

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# POUSSEE ET BUTEE EN VRAIE GRANDEUR

## LARGE SCALE EARTH PRESSURE EXPERIMENTS

Y. TCHENG Docteur - Sciences - Ingenieur en Chef

E. ABSI Docteur - Sciences - Ingenieur en Chef

Centre Experimental de Recherches et d'etudes du batiment et des Travaux Publics, Paris, France

### RESUME :

Dans la région parisienne il a été construit une Station d'essais de Pousées et de Butées en vraie grandeur afin d'étudier les relations effort-déformation d'une part, et l'effet de la cohésion d'autre part .

En premier lieu , l'article résume les résultats d'essais de pousées sur modèle réduit . Dans la deuxième partie de cet article est présentée une étude théorique des sols purement cohérents .

Enfin la Station d'essais en vraie grandeur est décrite dans ses détails :

Il s'agit d'un mur de soutènement de 3 mètres de haut et de 5 mètres de large capable de développer une puissance voisine de 2 500 tonnes . Le mouvement du mur asservi peut effectuer soit une translation, soit une rotation par rapport à un centre de rotation quelconque .

Les résultats d'une telle Station pourront certainement faire progresser notre connaissance actuelle en Mécanique des Sols .

### INTRODUCTION :

Les essais de laboratoire de pousées et de butées sont effectués en général en modèle réduit avec effort relativement limité , sauf la fameuse expérience de TERZAGHI .

Le plupart de ces essais sont réalisés avec un écran vertical et en milieu sans cohésion, c'est-à-dire pulvérulent, dont la surface libre n'est pas chargée . Cette dernière est d'ailleurs souvent horizontale.

Ces résultats sont très intéressants bien qu'à l'heure actuelle nous ne connaissions pas encore exactement l'effet d'échelle.

Même si nous pouvions transposer directement les résultats obtenus en modèle réduit au cas réel, en ce qui concerne la valeur absolue de la contrainte de pousée ou de butée, l'extrapolation de la déformation directement liée à la similitude serait beaucoup plus délicate . En effet comme nous verrons ci-après, la déformation nécessaire pour obtenir la pousée minimale est en général relativement importante , du moins à petite échelle.

Comme toute mobilisation de contrainte nécessite une déformation c'est cette dernière qui conditionne le plus souvent le choix du coefficient de sécurité . Prenons par exemple le cas d'une culée de pont exerçant un effort oblique au sol, la mobilisation de la butée engendre un déplacement de cette culée et suivant l'importance du déplacement admissible, la butée du sol est plus ou moins mobilisée .

Nous pouvons dire que jusqu'à présent cette relation effort-déformation , dans le cas de pousées - butées n'a pas été nettement définie . Il nous paraît donc indispensable de déterminer avec précision l'effet d'échelle de déformation.

Nous poursuivons également d'autres objectifs que nous développerons plus loin.

Mais avant de poursuivre cette étude, nous résumerons d'abord les résultats obtenus sur modèle réduit :

#### 1 - ETUDE EXPERIMENTALE SUR MODELE REDUIT EN MILIEU PULVERULENT.

##### A - Pousée au repos :

Au fur et à mesure du remplissage de la cuve on enregistre en grandeur et en direction la valeur de la résultante de pousées au repos. Le coefficient de pousée correspondant , fonction de la compacité du sol, varie de 0,2 à 0,8 et le centre d'application se trouve effectivement à peu près au 1/3 inférieur. Cette pousée est donc bien triangulaire.

##### B - Coefficient de pousée en équilibre limite :

Le coefficient de pousée, fonction d'une part de l'inclinaison de l'écran sur la verticale et en outre de l'angle que fait la surface libre avec l'horizontale et d'autre part de l'angle de frottement interne du milieu, est sensiblement égal à celui donné par les tables de CAQUOT et KERISEL .

Toutefois les résultats expérimentaux obtenus sont légèrement supérieures aux chiffres théoriques.

C - Obliquité des contraintes :

L'obliquité des contraintes de poussée sur la normale à l'écran est sensiblement égale à  $\psi$  alors qu'au repos elle est à peu près égale à  $2/3$  de  $\psi$ .

Le point d'application de la poussée part du  $1/3$  inférieur comme nous l'avons dit plus haut, et remonte jusqu'à  $0,4$  et même  $0,5$  de la hauteur totale.

