

Le pénétromètre Yamanaka et son utilisation pour l'évaluation des possibilités d'enracinements dans les horizons des sols cultivés

MOREAU R. et NAGUMO F.

INTRODUCTION

Les descriptions de sol réalisées au Japon comprennent de façon systématique, pour chaque horizon décrit, une indication chiffrée de « dureté », accompagnant les données classiques telles que couleur, texture, structure... Ce type de donnée est obtenu avec un pénétromètre de poche normalisé dont l'emploi sur le terrain est généralisé.

Le pénétromètre *Yamanaka* (du nom de son créateur) est utilisé depuis plusieurs dizaines d'années au Japon, où de nombreuses données ont été obtenues dans des situations variées. D'importants travaux d'analyse et de synthèse ont été réalisés, montrant l'intérêt des mesures pénétrométriques dans les études à finalités agronomiques, en particulier pour l'évaluation des possibilités de développement racinaire. Plus récemment, le pénétromètre *Yamanaka* a été aussi utilisé dans diverses études réalisées en zone tropicale, dans le cadre de la coopération japonaise.

On se propose ici de donner quelques indications sur l'appareil et ses applications. Il ne faut pas y voir une analyse exhaustive des données disponibles tant la richesse de l'expérience japonaise en la matière est grande, mais simplement des éléments d'information pouvant être utiles à tous ceux qui s'intéressent à la physique du sol et à ses rapports avec la fertilité et plus particulièrement aux mesures pénétrométriques.

ASPECT HISTORIQUE

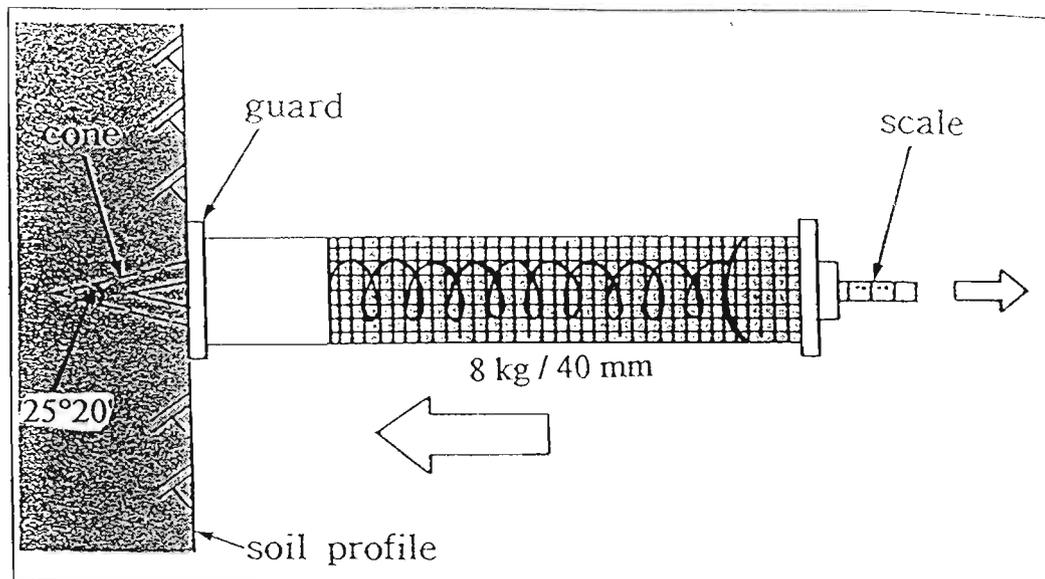
Le pénétromètre *Yamanaka* a été présenté pour la première fois dans une revue scientifique en 1962 (YAMANAKA K. et MATUO K.). Les auteurs souhaitaient avoir un outil permettant d'obtenir de façon aisée et précise une évaluation chiffrée de la dureté (ou compacité) des horizons de sol pour faciliter l'analyse des relations entre ce paramètre et la pénétration des racines. Il s'agissait d'obtenir une évaluation quantitative de la dureté du sol considérée comme un des facteurs limitant de l'enracinement des plantes cultivées.

Peu de temps après son développement, le pénétromètre *Yamanaka* a été utilisé dans le cadre d'un vaste programme de recherche de base portant sur la productivité des terres et de ses facteurs ; ce programme s'est développé dans l'ensemble du Japon au cours des années soixante. Un nombre considérable de données ont été recueillies et analysées, et cela a certainement contribué à la diffusion de l'appareil et à sa normalisation. De nos jours, la mesure pénétrométrique *Yamanaka* est considérée comme une donnée indispensable dans toute l'étude de profil de sol au Japon.

