

## CARACTERISATION DE LA SENSIBILITE A L'EROSION DES SOLS : CONFRONTATION DE DEUX ERODIMETRES

### SOILS ERODIBILITY CHARACTERISATION : CONFRONTATION BETWEEN TWO ERODIMETERS.

Pierre-Louis REGAZZONI<sup>1</sup>, Tony L. WAHL<sup>2</sup>, Greg J. HANSON<sup>3</sup>, Jean-Robert COURIVAUD<sup>4</sup>,  
Didier MAROT<sup>1</sup>.

1 Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, Université de Nantes, Saint-Nazaire,

2 United States Bureau of Reclamation, Federal Center, Denver, USA,

3 Agricultural Research Service, Hydraulic Engineering Research Unit, Stillwater, USA,

4 Electricité De France, Centre d'Ingénierie Hydraulique, Bourget du Lac.

**RESUME** – Les objectifs de cette étude sont de caractériser la sensibilité à l'érosion des sols à l'aide de deux érodimètres : le Hole Erosion Test et le Jet Erosion Test. Afin d'interpréter les expériences, une loi d'érosion linéaire en contrainte est supposée. L'analyse des mesures réalisées sur des sols argileux naturels, permet de déterminer les paramètres de la loi d'érosion et d'établir la classification de l'érodabilité des sols testés.

**ABSTRACT** – The objectives of the study are to define the soils erodibility thanks to two different devices: the Hole Erosion Test and the Jet Erosion Test. The interpretation is based on the assumption of an erosion law linear with the stress. The analysis of the tests realized on natural clayey soils allows to define the erosion parameters and to lead a classification of the soils erodibility.

## 1 Introduction

La pérennité des ouvrages hydrauliques en terre (digues, barrages, levées) et de leur fondation nécessite la caractérisation de la résistance des sols à l'érosion interne. L'érosion interne peut en effet conduire très rapidement à la rupture de l'ouvrage (Barrage de Teton, Etats-Unis d'Amérique, Idaho, Juin 1976). Dans le but de caractériser la sensibilité des sols, tant en laboratoire que *in-situ*, plusieurs scientifiques ont proposé des appareillages et des protocoles associés. Ainsi en 2004, Wan et Fell ont proposé le « Hole Erosion Test » (H.E.T.) et Hanson et Cook (2004) ont développé le « Jet Erosion Test » (J.E.T.).

L'objectif de cette étude est de confronter ces deux érodimètres (H.E.T. et J.E.T.) et d'aboutir à la caractérisation de la sensibilité à l'érosion de plusieurs sols naturels. Le principe des deux appareillages, le protocole expérimental et l'interprétation associés sont décrits. Puis une campagne d'essais est menée à l'aide des deux appareillages et les résultats sont discutés en fonction des valeurs obtenues pour les différents paramètres.

## 2 Loi d'érosion

Les expériences menées sur des sols argileux soumis à un écoulement semblent montrer l'existence d'un seuil d'érosion c'est-à-dire que l'érosion est supposée se produire si la contrainte générée par l'écoulement dépasse une valeur, caractéristique du sol testé et nommée contrainte critique  $\tau_c$ . Le taux d'érosion massique ou volumique est supposé

s'accroître linéairement en fonction de l'excédent de contrainte. Ces deux hypothèses conduisent aux deux expressions suivantes :

$$\dot{m} = k_{d,m} * (\tau - \tau_c) \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon} = k_d * (\tau - \tau_c) \tag{2}$$

avec  $\dot{m}$  et  $\dot{\varepsilon}$  respectivement taux massique et volumique d'érosion par unité de temps et de surface. Le paramètre mécanique principal pour l'évaluation de cette vitesse d'érosion est la contrainte de cisaillement hydraulique  $\tau$  à l'interface eau/sol, pondérée par un coefficient d'érosion  $k_d$  ( $k_{d,m} = k_d * \rho_D$  où  $\rho_D$  est la masse volumique sèche du sol).

