIVE

Etp Evapo-Transpiration Potentielle en J – 1, son expression effective Etr (Et réelle), liée à l'état du couvert végétal (indice foliaire et coefficient cultural Kc), lié à l'extraction racinaire dans la couche considérée (coefficient d'extraction Kz, 0-20 cm) et lié à l'état hydrique du sol (coefficient de disponibilité en eau Kw).

Etr = Etp*Kc*Kw*Kz

Kc est estimé d'après Fauconnier (1991), adapté aux conditions locales et à la dynamique du couvert végétal (Indice foliaire) déterminé à partir de sommes de températures moyennes journalières (Martiné, 1996). Kc augmente à partir de la date de coupe (récolte), plus 10 jours. Kc est alors égal à 0,3, et atteint un maximum de 1,2 après un nombre de jours N1 qui dépend de la somme des températures journalières. On modélise ainsi l'accroissement de Kc en relation avec la date de coupe dh. Celle ci est exprimée comme le nombre de jours N2 séparant dh et le début de campagne (1er juillet). La validité du modèle couvre la durée hypothétique de la campagne (1er juillet-31 décembre).

N1 = -0,275251*N2 + 140,409

Kc évolue de la façon suivante, par jour n (nombre de jour après coupe) :

si n est compris entre N2 et [N2 + 10], Kc = 0,3

si n est compris entre [N2+11]
et [N2 + (N1-N2-11)/2], Kc s'accroît de 0,3 à 0,6

si n est compris entre [N2 + (N1-N2-11)/2]
et N1, Kc s'accroît de 0,6 à 1,2

Kw est évalué ainsi : on suppose que la fourniture d'eau par le sol n'est pas limitante entre la capacité au champ Cc et les deux tiers de la réserve utile Ru (soit la réserve facilement utilisable Rfu). A partir de ce point, on considère une atténuation linéaire de Kw jusqu'à une valeur nulle au Point de flétrissement permanent (Pfp) (Vaksman, 1986).

Rfu = Cc – 2/3*(Cc - Pfp),

ainsi, quand S > Rfu alors Kw = 1;

quand S < Rfu, alors Kw = 0,0714*S – 2,857

On considère qu'une partie importante de l'enracinement fonctionnel en tant que capteur d'eau de la canne se situe dans la couche superficielle (0-20 cm). Kz a été estimé expérimentalement à 0,5.

Résultats

Calage et fonctionnement du modèle

L'intérêt du modèle réside dans son aptitude à estimer correctement des teneurs en eau superficielles sur de longues séries. Un exemple de simulation sur un mois est fourni en figure 3 sur l'hypothèse d'une parcelle récoltée début décembre. L'utilisation d'un humidimètre par réflectométrie temporelle facilite le calage du modèle (Cassel *et al.*, 1994 ; Lorré et Perret, 1996). Ce matériel a été mis en œuvre sur différentes parcelles de canne à sucre, à différentes périodes. Les simulations ont été conduites simultanément, et les paramètres du modèle ont ainsi pu être ajustés (Kz notamment) ou validés (Kc). L'hypothèse d'atténuation linéaire de Etr entre l'humidité critique Rfu et le point de flétrissement permanent a ainsi été validée (Kw).

Mais, au regard des objectifs assignés, le modèle doit également présenter une grande sensibilité aux phases de drainage rapide après de fortes précipitations. Ces phases de passage de la saturation à la capacité au champ sont déterminantes dans le retour à la praticabilité. Des suivis ont été conduits dans ces conditions avec le matériel Tdr (1502b Campbell

Scientific) associé à un data-logger (21X Campbell Scientific), qui permet une acquisition horaire des données (Lorré et Perret, 1996). La figure 4 représente un suivi horaire de teneur en eau superficielle durant lequel des apports d'eau contrôlés en volume ont été effectués (irrigation).