D - Relation effort - déformation

La relation effort-déformation, qui comme nous l'avons dit, est de loin la plus importante pour les ingénieurs, ne peut pas être fournie par l'équation de COULOMB. Or, d'après nos expériences et selon la compacité du milieu, le déplacement nécessaire pour la mobilisation intégrale de la poussée est de l'ordre de  $1$  à  $3\%$  de la hauteur totale de l'écran. Ce chiffre est très supérieur à la règle généralement admise de  $1\%$ .

Nous précisons à nouveau qu'il s'agit d'essais sur modèle réduit en milieu sans cohésion.

II - ETUDE THEORIQUE SUR SOLS COHERENTS

Pour un tel sol l'étude sur modèle réduit n'est pas possible car la moindre cohésion supprime toute poussée, le matériau reste stable même en talus vertical. Il est donc nécessaire de créer une station de poussée - butée en vraie grandeur, d'une part pour mieux saisir l'effet d'échelle, et d'autre part pour étudier de plus près l'influence de la cohésion.

Mais avant de décrire cette station, examinons d'abord le problème théorique posé par les sols cohérents, en particulier, dans un milieu à  $\psi$  nul.

Considérations générales :

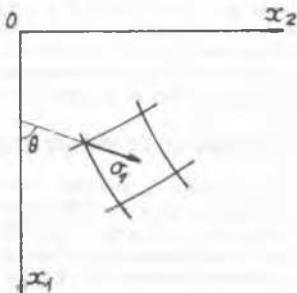
L'étude des milieux purement cohérents ( $C \neq 0, \psi = 0$ ) est importante en mécanique des sols. C'est le cas des sols argileux parfaitement saturés.

Le milieu est en état d'équilibre limite plan si en tous points les contraintes principales  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  sont reliées entre elles par le critère de COULOMB :

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2 C \quad (1)$$

Les lignes de glissement constituent deux familles de courbes orthogonales admettant les contraintes  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  comme bissectrices

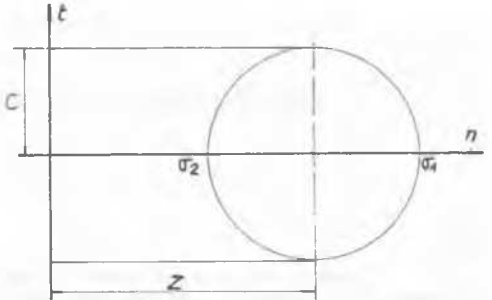
- Figure 1 -



B - Equations de Hencky

Rapportons l'étude du milieu en état d'équilibre limite au système de référence ( $\sigma, x_1, x_2$ ) où l'axe  $\sigma x_1$  est dirigé verticalement vers le bas.

Figure 2



Le long d'une ligne de glissement on a les équations de Hencky ( voir bibliographie " Equilibre limite des sols " ABSI - Annales de l'I.T.B.T.P. n° septembre 1962 )

$$Z + 2 \epsilon C \theta - W = C \tan \theta \quad (2)$$

avec les notations suivantes :

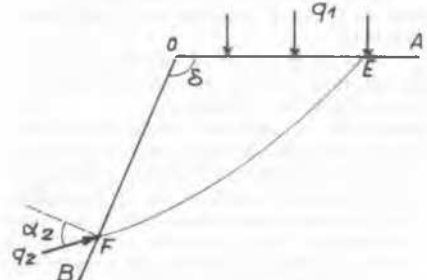
- Z : abscisse du centre du cercle de MOHR
- C : Cohésion
- $\theta$  : Angle que fait la contrainte principale majeure  $\sigma_1$  avec la verticale  $\sigma x_1$
- $\epsilon = +1$  : pour la première famille de lignes de glissement
- $\epsilon = -1$  : pour la deuxième famille
- W :  $\gamma x_1$  ( $\gamma$  : poids spécifique du milieu )

C - Pression sur un mur de soutènement :

Le talus est défini par :

- un plan horizontal O A soumis à une charge verticale uniformément répartie  $q_1$
- la paroi O B du mur de soutènement

Figure 3



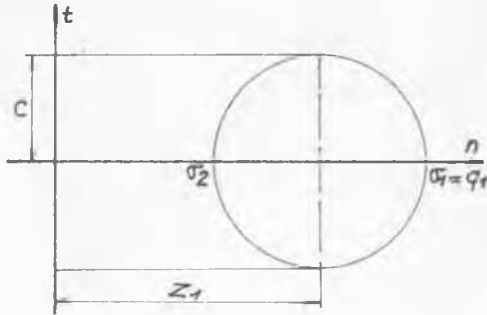
On se propose de déterminer la pression  $q_2$  d'inclinaison  $\alpha_2$  s'exerçant sur le mur de soutènement O B.