### 3 Le Hole Erosion Test

#### 3.1 Présentation de l'appareillage

Le principe de l'essai consiste à réaliser un écoulement dans une conduite longitudinale préalablement forée au sein de l'échantillon testé. Le moule contenant l'échantillon est connecté d'une part au réservoir d'alimentation via la cellule amont de forme convergente et d'autre part au bac de récolte à l'aide de la cellule aval de forme divergente (voir Figure 1). Un capteur de pression différentielle permet de mesurer les pertes de charges générées par l'écoulement au sein de l'échantillon. Au niveau du réservoir de récolte, un capteur de pression associé à un seuil calibré permet la mesure du débit instantané de sortie.

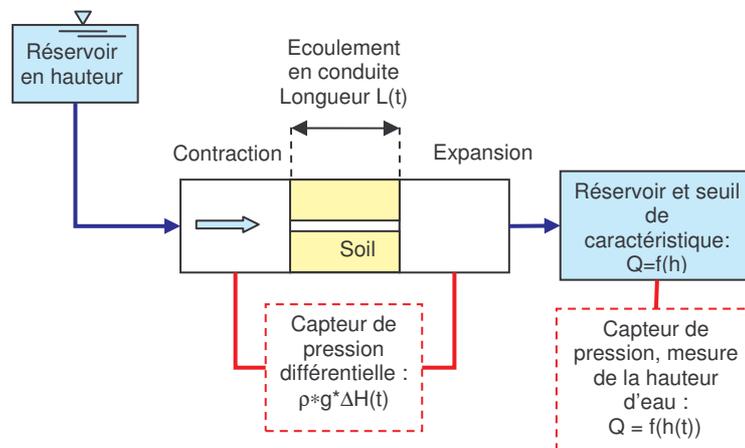


Figure 1. Vue synoptique de l'appareil pour le H.E.T.

#### 3.2 Protocole expérimental du H.E.T.

Le protocole utilisé est conforme au protocole défini par Wan et Fell (2004). Après réalisation de l'échantillon par compactage (voir § 5.2), celui-ci est foré longitudinalement à l'aide d'un foret de diamètre 6 mm. Pour chaque type de sol testé, le choix de la charge à appliquer nécessite la réalisation d'un test préliminaire. Une première charge hydraulique de 50 mm est appliquée à l'échantillon pendant 15 minutes. Si aucune augmentation de débit n'est constatée, la valeur de la charge appliquée est doublée. L'augmentation du débit traduit un agrandissement de diamètre du trou et donc une érosion.

Afin de fixer précisément la charge désirée, un échantillon témoin en acrylique est placé en remplacement du sol. Sans modifier les réglages, l'échantillon de sol est positionné puis le

circuit d'eau est saturé lentement afin de limiter toute perturbation non désirée. L'acquisition est lancée puis la charge est appliquée. La période d'acquisition est fixée à 30 secondes ou une minute suivant la précision désirée.

### 3.3 Interprétation du H.E.T.

Le test est basé sur la mesure du débit d'eau qui circule dans la conduite pour une charge donnée (Wan et Fell, 2004). La figure 2 présente un exemple des évolutions instantanées de la charge appliquée et du débit mesuré.

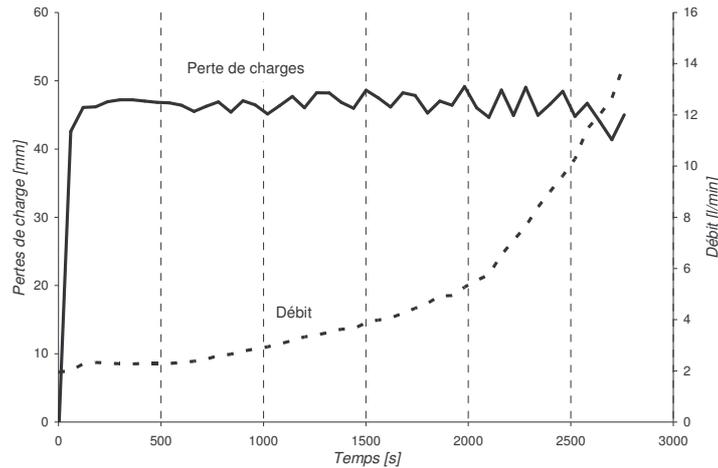


Figure 2. Exemple des variations instantanées des mesures de la perte de charge et du débit lors d'un H.E.T.

