

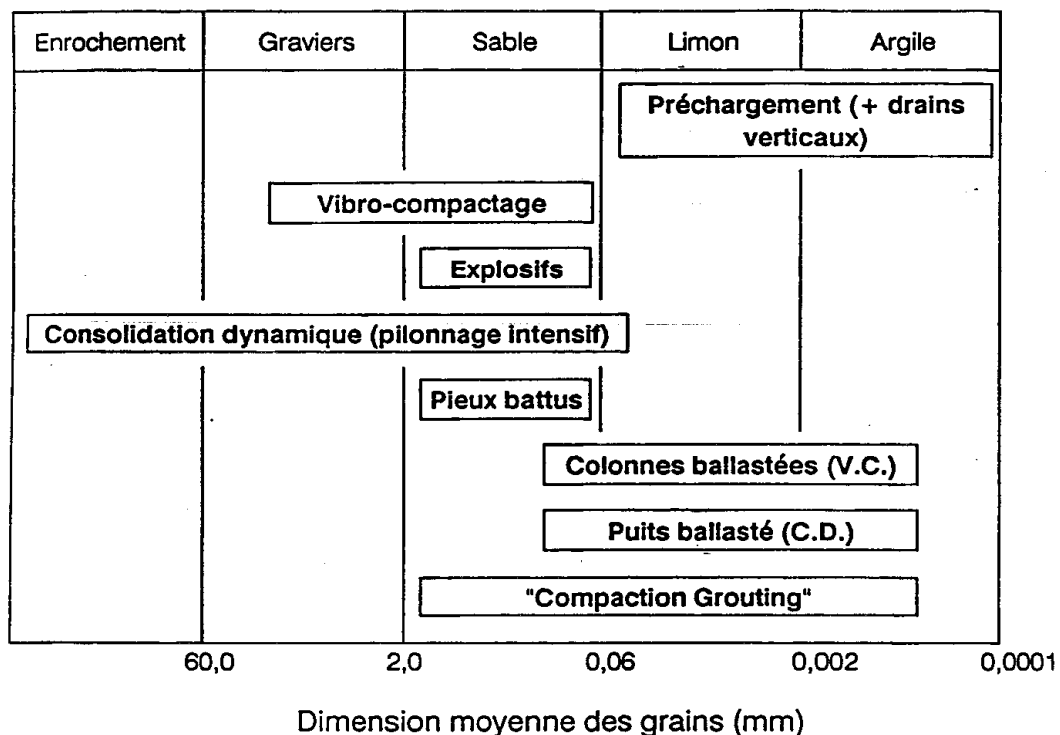
Compactage – Densification

1. Introduction
2. Le compactage des sols
3. Le compactage dynamique
 - 3.1 Exécution
 - 3.2 Spécifications pour le contrôle des travaux
 - 3.3 Illustrations de l'amélioration du sol
4. Le vibro-compactage

1. Introduction

L'amélioration des sols peut être assurée à l'aide d'un traitement mécanique en place. Tel qu'illustré sur le diagramme ci-après plusieurs techniques d'amélioration sont envisageables en fonction de la granulométrie du sol, Gambin (1999-2000).

AMELIORATION MECANIQUE DES SOLS



On constate que la technique de pré-charge avec (ou sans) drains verticaux, présentée dans le chapitre précédent, est beaucoup plus adaptée pour les limons et argiles. Bien que cette catégorie de sols peut faire l'objet d'autres techniques qui seront développées dans les chapitres suivants (colonnes ballastées, etc..). Cependant, à partir du diagramme ci-dessus on remarque que d'autres techniques sont réservées aux sols pulvérulents à l'instar du

compactage dynamique et du vibro-compactage. Ces deux techniques feront successivement l'objet du développement du présent chapitre que nous abordons par un rappel sur le compactage des sols en général.

2. Le compactage des sols

Il peut être assuré par trois voies : (Bergado et col, 1996)

- une pression exercée par un rouleau compacteur ;
- une masse qui chute sur une hauteur donnée ;
- une vibration transmise par un moteur à pulsation hydraulique monté sur un compacteur (ou grue).