Ce type d'expérimentation a permis (i) de valider le seuil de saturation au-delà duquel tout apport est évacué sans stockage (93 mm), (ii) d'identifier la capacité au champ en tant que fin de la phase de drainage rapide (82 mm), et (iii) de mettre en évidence la dynamique de drainage entre ces deux seuils. Il apparaît en

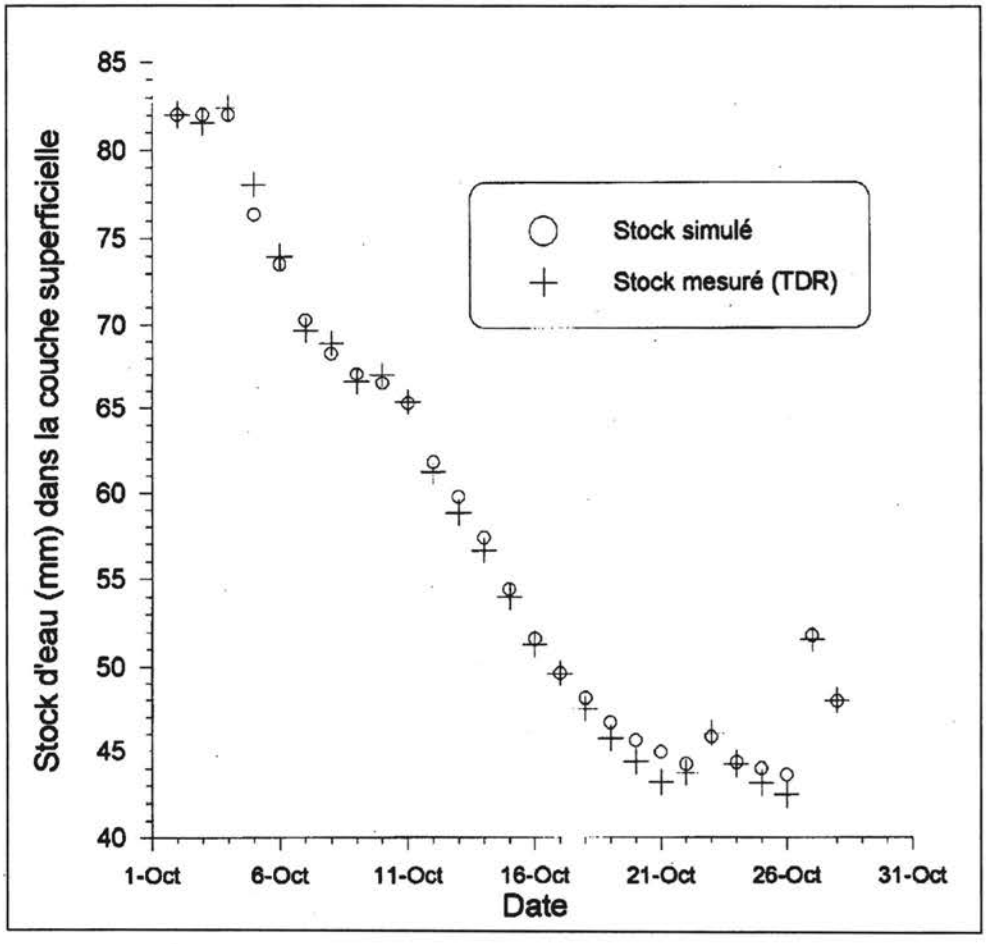

Figure 3. *Stock d'eau dans la couche superficielle (mm). Données simulées et mesurées (Tdr) sur un mois.*