Afin d'interpréter les mesures en terme d'érosion, la sollicitation hydraulique appliquée à l'échantillon doit être quantifiée en fonction du régime de l'écoulement. Le bilan des forces appliquées sur le volume d'eau présent dans la conduite de longueur  $L$  et de diamètre  $\phi$  est établi. Ce bilan permet d'exprimer la contrainte de cisaillement générée par l'écoulement sous la forme :

$$\tau = \frac{\Delta H * \rho * g * \phi}{L * 4} \tag{3}$$

avec :  $\Delta H$  charge appliquée,  $\rho$  masse volumique du fluide et  $g$  accélération de la pesanteur.

La prise en compte du régime de l'écoulement est réalisée à l'aide de la loi de Chézy (équation n°4 dans le cas turbulent), qui permet d'exprimer, pour deux gammes de valeurs du nombre de Reynolds, la contrainte de cisaillement hydraulique en fonction de la vitesse moyenne de l'écoulement ( $\bar{U}$ ) dans la conduite et du coefficient de frottement laminaire ( $f_L$ ) ou turbulent ( $f_T$ ) :

$$\begin{aligned} \text{Re} > 5000, & \quad \tau = f_T * \bar{U}^2 \\ \text{Re} \leq 5000, & \quad \tau = f_L * \bar{U} \end{aligned} \tag{4}$$

Pour l'état initial et final de l'échantillon, les mesures du débit de l'écoulement et du diamètre de la conduite permettent de déterminer les valeurs des coefficients de frottement à ces deux instants. Les valeurs instantanées de ces coefficients au cours des essais sont déterminées par interpolation.

A l'aide des équations 3 et 4, le diamètre de la conduite peut être exprimé en fonction des conditions hydrauliques à chaque instant pour toute la durée de l'essai :

$$Re > 5000, \phi(t) = \left( \frac{64 Q(t)^2 L_{fT}}{\pi^2 \Delta H \rho g} \right)^{1/5} \quad (5)$$

$$Re \leq 5000, \phi(t) = \left( \frac{16 Q(t) L_{fL}}{\pi \Delta H \rho g} \right)^{1/3} \quad (6)$$

La variation temporelle du diamètre est interprétée en terme d'érosion et l'exploitation des mesures permet d'identifier les valeurs des paramètres de la loi d'érosion ( $k_d, \tau_c$ ).

## 4 Le Jet Erosion Test

### 4.1 Présentation de l'appareillage

Ce test consiste à éroder un sol immergé par l'application d'un jet d'eau qui vient solliciter la face supérieure du sol. Le jet est créé à l'aide d'un réservoir d'alimentation positionné en fonction de la charge hydraulique désirée et d'un diaphragme préalablement calibré (cf. Figure 3). Le sol testé est compacté dans un moule qui est ensuite immergé dans un container. Un limnimètre est utilisé pour mesurer périodiquement la profondeur d'affouillement (J) au droit du jet.

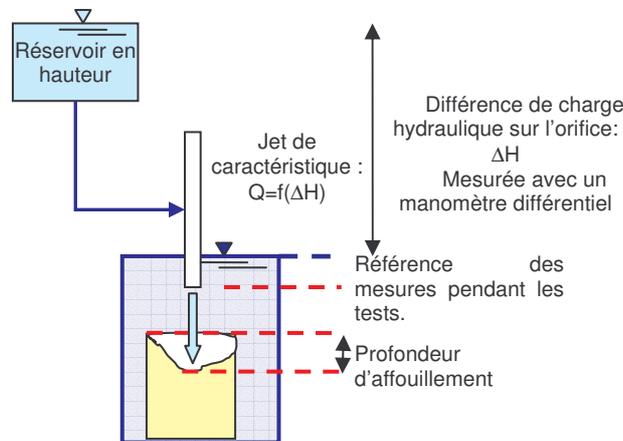


Figure 3. Vue synoptique de l'appareil pour le J.E.T.

### 4.2 Protocole expérimental du J.E.T.

Conformément au protocole défini par Hanson et Cook (2004), la charge hydraulique initiale appliquée est fixée à 40 pouces (environ 1 m) pour le test préliminaire. Les mesures effectuées pendant ce test permettent d'ajuster la charge à appliquer lors de l'essai suivant.