Soit la ligne de glissement E F appartenant à la deuxième famille. On a de l'équation ( 2 ) :

$$(Z - 2 C \theta - W)_E = (Z - 2 C \theta - W)_F \quad (3)$$

Le long de O A , on a :

- Figure 4 -

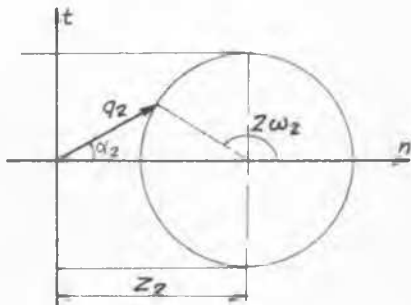


$$Z = q_1 - C \quad \theta = 0$$

$$W = \gamma x_1 = 0$$

Au point F le long de O B :

- Figure 5 -



$$Z_2 = q_2 \cos \alpha_2 - C \cos 2\omega_2$$

$$\theta_2 = -\delta + \omega_2$$

$$\frac{q_2}{\sin 2\omega_2} = \frac{C}{\sin \omega_2}$$

$$\rightarrow q_2 = C \frac{\sin 2\omega_2}{\sin \alpha_2} \quad (4)$$

$$W = \gamma x_1$$

d'où

$$q_1 - C = q_2 \cos \alpha_2 - C \cos 2\omega_2 - 2 C (\omega_2 - \delta) - \gamma x_1$$

$$(5)$$

Les relations transcendentes (4) et (5) permettent d'avoir la valeur de la poussée  $q_2$  sur le mur en fonction de :

- La cohésion  $C_2$
- Le poids spécifique  $\gamma$  du milieu
- L'inclinaison  $\alpha_2$  de la poussée
- L'ouverture  $\delta$  du coin A O B
- L'abscisse  $x_1$  du point F du mur

La valeur limite de  $x_1$  pour que le milieu derrière le mur soit en état d'équilibre limite dans son ensemble est définie par :

$$2 \omega_2 = \frac{\pi}{2} \quad (-6-)$$

d'où

$$q_2 = \frac{C}{\sin \alpha_2}$$

$$q_1 - C = q_2 \cos \alpha_2 - 2 C \left( \frac{\pi}{2} - \delta \right) - \gamma (x_1)_1$$

$$= \frac{C}{\sin \alpha_2} \cos \alpha_2 - 2 C \left( \frac{\pi}{2} - \delta \right) - \gamma (x_1)_1$$

En conséquence :

$$(x_1)_1 = \frac{1}{\gamma} \left[ C \left( \frac{1}{\sin \alpha_2} - \pi + \delta + 1 \right) - q_1 \right] \quad (7)$$

Nous donnons en annexe quelques tableaux permettant d'avoir la pression  $q_2$  s'exerçant sur un mur de soutènement dans le cas où  $\delta = 10^\circ$  en fonction de  $q_1$ ,  $x_1$  et  $\alpha_2$

Dans ces tableaux nous adoptons les notations suivantes :

$$P = q_2 / C \quad S = (q_1 - C) / C$$

$$X = \gamma x_1 / C$$

III - STATION D'ESSAIS DE SAINT-REMY-LES-CHEVREUSE

Objectif de la Station :

L'objectif principal de la Station d'essais en vraie grandeur est d'étudier l'effet d'échelle du point de vue tant de la contrainte que de la déformation .

En effet si nous arrivions à définir la loi de similitude, nous pourrions résoudre les problèmes pratiques en réalisant un modèle réduit, ce qui présenterait d'autant plus d'intérêt qu'une station en vraie grandeur, telle que celle de SAINT-REMY-LES-CHEVREUSE ( à 30 km de PARIS ) est forcément coûteuse et difficile d'utilisation .

Nous avons comme autres objectifs , l'étude des sols cohérents qui ne peuvent pas être étudiés en modèle réduit si nous ne réduisons pas la cohésion du sol réel , puisque les sols doués de la moindre cohésion peuvent rester stables si le talus n'est pas très haut à moins de modifier la densité du sol , par exemple par gradient hydraulique ( Voir thèse de ZELIKSON Amos " Représentation de la pesanteur par gradient hydraulique dans les modèles réduits en géotechnique " Paris Juin 1967).