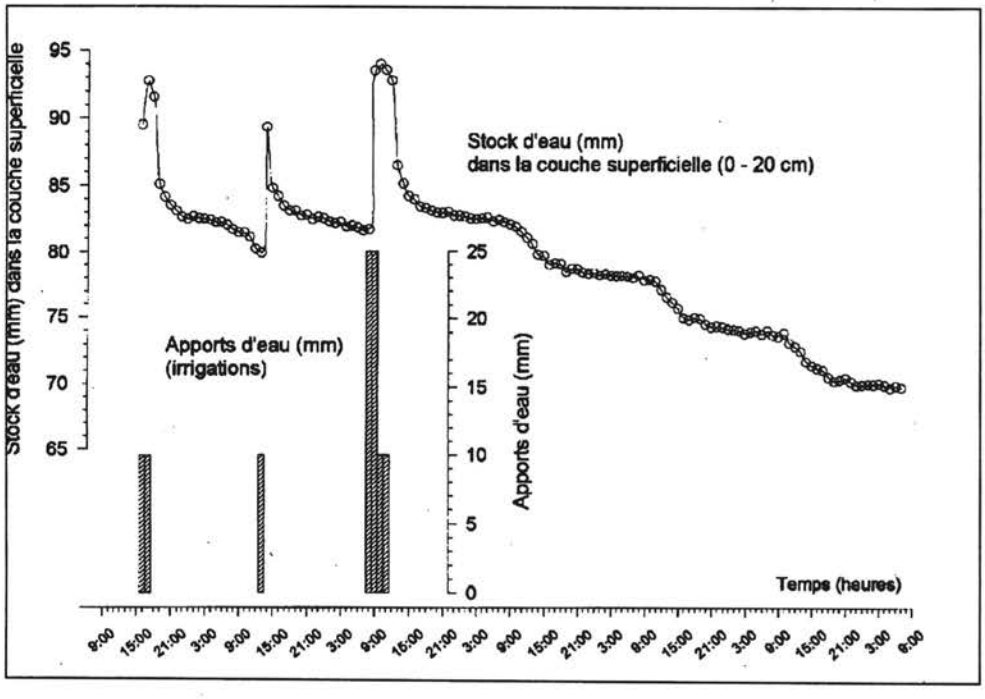

Figure 4. *Suivi de stock d'eau dans la couche superficielle (0-20 cm) en relation avec les apports (pluies et irrigations).*

effet que 6 à 8 heures sont nécessaires pour passer de la saturation à la capacité au champ dès le jour suivant de fortes précipitations ayant saturé le sol.

En outre, ces suivis soulignent les performances de l'appareillage utilisé : homogénéité des séries (fidélité), sensibilité à de faibles variations de stock.

Le modèle peut être utilisé sur un calendrier. Il permet alors de mettre en évidence les périodes à risques, de façon rétrospective. Son utilisation en temps réel à partir de données météorologiques enregistrées est illustrée en figure 5. Il peut être enfin exploité de façon prospective, sur des scénarios climatiques ou organisationnels (dates de coupe).

Analyses fréquentielles et jours traficables

A partir de données météorologiques historiques, on peut exploiter le modèle en déterminant l'occurrence des jours agronomiquement praticables (Jap), par décades.

Les deux critères retenus pour juger de l'opportunité d'intervenir le jour J sont : (i) une teneur en eau dans l'horizon superficiel inférieure à 38 % (76 mm) au matin du jour J, (ii) des précipitations totales inférieures à 10 mm durant le jour J (critère évoqué par certains opérateurs).

Dans les exemples fournis en tableaux III et IV, on propose un dénombrement des JAP par décades : moyenne, minima absolus observés sur la série climatique, minima observés 7 années sur 10. L'effet de la date de coupe y est particulièrement notable.

Ce référentiel constitue une forme de conseil en terme de planification annuelle. On distingue en effet nettement (i) les décades à haut risque, et (ii) celles qui présentent de fortes probabilités de praticabilité. Les premières sont identifiées par des moyennes de Jap et des minima absolus observés faibles (ex : les trois décades de février ou de décembre). Les secondes se distinguent par des minima, observés 7 années sur 10, et des minima absolus élevés (ex : les trois décades d'octobre).

En relation avec la campagne de récolte de la canne à sucre, la dernière décade de septembre, le mois d'octobre et les deux premières décades de novembre apparaissent particulièrement favorables dans la zone. En revanche, le mois de décembre apparaît extrêmement risqué.

Considérant les travaux post-récolte (traitements, replantation), il apparaît qu'une récolte tardive est plus risquée, puisque les mois de décembre, janvier et février sont peu traficables.