PRINCIPE ET UTILISATION DU PENETROMETRE

Les caractéristiques principales du pénétrömètre à cône *Yamanaka* sont indiquées à la figure 1. Le ressort se comprime plus ou moins en fonction de la résistance du sol à la pénétration du cône, lorsque celui-ci est appliqué de façon à assurer un contact étroit entre la garde de l'appareil et la surface du profil où s'effectue la mesure. La somme de la longueur de pénétration du cône et de la longueur de compression du ressort reste toujours égale à 40 mm ; si le cône ne pénètre dans le sol que de 1 mm, la longueur de compression du ressort sera de 39 mm. On peut toujours effectuer une mesure, même si le sol est très dur.

Figure 1 - Schéma et caractéristiques du pénétrömètre *Yamanaka*



Dimensions : L 220 mm x Ø 40 mm

Weight : 250 g

Measuring range : 0 ≈ 500 kg/cm²

La lecture de la longueur de compression du ressort en millimètres, se fait au moyen d'une réglette coulissante placée à l'extrémité opposée au cône (cas de la fig. 1) ou bien d'un curseur situé sur un côté de l'appareil, selon les modèles proposés par différents fabricants. La dureté du sol est évaluée par un indice correspondant soit à la longueur de compression lue sur l'appareil (X en mm), soit à la résistance à la pénétration (P en kg/cm²). La conversion des valeurs de X en P s'établit d'après la formule : $P = 100 X / 0,7952 (40 - X)^2$. Dans la pratique, une abaque permet de faire rapidement cette conversion. Au Japon, c'est la forme d'expression en fonction de X (mm) qui est la plus couramment utilisée.

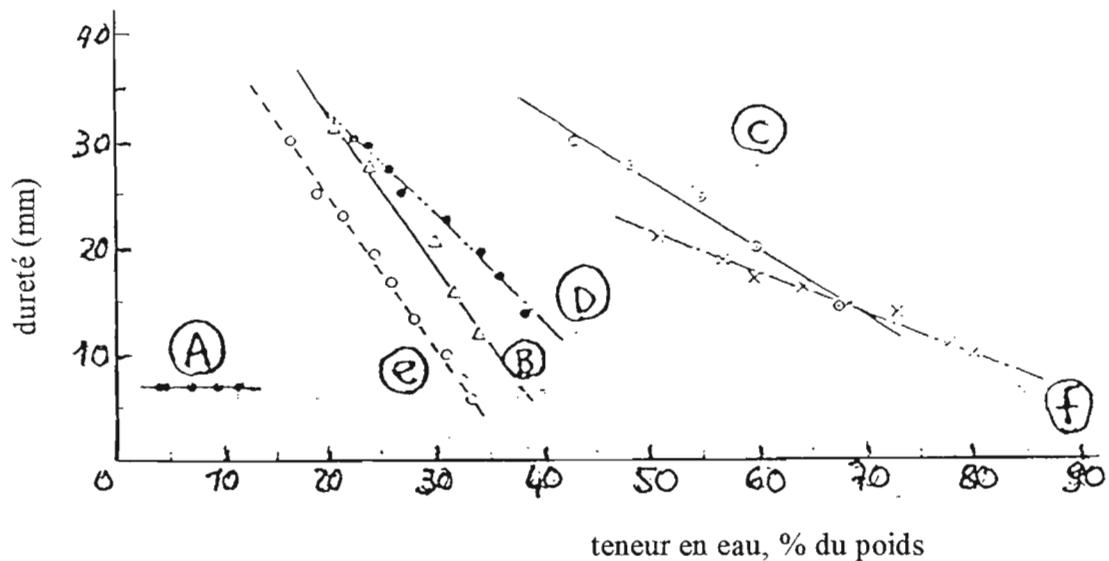
En fait, la dureté du sol mesurée par l'instrument correspond à une résistance à la compaction. C'est le travail nécessaire pour rendre plus compact un sol donné. Cela traduit ainsi la relation entre la dureté du sol et sa compaction.

S'il n'y a pas de loi bien établie contrôlant la dureté du sol, il est généralement admis que la force impliquée dans la résistance à la pénétration est liée à la friction et à la cohésion. On sait que cette résistance dépend de différents facteurs tels que la texture, la structure, la densité apparente, l'état hydrique. L'interprétation des données pénétrométriques ne peut se faire sans tenir compte de ces variables qui peuvent être très différentes d'une situation à

l'autre ; pour un même type d'horizon, l'état hydrique en particulier peut varier dans des proportions importantes en entraînant de forte variation des mesures pénétrométriques (fig. 2).