ZELIKSON a étudié uniquement le cas des sols sans cohésion .

Par ailleurs, certains murs de forme compliqués échappent à tout calcul théorique ; nous espérons pouvoir donner une réponse aux problèmes posés par ces cas particuliers à l'aide de cette grande station . Enfin nous étudierons la relation effort - déformation en fonction du temps , surtout pour les sols cohérents .

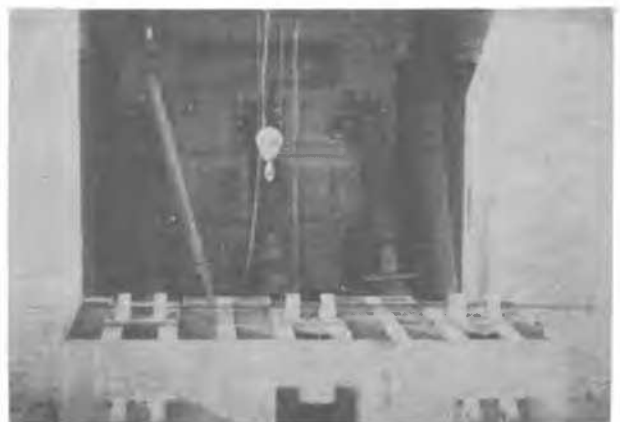
Description générale :

Le Domaine de Saint-Paul à SAINT-REMY-LES-CHEVREUSE surplombe la vallée de Chevreuse. Cette colline est formée de sable et de grès du stampien dit de FONTAINEBLEAU , dont l'épaisseur moyenne est supérieure à 20 mètres , un amas de blocs rocheux ( grès de FONTAINEBLEAU ) se trouve au sommet de la butte , et nous avons profité de sa présence pour adosser la mur de poussée et de butées contre sa masse rocheuse ( photo 6 )



Cette photo montre l'état des fouilles devant recevoir les fondations de la station. Au premier plan , le fond de fouille et le front de taille sont constitués par du sable de FONTAINEBLEAU. En haut de la photo , on voit nettement le rocher qui est du grès de même étage géologique .

Le mur de poussée - butée a une largeur de 5 mètres et une hauteur de 3,50 mètres dont 3 mètres en contact avec le sol placé devant lui. Ce mur est actionné par huit vérins : trois vérins horizontaux inférieurs, trois vérins supérieurs dits horizontaux et deux vérins dits verticaux . Les six vérins horizontaux , divisés en deux nappes, comme nous venons de le dire sont suspendus entre le mur et le rocher auxquels ils sont articulés . Les deux vérins verticaux , par contre , s'appuient à leur extrémité supérieure sur un caisson en béton armé lesté de sable ( photo 7 )



- Photo 9 -

Station . vue de face

Pendant le montage on voit le mur encore posé à terre . Les 3 vérins horizontaux inférieurs sont montés . La nappe de vérins supérieurs horizontaux est déjà fixée sur le rocher par l'intermédiaire d'une semelle en béton armé . Les vérins verticaux sont suspendus sous le caisson . Il ne reste plus qu'à soulever le mur et à l'atteler aux cinq derniers vérins . Il s'agit donc de la dernière phase du montage .

Tous les vérins sont asservis, ils peuvent donc faire mouvoir le mur selon un programme pré-établi, soit de translation, soit de rotation avec centre de rotation pré-déterminé . Les vérins horizontaux ont chacun une puissance de 300 tonnes et les vérins verticaux de 250 tonnes chacun ( photo 8 )

- Photo 8 -



Ferrocéiling : Vu l'importance des efforts développés, la station est fortement armée . Voici une vue montrant l'importance des armatures de la station, tant du point de vue dimension que densité .

L'ensemble forme une sorte de tunnel d'essais fermé par le mur de poussée-butée . Suivant l'axe vertical de ce dernier, et dans une tranchée de 20 ou 50 cm de large ménagée dans son épaisseur, nous avons placé six cellules de mesure . Tout se passe donc comme si le mur sensible était flanqué de deux murs de garde de 2,40 m ou 2,25 m chacun . Ces cellules sont composées d'un certain nombre de dynamomètres permettant de mesurer la direction, la grandeur et la position des contraintes de poussées ou de butées ( photo 10 )

- Photo 10 -



Cette photo représente l'aspect final de la station qui s'appuie sur une masse de grès dont un bloc détaché se trouve à gauche de la photo . La partie gauche du bâtiment est la chambre de contrôle où toutes les commandes sont rassemblées . Le Caisson rempli de sable est lourdement lesté et légèrement en porte-à-faux sur le bajoyer . On voit également que le bajoyer est renforcé à sa partie droite .