Les facteurs qui caractérisent un compactage sont en général : le poids volumique du sol sec γ_d et sa teneur en eau ω à partir desquels on définit le poids volumique total du sol γ par la relation :

$$\gamma = \gamma_d(1 + \omega)$$

Le compactage est une opération qui s'accompagne d'une réduction du volume des vides dans un sol. La compacité maximale d'un sol est atteinte lorsque son indice des vides est au minimum, cet état est atteint pour une teneur en eau du sol dite optimale dont la détermination est faite en laboratoire (Fig. 2.1) lors d'un essai Proctor (Bouassida & Boussetta, 2003). On remarque que la densité sèche maximale peut augmenter en fonction de l'énergie de compactage (figure 2.1). Par ailleurs, une même densité sèche peut correspondre à deux teneurs en eau différentes : la faible teneur en eau (coté sec) correspond à une structure plutôt dispersée, alors que pour la teneur en eau élevée (coté mouillé) la structure des particules est orientée.

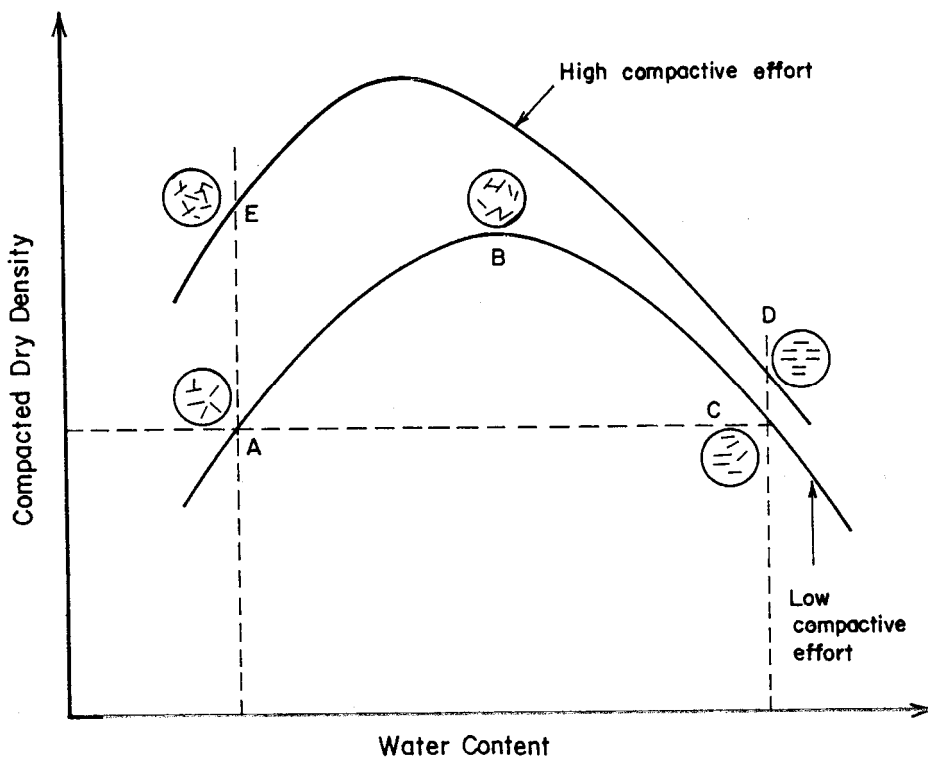


Figure 2.1 Effets du compactage sur la structure du sol.

La teneur en eau optimale d'un sol varie dans une marge qui dépend du type de sol (tableau 2.1). La teneur en eau optimale est d'autant plus élevée lorsque la granulométrie du sol devient davantage faible (Bergado et al, 1996).

2.1 Le compactage des sols pulvérulents

Le paramètre physique indiquant l'état dans lequel se trouve un sol pulvérulent vis-à-vis de la proportion des vides y existant est l'indice de densité relative, noté I_D (ou D_R), qui est défini par :

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100\%$$

Où e , e_{\max} et e_{\min} désignent respectivement l'indice des vides du sol à l'état naturel, à l'état le plus relâché et à l'état de compacité maximale. Les valeurs de e_{\max} et e_{\min} des sols pulvérulents sont présentées dans le tableau 2.1. En fonction de l'état du sol l'indice de densité relative se situe dans les marges indiquées dans le tableau 2.2.