La surface de l'échantillon est tout d'abord protégée par un obturateur placé sur le chemin du jet. Cet obturateur n'est retiré que lorsque l'écoulement appliqué est stable au cours du temps. Pour mesurer la profondeur d'affouillement, l'obturateur est repositionné devant le jet et le limnimètre est descendu jusqu'au niveau de l'obturateur. Le jet étant obstrué par le limnimètre, on retire l'obturateur et on mesure la profondeur d'affouillement. La période d'acquisition est

ajustée en fonction de la vitesse d'érosion du sol. Elle est comprise entre 15 secondes dans le cas de sol très érodable et 30 minutes dans le cas contraire.

### 4.3 Interprétation du J.E.T.

L'interprétation des essais proposée par Hanson et Cook (2004) repose sur la mesure instantanée de la profondeur d'affouillement (cf. Figure 4) et sur l'estimation de la contrainte hydraulique appliquée par le jet sur le sol.

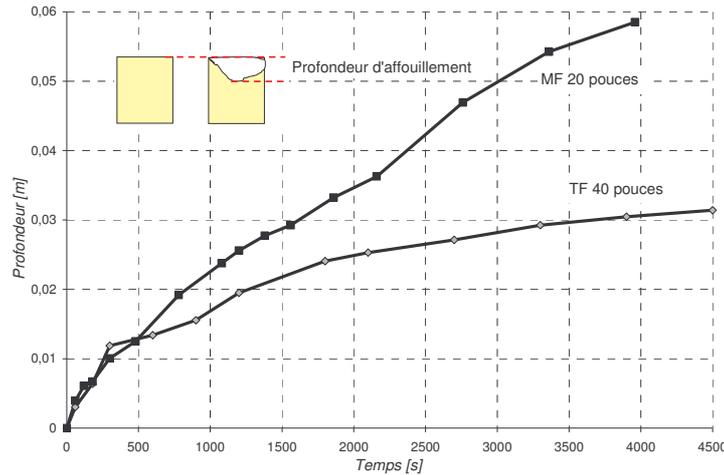


Figure 4. Exemple de variations instantanées de profondeur d'affouillement pour deux valeurs de charges fixées lors du J.E.T.

Suivant le modèle de Chézy, cette contrainte est exprimée en fonction de la vitesse de l'eau du jet  $U$  sous la forme :

$$\tau = C_f * \rho * U^2 \tag{7}$$

avec  $C_f = 0,00416$

Pour tenir compte de la décroissance de la vitesse  $U$  en fonction de la profondeur de l'impact du jet par rapport à l'orifice, une distance  $J_p$  est proposée telle que pour une distance plus petite que  $J_p$ , la vitesse est supposée constante et au-delà le profil de vitesse décroît suivant l'expression :

$$\frac{U}{U_0} = \frac{J_p}{J} \tag{8}$$

L'érosion progresse jusqu'à une profondeur d'équilibre (n'évoluant plus avec le temps) notée  $J_e$ . La contrainte hydraulique critique correspondante peut alors s'exprimer en fonction de cette profondeur et de la vitesse de l'eau  $U_0$  au niveau de l'orifice :

$$\tau_c = \left( \frac{J_p}{J_e} \right)^2 * C_f * \rho * U_0^2 \tag{9}$$

Par ailleurs, Blaisdell et al. (1981) ont proposé une fonction empirique pour estimer la profondeur d'équilibre  $J_e$  en fonction de la vitesse  $U_0$  et des valeurs instantanées de la profondeur d'affouillement.

A l'aide des équations 8 et 9, la loi d'érosion est redéfinie de manière adimensionnelle et un temps caractéristique  $T_R$  est défini (équation 10). L'intégration de cette loi d'érosion adimensionnelle permet d'obtenir l'expression du temps en fonction de la profondeur adimensionnelle  $J$  :

$$t = T_R * \left( -J^* \Big|_{J_i}^{J^*} + \frac{1}{2} \text{Ln} \left( \frac{1+J^*}{1-J^*} \right) \Big|_{J_i}^{J^*} \right) \text{ avec } T_R = \frac{J_e}{k_d * \tau_c} \quad J^* = \frac{J}{J_e} \quad (10)$$

La valeur du coefficient d'érosion  $k_d$  est déduite de l'optimisation de l'erreur commise sur le calcul du temps  $t$ .