Le caisson est posé sur deux bajoyers parallèles ( photo 9 )



Vue de face du mur de la station

Au centre de ce mur, on voit un pan de mur vertical noir de 50 cm de largeur . Il s'agit du mur sensible proprement dit, derrière lequel sont abrités un certain nombre de dynamomètres . La largeur de 50 cm peut être réduite à 20 cm . Les parties claires métalliques de part et d'autre du mur sensible forment les écrans de garde . Le sol ( Sable de FONTAINEBLEAU ) est déjà rempli à ras du seuil sur lequel est posé le mur.

- Photo 12 -



APPAREILS DE MESURE :

Les dynamomètres des cellules de mesure sont à jauges extensométriques . Les mesures s'effectuent par voie électronique à enregistrement automatique ( photos 11 et 12 )

- Photo 11 -



Cette photo montre une partie des enregistrements automatiques de la chambre de contrôle. A gauche, on enregistre les contraintes tangentielles et normales le long du mur . L'enregistreur droit indique les contraintes régnant dans la masse du massif au cours des essais .

Voici le tableau synoptique du système hydraulique de la station . Il permet aux opérateurs de suivre la pression de chaque vérin , ainsi que le sens du mouvement des pistons . A gauche on entrevoit une partie du pupitre de commande.

Parallèlement, nous notons les pressions régnant dans les chambres des vérins , le débit de la pompe alimentant ces vérins étant constant. Dans la masse du sol d'essai nous plaçons un certain nombre d'appareils de mesure , les uns de densités , d'autres de contraintes dont la variation est enregistrée tout au long de l'essai. Pour mieux localiser la zone de rupture , nous noyons dans la masse le même sol mais teinté et compacté de la même façon .

Enfin nous relevons tous les mouvements de la surface libre du mur, de la station et du rocher pendant l'essai à l'aide de deux théodolites placés dans les zones non influencées par le mouvement des terres.

MODE OPERATOIRE ET PROGRAMME D'ESSAI

Nous commençons par remblayer le terrain devant le mur à l'aide d'une grue tournante qui commande une benne preneuse . Le sol est compacté par couche de 20 cm , la densité est vérifiée minutieusement ; toutes variations de compacité exigent l'enlèvement de la couche déjà mise en place ( photo 13 )

## POUSSEE ET BUTEE

- Photo 13 -



### Vue Générale de la station

- Côté droit -

Le remblai atteint le haut du mur qui se trouve caché à gauche de la photo .

Au milieu , on distingue nettement des blocs de rocher .

Après avoir placé les appareils de mesure et les bandes teintées dans le sol du massif, et après avoir atteint les cotes définitives, nous actionnons la pompe qui injecte l'huile sous pression dans les différents vérins. Cette pression peut atteindre jusqu'à 500 bars. Le système d'asservissement contrôle l'avance du mur selon le programme décidé d'avance et l'enregistrement des différents éléments de mesure fonctionne automatiquement.

Pour assurer la sécurité et également en raison de l'ignorance de l'importance de la déformation, nécessaire, pour mobiliser la poussée et surtout la butée, nous imprimons au mur une vitesse de 40 cm en 24 heures. Certains essais de butées, par exemple, devront donc durer au-delà d'une journée entière.

Le programme actuel des recherches en cours est le suivant :

a ) Essais de poussée et de butée en faisant varier l'angle de talus de la surface libre et l'inclinaison du mur d'essai .

b ) Etude des milieux hétérogènes, en particulier dans le cas où le mur est protégé par une épaisseur de matériaux de bonne qualité.

c ) Etude de la poussée des terres

en fonction de la forme du mur .

Parallèlement nous exécutons en laboratoire, une série d'essais sur modèle réduit ayant exactement la forme de la station .

Il s'agit donc d'une maquette à échelle 1 pour 10 ; ce modèle réduit a un double objet :

1° - Etudier l'effet d'échelle

2° - Interpoler les résultats des essais en vraie grandeur, qui sont malheureusement très longs à réaliser .