Figure 2 - Relation entre la teneur en eau et les données du pénétromètre *Yamanaka* (mm), pour différents horizons de sols

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| A : Sable alluvial | D : horizon sup. argilo-limoneux |
| B : Alluvions limono-argileuses | E : horizon prof. argilo-limoneux |
| C : Limon | F : horizon sup. limono-argileux |



Il faut préciser qu'en mettant son appareil au point, YAMANAKA s'efforçait d'évaluer l'influence du degré de compacité des horizons situés au-dessous de l'horizon de travail, sur le développement des racines en profondeur, dans les sols cultivés. Par ailleurs, sous les climats humides du Japon, l'état hydrique de ces horizons ne varie que dans des limites assez étroites. YAMANAKA indiquait lui-même que l'on pouvait considérer que leur humidité se maintient au voisinage de la capacité au champ tout au long de l'année.

D'un point de vue pratique, il est recommandé de réaliser les mesures sur le terrain lorsque les conditions d'humidité sont favorables à un développement actif des végétaux, si possible au plus près de la capacité au champ. Pour des études répétées sur les mêmes types de sol, à l'échelle régionale, il est souhaitable de disposer de courbes liant les valeurs d'humidité ou de pF aux valeurs de pénétrométrie, pour les principales catégories texturales et les principaux types d'horizon. Ces courbes peuvent être établies à partir de mesures réalisées sur le terrain ou au laboratoire (sur des échantillons non perturbés placés à différents états d'humidité). Elles sont nécessaires pour comparer et interpréter les données pénétrométriques obtenues dans des conditions d'humidité différentes du sol. Les études réalisées dans des conditions d'humidité contrôlée se réfèrent généralement à des valeurs d'humidité équivalent à pF 3.

RELATION ENTRE DONNEES PENETROMETRIQUES ET ENRACINEMENT

De nombreuses études ont été conduites sur les relations entre la résistance à la pénétration du sol et l'enracinement des plantes cultivées, soit par l'analyse statistique de données de terrain ou par approche expérimentale sur des sols diversement compactés, en utilisant le pénétromètre *Yamanaka*.

Ces études associent généralement l'analyse de plusieurs facteurs physiques de l'enracinement, selon une démarche intégratrice se rapportant au concept de : « Non-limiting Water Range : NDLWR » (LETEY, 1985). Outre la densité apparente et l'humidité du sol, les chercheurs japonais accordent aussi une grande importance à la proportion respective des 3 phases solide, liquide et gazeuse qui est déterminée de façon très courante, au moyen d'un appareillage spécifique utilisant des échantillons non perturbés prélevés en cylindre.

Il faut citer, parmi les études les plus importantes, celles de MIYOSHI (1972) qui définit les conditions favorables au développement racinaire dans les sols exondés, à partir des données obtenues dans le cadre du programme général sur la productivité des terres du Japon, précédemment indiqué.

L'analyse des relations entre les données physiques et la distribution des racines dans les profils de sol a conduit à identifier des valeurs critiques définissant des états favorables ou non pour le développement des racines. Ces valeurs sont apparues comparables à celles obtenues en expérimentation, avec des sols remaniés en conditions contrôlées (différents degrés de compaction). Par exemple, les valeurs seuils qui sont admises pour un enracinement sans contraintes importantes sont les suivantes :

- dureté (mesure <i>Yamanaka</i>)	< 22-23 mm (10 kg/cm ²)
- phase solide (pour les sols non volcaniques)	< 52-53 % (sableux) < 53-55 % (limoneux) < 54-57 % (argileux)
- phase liquide	> 18-23 %
- phase gazeuse	> 13-17 %.

Dans des conditions défavorables pour le développement racinaire, les valeurs élevées de la phase solide et la dureté du sol sont généralement associées à une forte compacité ; les valeurs seuils observées marquent une diminution importante de la porosité. Toutefois, dans le cas de sols volcaniques, il n'apparaît pas de valeur critique nette pour la phase solide, en raison des propriétés particulières de ces sols où il peut exister en profondeur des horizons résistant à la pénétration sans que la phase solide y soit très élevée.

En ce qui concerne l'appréciation des conditions de développement des racines, la dureté du sol (ou la résistance à la pénétration) semble être d'une portée plus générale que la porosité, lorsqu'on considère différents types de sols, volcaniques ou non.