Types de sols	INDICE DES VIDES	
	e_{\max}	e_{\min}
SPHERES DE MEME DIAMETRE	0,92	0,35
SABLE PROPRE UNIFORME	1,00	0,40
LIMON NON ORGANIQUE UNIFORME	1,10	0,40
SABLE LIMONEUX	0,90	0,30
SABLE FIN à GROSSIER	0,95	0,20
SABLE MICACE	1,20	0,40
SABLE ET GRAVIER LIMONEUX	0,85	0,14

Tableau 2.1. Valeurs extrêmes de l'indice des vides de sols pulvérulents

INDICE DE DENSITE RELATIVE (%)	DESCRIPTION
15-35	Lâche
35-65	Moyennement compact
65-85	Compact
85-100	Très compact

Tableau 2.2. Valeurs de l'indice de densité relative en fonction de l'état du sol.

Le compactage est généralement fait par ajout d'une quantité d'eau. A l'état de compacité maximale correspond une teneur en eau optimale dont la valeur est pré-supposée en fonction de la catégorie du sol dans une marge indiquée dans le tableau 2.3.

Type de sol	Valeur probable de ω_{opt} (%). Essai Proctor modifié
Sables	6 à 10
Mélange « sable-limon »	8 à 12
Limons	11 à 15
Argiles	13 à 20

Tableau 2.3 Marges approximatives de la teneur en eau optimale en fonction du type de sol

Le compactage n'est pas uniquement réservé aux sols pulvérulents. En effet, la construction des bassins de décharge, prévue pour le dépôt d'ordures, constitue une application fort intéressante. Les couches d'imperméabilisation de ces systèmes exigent une très faible perméabilité caractéristique des sols fins (par exemple les argiles). Chose qui ne peut être exécutée qu'après un compactage (statique) à forte énergie mais à une teneur en eau du côté mouillé. Le compactage statique des sols fins est évoqué lors de la construction de barrages en terre et de digues à noyau constitué d'un matériau quasiment imperméable. On s'intéressera dans la suite aux améliorations qui découlent d'un compactage dynamique et d'un vibro-compactage, on notera bien qu'elles dépendent du type de sol.

3. Le compactage dynamique

Il est recommandé pour stabiliser et densifier les sols pulvérulents situés aussi bien hors nappe que sous la nappe phréatique. Les principaux avantages du compactage dynamique sont : L'augmentation de la capacité portante, la réduction du tassement et du potentiel de liquéfaction. Cette technique a été pratiquée en premier lieu par Menard au début des années 70 (Gambin et col, 1981). Le procédé consiste à faire chuter des masses très grandes (10- 20 tonnes jusqu'à 150 tonnes) sur le sol à compacter. La hauteur de chute varie de 10-20 à 40m, Bergado et col (1996).

Le compactage dynamique est de même recommandé pour la densification des sols affaissables à structure macroporeuse tels que les loess en ex-URSS (Liausu et col, ?).

3.1. Exécution :

Le compactage peut être réalisé en deux (voire trois) passes :

1^{ère} passe : Les points de compactage sont répartis en un maillage primaire (4mx4m par exemple) où l'énergie fournie est de 60tm/coup à raison de 12 coups par point. A la fin de cette étape on procède à un nivelage de la surface traitée. Un exemple d'illustration, à l'issue, d'une première passe de compactage est fourni sur la figure 2.2.