### CONCLUSION :

Les premiers essais viennent d'être commencés ; il n'est pas possible à l'heure actuelle d'en tirer une conclusion . Néanmoins, nous pensons que l'effet d'échelle nous réservera des surprises comme dans le cas des fondations superficielles . Tant que nous ne connaissons pas les lois de similitude qui interviennent en Mécanique des Sols, les résultats fournis par les modèles réduits seront toujours sujets à caution . Par ailleurs la cohésion est une des deux caractéristiques essentielles du sol . Or les matériaux utilisés jusqu'à présent ont toujours été des matériaux pulvérulents, donc sans cohésion . Négliger systématiquement la cohésion ne pourra jamais résoudre complètement les problèmes de sols . Malheureusement la réduction d'échelle de la cohésion n'est pas une chose aisée ; nous avons donc tenté de déterminer théoriquement d'une part les coefficients de poussée et de butée dus à la cohésion, et d'autre part essayé de vérifier nos calculs par cette station de grande échelle.

### REMERCIEMENTS :

Nous remercions spécialement la FEDERATION NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS en les personnes de Messieurs les Présidents COURBOT et STRIBICK, ainsi que Monsieur HERVET Secrétaire Général de cette Fédération qui a assuré la réalisation de toute l'opération .

Les recherches en modèle réduit ont été effectuées par Monsieur FAOU, et celles de la Station en vraie grandeur sont suivies par Monsieur ISEUX, et nous les en remercions .



LARGE SCALE EARTH PRESSURE EXPERIMENTS

TCHENG et ABSI

ANNEXE

S = 1		$\alpha_2 = 5^\circ$
P	X	
1,00	1,42	
1,99	2,49	
2,96	3,53	
3,92	4,54	
4,84	5,52	
5,73	6,45	
6,58	7,33	
7,37	8,16	
8,11	8,92	
8,78	9,62	
9,39	10,24	
9,93	10,79	
10,39	11,26	
10,78	11,65	
11,08	11,95	
11,29	12,17	
11,43	12,30	
11,47	12,34	

S = 2		$\alpha_2 = 5^\circ$
P	X	
1,00	0,42	
1,99	1,49	
2,96	2,53	
3,92	3,54	
4,84	4,52	
5,73	5,45	
6,58	6,33	
7,37	7,16	
8,11	7,92	
8,78	8,62	
9,39	9,24	
9,93	9,79	
10,39	10,26	
10,78	10,65	
11,08	10,95	
11,29	11,17	
11,43	11,30	
11,47	11,34	

S = 3		$\alpha_2 = 5^\circ$
P	X	
1,99	0,49	
2,96	1,53	
3,92	2,54	
4,84	3,52	
5,73	4,45	
6,58	5,33	
7,37	6,16	
8,11	6,92	
8,78	7,62	
9,39	8,24	
9,93	8,79	
10,39	9,26	
10,78	9,65	
11,08	9,95	
11,29	10,17	
11,43	10,30	
11,47	10,34	

S = 1		$\alpha_2 = 10^\circ$
P	X	
0,50	0,92	
1,00	1,49	
1,49	2,04	
1,96	2,57	
2,43	3,08	
2,87	3,57	
3,30	4,03	
3,70	4,45	
4,07	4,85	
4,41	5,20	
4,71	5,52	
4,98	5,80	
5,21	6,04	
5,41	6,24	
5,56	6,39	
5,67	6,50	
5,73	6,56	
5,75	6,59	

S = 2		$\alpha_2 = 10^\circ$
P	X	
1,00	0,49	
1,49	1,04	
1,96	1,57	
2,43	2,08	
2,87	2,57	
3,30	3,03	
3,70	3,45	
4,07	3,85	
4,41	4,20	
4,71	4,52	
4,98	4,80	
5,21	5,04	
5,41	5,24	
5,56	5,39	
5,67	5,50	
5,73	5,56	
5,75	5,59	

S = 3		$\alpha_2 = 10^\circ$
P	X	
1,49	0,04	
1,96	0,57	
2,43	1,08	
2,87	1,57	
3,30	2,03	
3,70	2,45	
4,07	2,85	
4,41	3,20	
4,71	3,52	
4,98	3,80	
5,21	4,04	
5,41	4,24	
5,56	4,39	
5,67	4,50	
5,73	4,56	
5,75	4,59	