Tableau 1 - Relation entre la dureté du sol (pénétrömètre *Yamanaka*, en mm) et l'enracinement (en % du développement optimal, pour différentes espèces cultivées sur sols exondés)

Dureté (mm)	12, 13	14, 15	16, 17	18, 19	20, 21	22, 23	24, 25	26, 27	28, 29	Cultures
Sableux	100	100	90	82	82	32	5	2	0	Blé
	100	88	96	82	80	63	12	8	8	riz pluvial
	82	100	82	76	79	68	70	18	0	patate douce
	80	86	92	78	60	28	16	0	0	arachide
	90	88	87	72	82	38	16	16	16	tomate
	100	100	100	100	92	66	8	0	0	aubergine
	100	100	100	100	86	86	30	8	2	citrouille
	100	82	93	74	85	19	12	0	0	poivre vert
	100	100	83	87	73	38	8	0	2	poire
	78	88	60	54	92	40	0	6	3	raisin
	100	84	76	82	86	41	19	0	0	concombre
	100	81	73	93	93	43	12	0	0	pastèque
80	80	83	92	76	68	22	16	3	graminée fourragère	
limoneux	91	91	92	92	80	29	22	0	0	Blé
	100	93	80	95	59	59	17	10	4	patate douce
	80	92	79	72	72	80	48	8	0	arachide
	100	92	80	73	73	80	38	18	0	aubergine
	84	94	94	86	82	76	12	16	0	laitue
	100	100	100	100	67	7	18	8	4	taro
	100	100	80	60	58	56	18	8	2	graminée fourragère
Argileux	100	79	76	72	59	36	13	13	6	Fraise
	100	100	92	-	-	-	-	-	-	féverole
	86	86	86	86	80	30	19	8	4	concombre
	100	82	86	62	62	6	0	0	0	laitue
	100	85	80	57	63	39	0	0	0	orange
	100	100	92	88	76	80	36	10	2	trèfle
Cendres volcaniques	100	100	82	90	86	40	12	6	6	Blé
	100	100	100	82	83	82	10	0	0	patate douce
	100	100	96	96	94	48	0	0	0	arachide

Il existe des tableaux synthétiques des correspondances entre les valeurs de dureté du sol et l'importance du développement racinaire pour différents types de cultures et de situations considérées. Ces tableaux sont à l'origine des critères d'évaluation de la dureté du sol qui sont utilisés dans la pratique.

Le tableau 1 donne un exemple de valeurs obtenues pour différentes espèces cultivées sur sols exondés. Malgré des différences assez sensibles entre les cultures, le tableau met bien en évidence la diminution d'enracinement avec l'augmentation de la dureté du sol et, pour cette dernière, des valeurs critiques bien regroupées. Il est en effet remarquable de constater la position charnière de la colonne 22-23 mm (pénétrömètre *Yamanaka*), qui marque une diminution nette de l'enracinement pour beaucoup d'espèce, et la colonne 24-25 mm où la faiblesse de l'enracinement se manifeste pour la quasi-totalité des espèces cultivées.

Dans la pratique, on considère que les valeurs de mesures pénétrométriques *Yamanaka* doivent rester inférieures à 22 mm, pour avoir des conditions de développement racinaire favorables (valeurs obtenues sur des horizons au voisinage de la capacité au champ). En général, le développement des racines se réduit très rapidement lorsque les valeurs atteignent et

dépassent 24-25 mm. Dans le cas des plantes à tubercule, la qualité de la production diminue à partir de 22-23 mm et il est souhaitable d'avoir des valeurs inférieures à 18 mm.

Pour les sols de rizière inondée, on considère souhaitable d'avoir des valeurs inférieures à 24 mm dans l'horizon travaillé. Dans l'horizon sous-jacent, on se réfère à deux valeurs limites : une limite supérieure de 24 mm, au-dessus de laquelle l'élongation des racines de riz est fortement réduite, et une limite inférieure de 14 mm au dessous de laquelle l'eau n'est pas suffisamment retenue dans la partie supérieure du sol et où la portance devient insuffisante pour l'utilisation des machines en culture mécanisée.