## 5 Sols testés et préparation

Les quatre sols testés proviennent de différents projets de l'U.S.B.R. décrits par Wormer (2004) et sont choisis en fonction de leur érodabilité supposée.

### 5.1 Présentation des sols testés

Les sols sont définis suivant la classification U.S.C.S. (Unified Soil Classification System). La courbe granulométrique, les limites d'Atterberg (limite de liquidité, la limite de plasticité, l'indice de plasticité), la teneur en matières organiques sont déterminées conformément aux normes A.S.T.M. La recherche de l'Optimum Proctor Normal vient compléter ces informations. Le tableau 1 présente l'ensemble de ces données. Aucun des sols testés ne contient de matière organique et le  $D_{max}$  est égal à 4,75 mm.

Tableau 1. Propriétés des sols testés.

Acronyme	Type de sol suivant U.S.C.S.	Limite de liquidité [%]	Limite de plasticité [%]	Indice de plasticité [%]	Masse volumique sèche maximale [kg/m <sup>3</sup> ]	Teneur en eau à l'optimum Proctor W opt [%]
TE	CL-ML	29	25	4	1694	17
MF	CL	47	13	34	1742	17
MP	CH-CL	54	23	31	1681	20
TF	CH	55	15	40	1685	18

### 5.2 Précautions expérimentales complémentaires

Les sols sont tout d'abord séchés à l'air puis stockés dans des containers métalliques. La mesure de la teneur en eau initiale est effectuée. Pour chaque sol testé, six échantillons sont testés soit trois pour chaque érodimètre. Pour limiter les écarts de teneur en eau, les échantillons humides sont préparés simultanément pour le H.E.T. et le J.E.T.. La teneur en eau visée pour chaque sol est la valeur à l'optimum moins 1%, de manière à se situer du côté sec.

Le mélange obtenu est stocké dans un sac plastique disposé dans une chambre humide durant 36h (minimum).

Les échantillons sont compactés suivant le protocole Proctor (U.S.B.R., 1990), puis sont stockés dans un sac plastique et placés dans une chambre humide pendant 12h minimum.

## 6 Résultats obtenus

Grâce aux paramètres de la loi d'érosion :  $k_d$ ,  $\tau_c$ , les données sont interprétées en deux étapes. Dans un premier temps, les mesures réalisées avec un appareil permettent d'établir une échelle d'érodabilité des sols relative à l'appareil utilisé. Dans un second temps, afin de confronter les deux appareils, les résultats obtenus pour chaque sol sont comparés entre eux.

Pendant les essais nous observons que le comportement des échantillons est totalement différent d'un sol à l'autre. Ce constat est établi à partir de l'observation de la morphologie finale de l'érosion obtenue et à partir des valeurs de charge hydraulique que nous avons dû appliquer pour obtenir l'érosion. TE, MF semblent s'éroder de manière continue dans le temps et par petites particules tandis que TF s'érode par morceaux. L'érosion plus limitée dans le cas de MP s'effectue sous forme de flocons.

### 6.1 Classification relative aux appareils

Les valeurs moyennes des coefficients obtenus par interprétation des essais effectués avec les deux appareils sont données dans le tableau 2.

Tableau 2. Valeurs moyennes des coefficients obtenus avec le H.E.T. et le J.E.T.

Sol	HET		JET	
	$k_d$ [ $m^3/(N.s)$ ]	$\tau_c$ [Pa]	$k_d$ [ $m^3/(N.s)$ ]	$\tau_c$ [Pa]
MF	$3,82.10^{-07}$	10,12	$1,20.10^{-06}$	0,50
TE	$3,42.10^{-07}$	-9,38	$1,47.10^{-06}$	0,64
TF	$1,86.10^{-08}$	277,49	$1,38.10^{-06}$	1,87
MP	$1,98.10^{-09}$	225,50	$1,59.10^{-07}$	8,18

L'analyse des mesures effectuées avec le H.E.T. permet de formuler plusieurs remarques. En considérant la contrainte critique d'érosion, MF et TE apparaissent bien plus érodables que TF et MP. Par contre cette analyse peut conduire à une valeur négative, mécaniquement impossible. En considérant les coefficients d'érosion, la classification en érodabilité croissante est : MP, TF, TE et MF, les valeurs obtenues pour ces deux derniers sols étant très similaires.