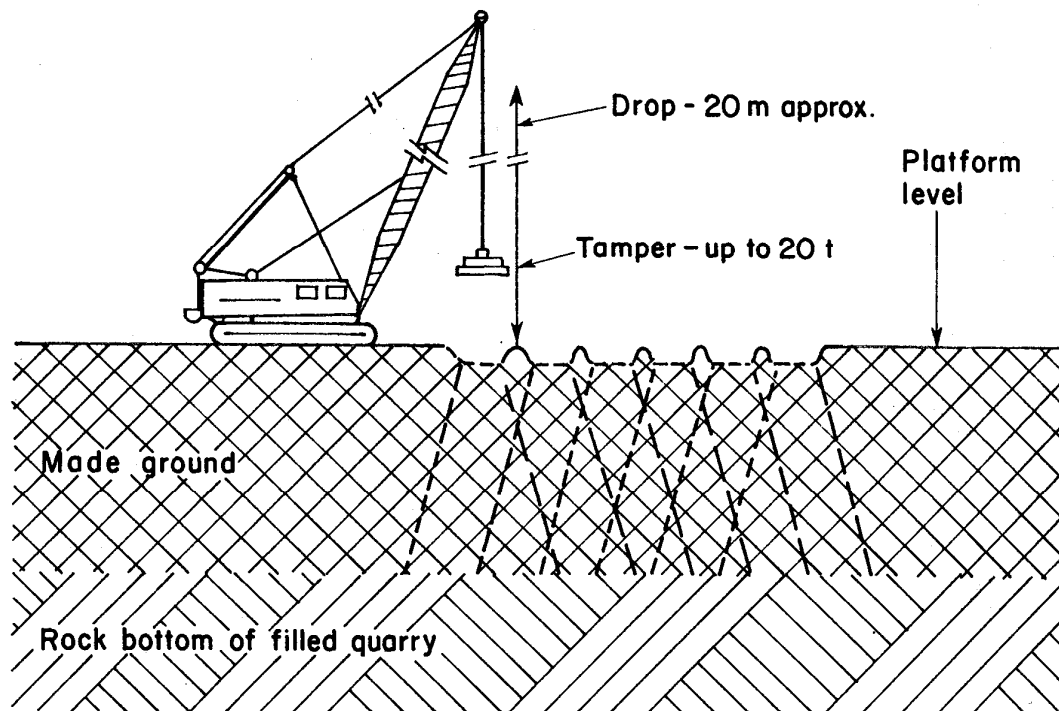


Figure 2.2 Illustration de l'effet d'une première passe de compactage dynamique, (Bergado et col, 1996).

2^{ème} passe : Les points de compactage sont répartis en un maillage secondaire plus serré que le précédent (2mx2m par exemple), on fournit la même énergie de compactage mais le nombre de points est moindre.

On procède au nivelage final de la surface améliorée généralement à l'aide de compacteurs vibrants, de capacité 10 tonnes. On peut prévoir une surépaisseur de 10 à 20 cm de la surface traitée qui peut être recouverte d'une couche en gravier concassé.

3.2 Spécifications pour le contrôle des travaux :

Une pénétration minimale est exigée à la fin de chaque étape de traitement. La pénétration correspond à la profondeur du cratère résultant du nombre de coups réalisé en chaque point de traitement.

La figure 2.3 illustre que lors du dernier coup de compactage la pénétration devient quasiment nulle. Cet indice montre que le traitement par compactage est achevé : *c'est le même principe que celui des pieux battus où le refus est atteint lorsque l'enfoncement du pieu par battage n'est plus possible (inférieur à un enfoncement fixé).*

Figure 2.3 Pénétration ..

La conséquence évidente de la consolidation dynamique est l'augmentation du module d'élasticité, et par suite le module de réaction du sol amélioré. Tel que illustré sur la figure 2.4 cette augmentation est environ de quatre fois à cinq fois, on a :

$$E_{na} = 25MPa, E_{am} = 100MPa ; \quad K_{na} = 70MPa, E_{am} = 350MPa .$$

3.3 Illustrations de l'amélioration du sol par compactage dynamique

Un sol traité par compactage dynamique est le siège d'une amélioration de ses caractéristiques mécaniques et de nouvelles performances en résultent. Nous illustrons ces faits sur deux exemples où le contrôle du sol amélioré s'est fait avec deux méthodes différentes.

3.3.1 Cas d'un projet de raffinerie de pétrole, Bjolgerud et col (1983).

Estimation du module d'élasticité du sol compacté : Elle se fait à partir de l'essai de plaque, de diamètre D, lors de la 1^{ère} phase et 2^{ème} phase de chargement à partir de l'expression :

$$E_{stat} = \frac{3}{4} . D . \frac{\Delta p}{\Delta s} \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 ; \quad p_2 = 0,7 p_{max} ; \quad p_1 = 0,3 p_{max} .$$

$\Delta s = s_2 - s_1$ est la différence entre les tassements correspondant respectivement à p_2 et p_1

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta s} : \text{est le module de réaction du sol (kN/m}^3\text{)}.$$

Estimations de la capacité portante et du tassement :

Les dimensions de la fondation sont déterminées avec la vérification (Etat Limite Ultime) en utilisant les facteurs:

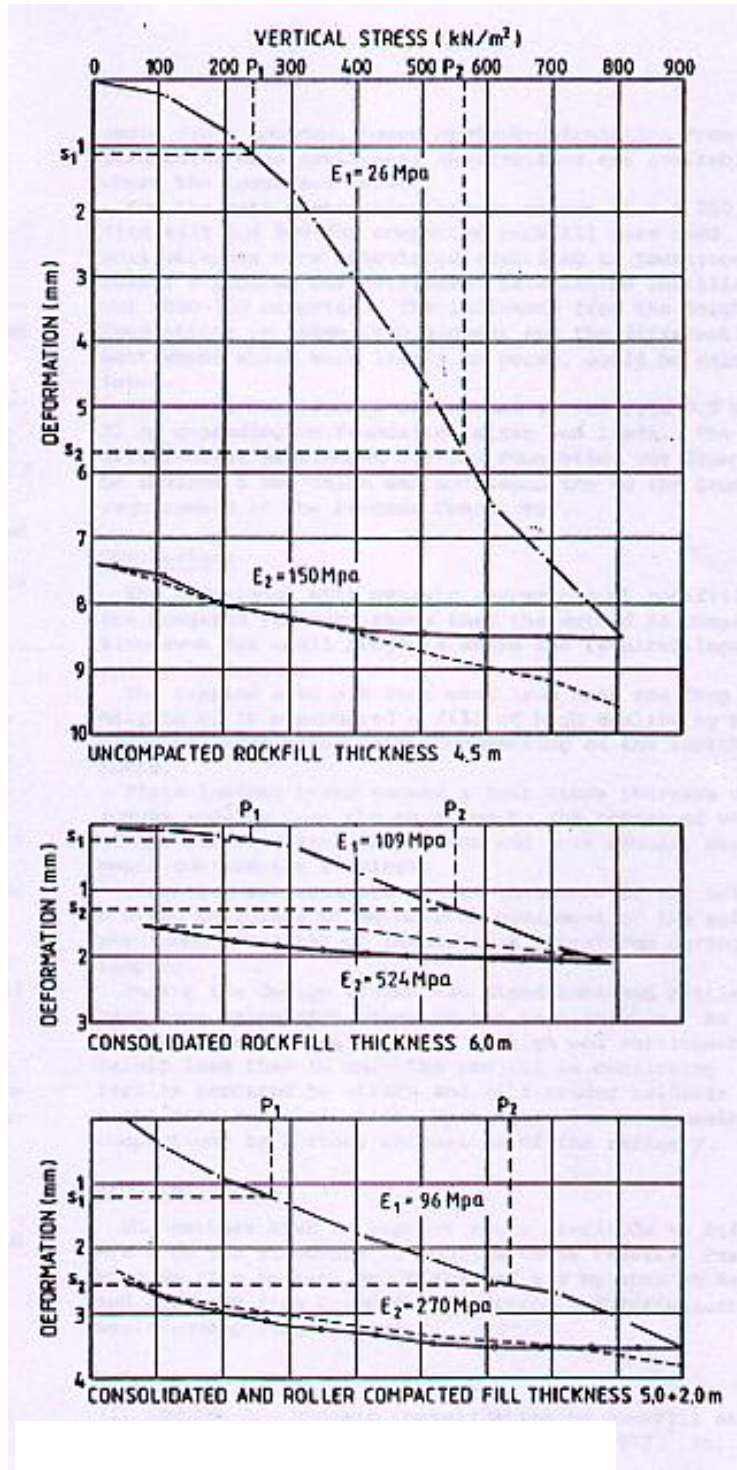


Figure 2.4 Les résultats de l'essai de plaque.

$\Gamma_f = 1,2$ pour les charges permanentes et $\Gamma_f = 1,6$ pour la combinaison des charges de service la plus défavorable.

a) *Capacité portante* : Il a été retenu la valeur 600 kN/m^2 pour les charges statiques, alors que pour les charges dynamiques on recommande la valeur : 300 kN/m^2 .