On relève ici des problèmes habituels de ce type d'analyse, d'autres inhérents à la démarche de conseil :

- la nécessité de séries climatiques longues et complètes (précipitations, Etp ou Rg) ;
- le caractère peu opératoire de la décade, par rapport à la semaine (jours ouvrés), qui caractérise un calendrier de gestion d'un parc de matériel ;
- le modèle fonctionne sur la base d'une hypothèse de récolte un mois donné (établissement de Kc) ; il convient donc d'effectuer différentes analyses, sur plusieurs hypothèses de date de récolte pour formuler un conseil plus cohérent. Il est intéressant notamment d'évaluer les risques inhérents à des reports de coupe, fréquents et d'origine diverses (pannes, quotas, disponibilité en matériel...).

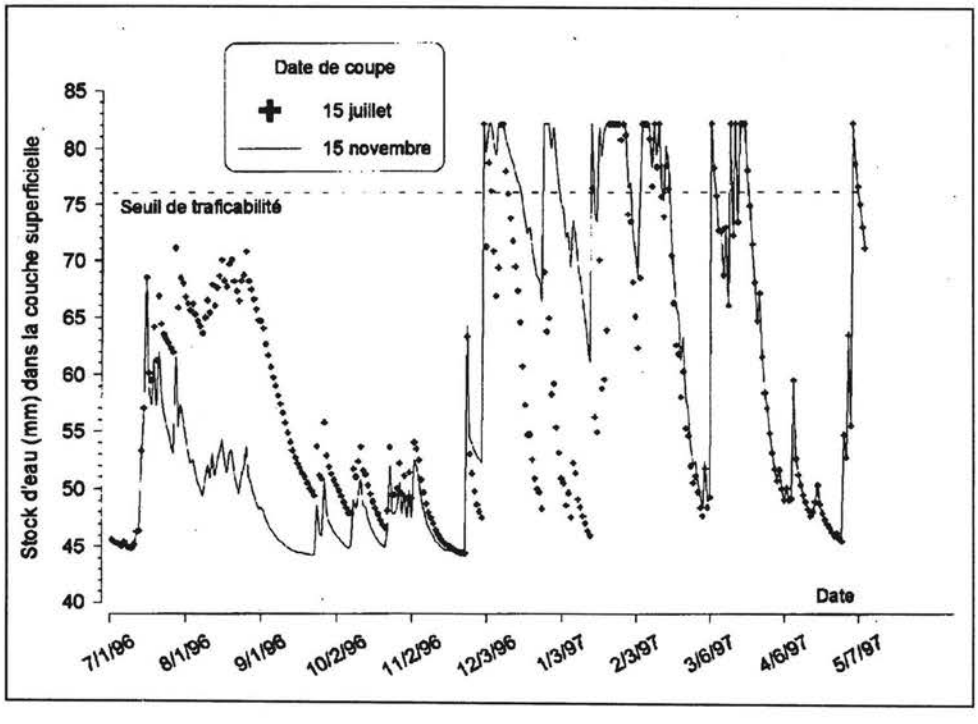

Figure 5. *Modélisation du stock d'eau dans la couche superficielle selon deux dates de coupe.*

On peut également imaginer d'autres modes de valorisation du modèle, pour un conseil en temps réel, à partir de scénarios climatiques probables. L'estimation de stock ne se fait alors sur ces données virtuelles.

Conclusion

Discussion des hypothèses

L'étude des relations entre climat, sol et matériels est focalisée sur la variable « teneur en eau ». Au regard des caractères anisotrope et complexe du sol, cette approche peut apparaître réductrice. Il semble indispensable de compléter la connaissance des relations entre les états structuraux initiaux et résultants afin d'améliorer la pertinence du diagnostic porté sur les successions d'itinéraires.

Pour autant, le critère « teneur en eau superficielle » est intéressant car il s'inscrit, avec le climat, dans le système d'information généralement mobilisé par les opérateurs au moment des chantiers (Nezet, 1995 ; Saintin, 1996). De plus, poser comme hypothèse qu'il détermine la traficabilité permet de répondre aux questions initialement posées : l'occurrence du risque de tassement et son intensité, le résultat probable du travail, ainsi que les performances des matériels peuvent être évaluées assez aisément.