Avec le J.E.T., les valeurs de contrainte critique permettent d'aboutir à la même classification d'érodabilité que celle précédemment énoncée. Les valeurs du coefficient d'érosion déterminées avec le J.E.T. soulignent la plus grande érodabilité de MF, TE et TF par rapport à MP. Par contre les faibles écarts des valeurs obtenues pour les 3 premiers sols ne permettent pas de distinguer leur érodabilité.

### 6.2 Comparaison des deux échelles d'érodabilité

Afin de comparer les valeurs des paramètres obtenues avec les deux érodimètres, nous calculons le rapport des coefficients d'érosion ainsi que celui des contraintes critiques (cf. Tableau 3). En comparaison des valeurs obtenues avec le H.E.T., le coefficient d'érosion  $k_d$  est 3 à 80 fois plus important avec le J.E.T. et à l'inverse, les valeurs de contrainte critique sont 20 à 100 fois plus petites avec le J.E.T.. Ces différences peuvent provenir d'une modélisation

insuffisante des coefficients de frottement ou de celle de la vitesse de l'écoulement utilisées pour l'interprétation des deux érodimètres. Par ailleurs ces différences soulignent la difficulté de modéliser l'action de l'eau sur le sol par la seule expression d'une contrainte tangentielle de cisaillement.

Tableau 3. Rapports des paramètres  $k_d$  et  $\tau_c$  obtenus avec le J.E.T. et le H.E.T.

	$k_d$ JET / $k_d$ HET	$\tau_c$ JET / $\tau_c$ HET
MF	3,68	0,05
TE	4,31	-0,07
TF	69,33	0,01
MP	77,57	0,04

## 7 Conclusion

Le H.E.T. et le J.E.T. sont deux méthodes développées pour caractériser la sensibilité à l'érosion des sols. Pour ces deux érodimètres, l'action de l'eau sur le sol est modélisée par l'expression d'une contrainte tangentielle de cisaillement. La loi d'érosion utilisée est fonction de deux paramètres, le coefficient d'érosion  $k_d$  et la contrainte critique d'érosion  $\tau_c$ .

A partir des essais réalisés sur 4 sols naturels, la confrontation des valeurs des paramètres obtenues avec les deux appareillages met en évidence des différences importantes pour le coefficient d'érosion  $k_d$  et la contrainte critique d'érosion  $\tau_c$ . Ces différences semblent souligner les limites des interprétations utilisées.

Toutefois, la classification de la sensibilité à l'érosion des sols naturels testés est identique pour les deux érodimètres. Ces deux méthodes semblent donc établir une classification intrinsèque des sols.

Dans le but d'améliorer la caractérisation de la sensibilité à l'érosion des sols, il convient de poursuivre la confrontation des deux érodimètres et d'affiner l'interprétation des essais avec des méthodes mieux adaptées, notamment la méthode proposée pour le HET par Bonelli et Brivois (à paraître). La caractérisation ainsi obtenue permettra de renseigner les bases de données expérimentales et de fournir des données utiles aux modélisations de l'érosion interne au sein des ouvrages hydrauliques en terre.

## 8 Bibliographie

- Blaisdell F. W., Anderson C. L., Hebaus G.G. (1981), Ultimate dimension of local scour. Journal of Hydraulics Division, Vol. 107 (3), ASCE, 327-337.
- Bonelli S., Brivois O. (à paraître), The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.
- Hanson G. J., Cook K. R. (2004), Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in-situ. Applied Engineering in Agriculture, A.S.A.E., Vol. 20 (4), 455-462.
- U.S.B.R. (1990), Earth sciences and Research laboratory. Earth Manual, Part II, 3rd edition, U.S.B.R., Denver, 1270 pages.
- Wan C. F., Fell R. (2004), Laboratory Tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams. Geotechnical testing journal, A.S.T.M., Vol. 27 (3), 295-303.
- Wormer J. (2004), Investigation of the Hole Erosion Test used to determine erosion indices of soils for evaluating risk of internal erosion in embankment dams. Internal report, U.S.B.R., Denver.

**Remerciements:** ces tests ont été possibles grâce au financement et à la collaboration de E.D.F., de U.S.B.R. et de A.R.S.