Les caractéristiques de résistance au cisaillement retenues sont: $C = 0$ et $\varphi = 40^\circ$.

b) Tassement :

Il est calculé à l'ELS (états limites de service) avec un coefficient de pondération égal à 1,0 en utilisant la méthode de Janbu (1969). On y fait intervenir un module de déformation M (kN/m^2) déterminé par l'expression :

$$M = m\sqrt{p \cdot p_a}$$

p est la contrainte verticale en place,

p_a est une contrainte de référence (égale à 100 kPa),

m est un coefficient empirique qui dépend du type de sol, par exemple pour un limon consistant on a : $m = 250$. Pour un remblai en tout-venant compacté on propose : $m = 500$.

Le tassement total des couches d'épaisseur H_i est calculé à partir de l'expression:

$$s = \sum H_i \frac{2}{m} \left(\sqrt{\frac{p_1}{p_a}} - \sqrt{\frac{p_0}{p_a}} \right)$$

Le compactage dynamique est compétitif, par rapport à d'autres solutions d'amélioration, même pour des projets où la surface à traiter est petite.

3.3.2 Terminal pétrolier de Malongo (Cabinda):

Ce projet consiste à construire des réservoirs pétroliers de 91,44 m de diamètre.

Paramètres du compactage : Surface totale 27000m^2 ; Grue sur chenilles avec une énergie unitaire de 200 tonnes.mètre (masse de 12 tonnes sur une hauteur de chute de 18m).

Tassement moyen induit par le pilonnage: 75 cm environ (15% de l'épaisseur traitée).

Essais pressiométriques de contrôle :

L'analyse des courbes $E_M = f(z)$ et $p_l = f(z)$ avant et après compactage (figure 2.5):

Avant traitement : Les caractéristiques augmentent en continu avec la profondeur, c'est l'effet de la contrainte verticale effective : σ'_0 .

Après traitement : Augmentation limitée en profondeur (effet du traitement) puis il y a diminution (idée sur l'effet en profondeur).

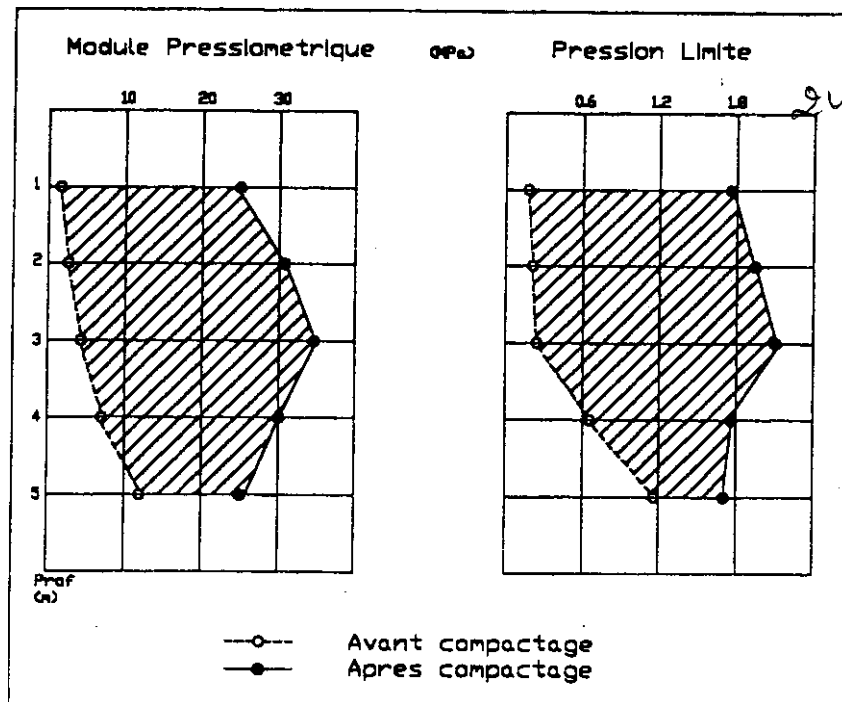


Figure 2.5 Amélioration des caractéristiques pressiométriques après le traitement par compactage dynamique (Liausu et col, 199)

La consolidation dynamique

Elle est recommandée pour les sols à *teneur en eau faible* situés *sous le niveau de la nappe phréatique*

Références :

O. Bjolgerud, A.K. Haug (1983). Dynamic consolidation of rockfill at an oil refinery site. Proc. VIII E.C.S.M.F.E. Vol. , pp 213-218, HELSINKI'83.