Dans une étude réalisée sur cinq sites de sols ferrallitiques désaturés des Cerrados (latosols) au Brésil, KUBOTA et al. (1983) attribuent la limitation du développement des racines de soja, en profondeur, à la compacité de l'horizon situé sous l'horizon de travail, plutôt qu'à des caractères chimiques défavorables de cet horizon (acidité, toxicité aluminique). Cet horizon compact se distingue par des valeurs élevées de résistance à la pénétration, mesurées au champ (en saison humide) et au laboratoire (pF 3), toujours supérieures à 25 mm (variations de 15 à 25 kg/cm²). Ces valeurs sont associées à une forte réduction de la porosité, en particulier des pores supérieurs à 100 µm de même qu'à la diminution du coefficient de diffusion gazeuse. Ce coefficient de diffusion gazeuse qui évalue les conditions de circulation des gaz et en particulier du renouvellement de l'oxygène dans le sol se rapporte à un facteur physique ayant une action directe sur le développement des racines (LETEY, 1985). C'est aussi un paramètre fréquemment pris en considération pour l'analyse des relations sol-enracinement, avec les autres paramètres physiques tels que la résistance à la pénétration, à laquelle il apparaît également lié (MATSUMOTO et al., 1992).

EN CONCLUSION

Le pénétromètre *Yamanaka* est utilisé de façon très courante par les agronomes et pédologues japonais, pour évaluer et comparer la dureté (compacité) des horizons du sol. La conception et la validation de ce type de pénétrométrie se sont référées à un domaine de préoccupations bien défini : l'évaluation de la dureté (compacité) des horizons de sol et de ses effets vis-à-vis du développement des racines.

Le pénétromètre *Yamanaka* est utilisé comme un outil de diagnostic dans les études de caractérisation des sols et de leurs aptitudes, mais aussi dans les études d'évolution des sols en fonction des traitements culturels, ou encore dans des expérimentations sur modèle destinés à analyser la capacité de pénétration des racines de différentes espèces végétales dans des horizons plus ou moins compactés.

On peut s'étonner d'obtenir des valeurs seuils assez comparables pour différentes cultures et situations (22-23 mm). Cela n'est probablement pas dû au hasard ; l'existence d'un régime hydrique peu contrasté, sous les conditions de climat humide du Japon, ayant certainement par ailleurs facilité la mise en évidence d'une telle convergence de résultats.

Les données pénétrométriques apparaissent liées à différents paramètres physiques du sol, en particulier à la porosité, à l'état hydrique, au coefficient de diffusion gazeuse. La pénétrométrie peut refléter les qualités de ces paramètres, en particulier à l'égard de l'enracinement, tout en étant bien plus facilement et rapidement mesurable que chacun d'eux.

Il reste qu'en pratique, on doit forcément tenir compte de l'influence de l'humidité du sol pour interpréter les données pénétrométriques en rapport avec l'état structural et la mécanique du sol ; l'idéal étant de se reporter à un état d'humidité comparable (dans une

gamme d'humidité compatible avec le développement des plantes, si possible au voisinage de la capacité au champ).

Nonobstant ce problème d'influence de l'état d'humidité du sol, le pénétromètre *Yamanaka* peut être utilisé avec profit pour l'analyse du profil structural, où l'appréciation de la cohésion (ou compacité) du sol par enfoncement d'une lame à la main reste une donnée entachée d'un fort coefficient personnel. La pénétrométrie peut y être un élément de diagnostic très utile pour différencier et caractériser les volumes morphologiquement homogènes du profil cultural et faciliter la comparaison des résultats obtenus dans différents profils d'un même site ou de sites différents (s'il est tenu compte de l'état d'humidité).

Au niveau des volumes morphologiquement homogènes, elle peut aussi être très utile pour étudier l'influence de facteurs physiques sur l'enracinement. La recherche des relations avec des caractères fondamentaux de l'état structural : microstructure, système poral, et certaines fonctions du sol : disponibilité de l'eau et de l'oxygène, devrait y faire l'objet d'études approfondies.

BIBLIOGRAPHIE

YAMANAKA K. et MATUO K., 1962 - A study on soil hardness (first report). Relationship between soil hardness and water content. *Jpn. J. Soil. Sci. Plant Nutr.*, Vol. 33, n° 7, pp. 343-347.

MIYOSHI H., 1972 - Effective layer for upland field from a view point of suitable soil condition for root development. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, Vol. 43, n° 3, pp. 92-97.

KUBOTA T., BRANCO J.L. C., IKE M., 1983 - Prevention of root development of soybean by compacted layer of oxisol in the Serado. *Journal of Japan soil and plant nutrition*. Vol. 54, n° 5, pp. 389-395.

LETEY J., 1985 - Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, pp. 277-294.

MATSUMOTO J., KUBOTA T., KATOU H., OSAZAWA S., ARIHARA J. et AE N., 1992 - Penetration of Pigeon Pea Roots into compacted soils. *Soil Phys. Cond. Plant. Growth*, Jpn, 64, pp. 3-9.