

**Critères pour
l'étude de la stabilité
d'un évacuateur de crues.
(CÉSEC)**

**Hydro-Québec
Division génie civil
Service Géologie et Structures
décembre 1990**

Table des matières

1. Objectifs	3
2. Codes et normes	3
3. Paramètres	4
3.1 Propriétés des matériaux	4
3.2 Sections de la structure considérées pour l'analyse	6
4. Charges	7
4.1 Poids propre (P)	7
4.2 Hydrostatiques (E,E1,E2)	7
4.3 Sous-pressure (U)	8
4.3.1 Définition	8
4.3.2 Galerie de drainage	8
4.3.3 Calcul de la sous-pressure en cas de traction	9
4.4 Glace (G)	9
4.4.1 Poussée thermique	9
4.4.2 Poussée dynamique	10
4.5 Silt (S)	11
4.6 Séisme (T1,T2)	11
4.6.1 Poussée pseudo-dynamique de la retenue	12
4.6.2 Poussée pseudo-dynamique du poids de la structure	12
5. Critères de stabilité	13
5.1 Renversement	13
5.2 Soulèvement	13
5.3 Glissement	14
5.4 Vérification de l'état de contraintes	15
5.4.1 Contraintes admissibles	15
5.4.2 Méthode de calcul	16
6. Cas de chargement	17
6.1 Stabilité d'ensemble	17
- Conditions normales	17
- Conditions extrêmes	17
Références	18

1. Objectifs

Le présent document a pour objet la définition des critères de conception pour le calcul de stabilité des évacuateurs de crues dans le cadre d'études préliminaires.

2. Codes et normes

Les principaux codes et normes qui se retrouvent dans ce document sont tirés des ouvrages suivants:

- CNRC: Le code national du bâtiment.
- USBR: Design of Gravity Dams.
- ACNOR: Norme CAN 3-A23.3-M

1. Objectifs

Le présent document a pour objet la définition des critères de conception pour le calcul de stabilité des évacuateurs de crues dans le cadre d'études préliminaires.

2. Codes et normes

Les principaux codes et normes qui se retrouvent dans ce document sont tirés des ouvrages suivants:

- CNRC: Le code national du bâtiment.
- USBR: Design of Gravity Dams.
- ACNOR: Norme CAN 3-A23.3-M

Paramètres

3.1 Propriétés des matériaux

Les valeurs des paramètres suivants sont courantes et peuvent être utilisées dans les calculs préliminaires en l'absence de celles déterminées en laboratoire ou sur le site de l'ouvrage.

Lors des calculs finaux, les valeurs réelles devront être utilisées.

3. Paramètres

3.1 Propriétés des matériaux

Les valeurs des paramètres suivants sont courantes et peuvent être utilisées dans les calculs préliminaires en l'absence de celles déterminées en laboratoire ou sur le site de l'ouvrage. Lors des calculs finaux, les valeurs réelles devront être utilisées.

Description	SI (MKS)
Accélération de la gravité <u>Glace</u> - Résistance en compression <u>Béton</u> - Masse volumique - Résistance en compression à 91 jours (ciment type 20m) • béton de masse • béton structural - Cohésion - Coefficient de frottement béton-béton, joint horizontal	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ $f_g = 2,8 \text{ MPa}$ $c = 2\ 400 \text{ kg/m}^3$ $f'_c = 20 \text{ MPa}$ $f'_c = 30 \text{ MPa}$ $c = 2,76 \text{ MPa}$ $\text{tg}\phi = 0,9$

Description	SI (MKS)
Accélération de la gravité	$g = 9,81 \text{ m/s}$
<u>Glace</u>	
Résistance en compression	$fg = 2,8 \text{ MPa}$
<u>Béton</u>	
- Masse volumique	$c = 2\,400 \text{ kg/m}^3$
- Résistance en compression à 91 jours (ciment type 20 m)	
• béton de masse	$f'c = 20 \text{ MPa}$
• béton structural	$f'c = 30 \text{ MPa}$
- Cohésion	$c = 2,76 \text{ MPa}$
- Coefficient de frottement béton-béton, joint horizontal	$tg\phi = 0,9$
<u>Acier d'armature</u>	
- Masse volumique	$s = 7\,850 \text{ kg/m}$
- Limite élastique	
• Barres nos 10 et 15, nuance intermédiaire	$f_y = 300 \text{ MPa}$
• Barres nos 20, 25, 30, 35, 45 et 55, nuance dure	$f_y = 400 \text{ MPa}$
<u>Roc</u>	
- Masse volumique	$r = 2\,700 \text{ kg/m}^3$
- Coef. frot. béton/roc (bét. coulé contre le roc propre)	$tg\phi = 0,75$
- Coef. frot. roc/roc	$tg\phi = 0,70$
- Cohésion roc fracturé/béton	$c = 0,7 \text{ PMa}$
- Cohésion roc sain/béton	$c = 2,76 \text{ PMa}$
<u>Silt</u>	
- Masse volumique, submergé	$= 1,140 \text{ kg/m}^3$
- Angle de frottement interne	$\phi = 30^\circ$
- Coefficient de poussée du remblais au repos	$K_o = 0,5$