Il convient toutefois de se donner un cadre microrégional circonscrit, relatif à des conditions agropédologiques et climatiques locales.

Parmi les hypothèses fondatrices du modèle, l'indépendance de la couche considérée est à priori la plus discutable. Il est apparu toutefois possible de simuler son évolution en ignorant les échanges avec les couches sous-jacentes. On n'a pas pris en compte en revanche les effets de tassements profonds, possibles lors de passages répétés en conditions humides.

Formulation de conseils et perspectives

Quant à l'hypothèse d'un conseil possible aux opérateurs, deux niveaux sont possibles : la planification et la prévision à court terme.

On peut supposer que l'analyse par décade peut constituer une aide à la planification des récoltes, voire aux travaux de replantation, en pointant les périodes à risque de tassement, de dégradation des sols, de fort patinage... De même, le recours au décompactage post-récolte pourrait être raisonné, en le réservant aux parcelles récoltées en période à risque.

Dès lors qu'une étude similaire aura été conduite sur plusieurs zones incluses dans le périmètres d'intervention d'un opérateur (Sica...), il deviendra très intéressant d'en comparer les possibilités, les risques et les contraintes. Les résultats de telles approches ne constitueront toutefois qu'une composante d'un système d'aide à la décision prenant en compte les aspects organisationnels et culturaux évoqués en introduction (Papy *et al.*, 1990).

En faisant abstraction de ces contingences, il serait déjà très intéressant de confronter le jugement quoti-

Tableau III. Dénombrement et analyse fréquentielle des jours agronomiquement praticables (Jap) par décade, dans le cas d'une récolte au 15 juillet (moyenne, minima absolu, minima observé 7 années sur 10, données calculées sur 11 années climatiques).

Mois :	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Moyenne	6/8/8	7/6/6	8/8/9	9/7/6	8/9/10	9/9/9	9/10/10	9/8/8	8/8/9	10/9/11	10/10/10	7/8/8
abs. Min.	3/4/3	0/2/0	3/3/2	6/2/1	2/6/6	6/7/7	4/7/5	0/0/0	0/0/5	9/6/10	9/10/8	2/4/3
min 7/10	5/8/7	6/5/5	8/8/8	9/4/4	5/9/10	9/9/9	9/9/11	10/8/6	9/9/9	10/10/11	9/10/9	7/8/7

Tableau IV. Dénombrement et analyse fréquentielle des jours agronomiquement praticables (Jap) par décade, dans le cas d'une récolte au 15 novembre (moyenne, minima absolu, minima observé 7 années sur 10, données calculées sur 11 années climatiques).

Mois :	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Moyenne	4/6/7	6/5/6	8/8/9	9/7/6	8/9/10	9/9/9	9/10/11	10/9/10	10/9/10	10/10/11	10/10/10	5/4/5
abs. Min	0/0/0	0/1/0	3/3/2	6/2/1	2/6/6	6/7/7	4/8/10	9/7/7	6/8/8	9/7/10	9/10/8	0/0/0
min 7/10	1/6/7	4/4/5	8/8/8	9/4/4	5/9/10	9/9/9	9/9/11	10/9/10	10/9/10	10/10/11	9/10/9	1/1/2

Exemple de lecture pour les tableaux III et IV :
Durant la dernière décade de décembre (21-30/12) on observe :
– au moins 2 Jap 7 années sur 10 et un minima absolu de 0, dans le cas d'une récolte au 15 novembre ;
– au moins 7 Jap 7 années sur 10 et un minima absolu de 3, dans le cas d'une récolte au 15 juillet.

dien porté par le modèle sur la traficabilité avec le jugement et les décisions prises par les experts (agriculteurs, opérateurs des Sica...).

L'influence de la date de coupe est notable sur les conditions d'intervention post-récolte des matériels (plusieurs applications de fertilisants, pesticides se succèdent sur 2-3 mois, parfois travaux de replantation), notamment en fin de campagne où des reports de chantier de coupe peuvent avoir des effets néfastes.

Dans un second niveau de conseil, le modèle peut fournir une indication sur les risques encourus, en temps réel, voire de façon prospective sur des données virtuelles (climatologie probable, scénario...). On peut ainsi notamment tester des hypothèses de report de chantier de coupe, auquel les opérateurs ont souvent recours pour réguler les flux de canne entre champs, points de collecte et usines).

Références bibliographiques

BRADFORD J.M., GUPTA S.C. 1986. Compressibility. In : Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. A. Klute, edit., ASA-SSSA publ., USA, 1986, p. 479-492.

BRAUNACK M.V., McPHEE J.E. 1991. The effect of initial soil water content and tillage implement on seedbed formation. Soil and Tillage Research, 20 (1991) : 5-17.

BURGESS T.M., WEBSTER R. 1980a. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogramm and ponctual kriging. Journal of Soil Science 31 : 315-331.

BURGESS T.M., WEBSTER R. 1980b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. Block kriging. Journal of Soil Science, 31 : 333-341.

CASSEL D.K., KACHANOSKI R.G., TOPP G.C., 1994. Practical considerations for using a TDR cable tester. Soil Technology, 7 : 113-126.

COLLAS P., 1987. A cône penetrometer method for studying trafficability for farming operations. In : Proceedings from the 5th National Drainage Symposium, Chicago, 14-15 sept. 1987.

EARL R., 1996. Prediction of trafficability and workability using tensiometers. Journal of Agricultural Engineering Reseach, 63 (1) : 27-34.

ENGLUND E., SPARKS A. 1991. Geostatistical environmental assessment software. GEO-EAS 1.2.1. User's guide. US EPA, 600/8-91/008, april 1991.

FAUCONNIER R., 1991. La canne à sucre. Maisonneuve et Larose., Paris, 165 p.

FAURE A., FIES J.C., 1972. Etude expérimentale de la sensibilité au compactage de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. Annales Agronomiques, 23 (3) : 317-323.

FAURE A., 1978. Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse Doctorat Sciences, USM Grenoble, num. 205142, 179 p.

GENERE B., 1990. Etude de l'évapotranspiration potentielle (ETP Penman) à la Réunion. L'Agronomie Tropicale, 1990, 45 (2) : 115-123.

GLANCEY J.L., UPADHYAYA S.K., 1995. An improved technique for agricultural implement draught analysis. Soil and Tillage Research, 35 (1995) : 175-182.

GODWIN R., WARNER N.L., SMITH D.L.O., 1991. The development of a dynamic drop-cone device for the assessment of soil strenght and the effects of machinery traffic. Journal of Agricultural Engineering Research, 48 (2) : 123-131.

GODWIN R.J., SPOOR G., 1977. Soil factors influencing work-days. Agricultural Engineer, 32 (1977) : 87-90.

LORRE M., PERRET S., 1996. Mesure de teneur en eau du sol par réflectométrie temporelle (TDR). Modalités pratiques de mise en œuvre d'un appareillage Campbell Scientific. CIRAD Sar, num. 30/96. 17 p.

MARAUX F., 1994. Modélisation mécaniste et fonctionnelle du bilan hydrique des cultures. Le cas des sols volcaniques du Nicaragua. Thèse de Doctorat, INA-PG, France, 228 p.

MARTINE J.F., 1996. mosicas, Modèle de fonctionnement et d'élaboration du rendement canne. Paramétrage de la variété R570. Rapport CIRAD-Ca Réunion, Saint Denis, juillet 1996, 40 p.

McLAUGHLIN N.B., HESLOP L.C. et al., 1993. A general purpose tractor instrumentation and data logging system. Transactions of the ASAE, 36 (2) : 265-273.

NEZET B., 1995. Elaboration d'une typologie pour l'amélioration des systèmes de culture à base canne à sucre. Rapport de DAA, INA-PG/CIRAD, 52 p.

OSKOUI E.K., 1988. Prediction of time constraints for machinery selection purposes - Field workdays for tillage and harvesting operations. In : Tillage and traffic in crop production. Proceedings of the 11th International Conference of the International Soil Tillage Research Organization, Edinburgh, Scotland, p. 385-390.

PAPY F., AUBRY C., MOUSSET J., 1990. Eléments pour le choix des équipements et chantiers d'implantation des cultures en liaison avec l'organisation du travail. In : La structure du sol et son évolution, INRA, Paris, Colloques de l'INRA n°53, p. 157-182.

PAPY F., 1987. Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural. Agronomie, 1987, 7 (2) : 111-121.

PERFECT E., McLAUGHLIN N.B., KAY B.D., 1997. Energy requirements for conventional tillage following different crop rotations. Transactions of the ASAE, 40 (1) : 45-49.

PERRET S., 1993. Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France, 278 p.

PERRET S., GALLO J.Y., DUCREUX A., 1994a. Comparaison d'itinéraires techniques d'installation d'une culture d'oignons : critères techniques, économiques et agronomiques. CIRAD-SAR, 33 p.

PERRET S., PIROT R., BARRET D., GALLET P., DEURVEILHER D., 1994b. Etude et définition d'un appareillage électronique d'acquisition de données embarqué sur tracteur. CIRAD-SAR, 35 p.

PIROT R., VAITILINGOM G., 1987. Etude, réalisation et mise au point d'une chaîne de mesure embarquée pour machines agricoles. Conception des protocoles d'acquisi-

tion, de tranfert et d'exploitation des données. Machinisme Agricole Tropical, 97 : 33-36.

PIROT R., 1992. Automation of in-field data recording : recent research work at CIRAD-SAR. In : Proc. Ag'Eng Congress, Upsala, Sweden, 1-4 june 1990, 3 p.

RAUNET M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD / Région Réunion, 438p.

REBOUL C.,1982. Les jours disponibles pour les façons culturales. Données de base pour le choix des équipements. Science du Sol, 3 : 221-225.

ROUNSEVELL M.D.A., JONES R.J.A., 1993. A soil and agroclimatic model for estimating machinery work-days : the basic model and climatic sensitivity. Soil and Tillage Research, 26 : 179-191.

ROUNSEVELL M.D.A., 1993. A review of soil workability models and their limitations in temperate regions. Soil Use and Management, 9 (1) : 15-21.

SAINTIN P., 1996. Analyse des modalités de récolte et d'évacuation de la canne à sucre chez les petits planteurs de la Réunion. Mémoire Université Paris XII / CIRAD-SAR, 59, p.

SIEGMUND B., DUCREUX A., 1982. Utilisation du test Proctor pour l'étude des phénomènes de compactage apparaissant en culture de canne à sucre sur parcelles récoltées mécaniquement. In : Rapport annuel CEEMAT Réunion, 1982, pp. 177-191.

SIEGMUND B., PERRET S., DUCREUX A., CLARIOND A., BECLIN C., 1989. Mécanisation de la canne à sucre : recherche et expérimentation en travail du sol à l'île de la Réunion. Rapport CIRAD- CEEMAT, 65 p.

SIMALENGA T.E., HAVE H., 1994. Predicting soil moisture status and suitable field workdays under tropical conditions. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 1994, 25 (3) : 9-12.

SMITH L.A., 1990. Calibrations techniques for instrumented tractors. ASAE Paper num. 90-1010. ASAE, St. Joseph, MI 49085, 22 p.

SMITH L.A., 1993. Energy requirements for selected crop production implements. Soil andTillage Research, 25 : 281-299.

TORRES J.S., RODRIGUEZ L.A., 1996. Soil compaction management for sugarcane. In : Proceedings of the XXIIth ISSCT Congress, 11-15 sept. 1995, Cartagena, Colombia ; Cock J.H. and Brekelbaum T. editors ; Technicana, Cali, Colombia, publisher, p. 222-230.

VAKSMAN M., 1986. Etude du fonctionnement hydrique des andosols et des sols andiques de l'île de la Réunion. Thèse de doctorat de spécialité, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France, 170 p.