Description	SI (MKS)
<u>Acier d'armature</u> - Masse volumique - Limite élastique . Barres nos 10 et 15, nuance intermédiaire . Barres nos 20, 25, 30, 35, 45 et 55, nuance dure	$s = 7\,850 \text{ kg/m}$ $f_y = 300 \text{ MPa}$ $f_y = 400 \text{ MPa}$
<u>Roc</u> - Masse volumique - Coef. frot. béton/roc (bét. coulé contre le roc propre) - Coef. frot. roc/roc - Cohésion roc fracturé/béton - Cohésion roc sain/béton	$r = 2\,700 \text{ kg/m}^3$ $tg\phi = 0,75$ $tg\phi = 0,70$ $c = 0,7 \text{ MPa}$ $c = 2,76 \text{ MPa}$
<u>Silt</u> - Masse volumique, submergé - Angle de frottement interne - Coefficient de poussée du remblais au repos	$= 1\,140 \text{ kg/m}^3$ $\phi = 30^\circ$ $K_o = 0,5$

Description	SI (MKS)
<u>Remblai compacté</u>	
- Masse volumique humide	
• Granulaire	= 2 100 kg/m ³
• Moraine	= 2 200 kg/m ³
• Enrochement	= 2 000 kg/m ³
- Masse volumique déjaugée	
• Granulaire	= 1 300 kg/m ³
• Moraine	= 1 275 kg/m ³
• Enrochement	= 1 250 kg/m ³
- Coefficient de frottement béton/enrochement	tgø = 0,4
- Angle de frottement interne	
• Granulaire	ø = 37°
• Moraine	ø = 36°
• Enrochement	ø = 45°
- Coefficient de poussée du remblais au repos	Ko = 1 - sinø

3.2 Sections de la structure considérées pour l'analyse

L'analyse de stabilité est effectuée pour une section qui comprend un pilier intermédiaire et les deux demi-coursiers adjacents. (voir figure 1). Chacune des sections doit être stable par elle-même. Le pilier doit être vérifié comme s'il s'agissait d'un porte-à-faux encastré à sa base. Pour ce qui est des piliers d'extrémité, l'analyse de stabilité est réalisée pour une section incluant le pilier et le demi-coursier adjacent.

4. Charges

La représentation et l'orientation des forces est montrée à la figure 2. L'identification abrégée des forces est donnée entre parenthèses.

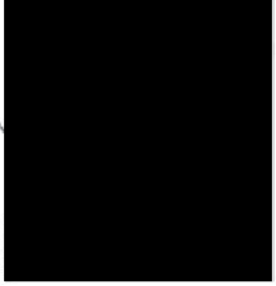
4.1 Poids propre (P)

Le poids propre, ou charge morte, est composé du poids des structures en béton excluant le poids des équipements mécaniques.

4.2 Hydrostatiques (E,E1,E2)

Les pressions hydrostatiques agissant à l'amont, à l'aval et au dessus de la section ou d'une de ses parties. Les poussées hydrostatiques sont évaluées selon les niveaux des plans d'eau amont et aval fixés par les conditions d'exploitation du réservoir et selon les cas de chargement considérés.

Dans le calcul des cas de chargement, la force horizontale due à la poussée hydrostatique aval n'est pas considérée. Cependant, elle agit toujours sur la sous-pression.



4.3 Sous-pression (U)

4.3.1 Définition

La sous-pression est une force exercée verticalement par la pression hydrostatique agissant sous la totalité de l'ouvrage.

Sans drainage, la sous-pression décroît de façon linéaire de l'amont à l'aval de l'ouvrage. (figure 3)

Lorsque le niveau aval est inférieur au niveau du radier aval, il est considéré que la sous-pression au droit de l'extrémité aval du radier est équivalente à la hauteur du radier.

4.3.2 Galerie de drainage

Lorsqu'une galerie de drainage opérationnelle est présente, la pleine charge hydrostatique à la face amont de la structure se réduit linéairement jusqu'au système de drainage pour y atteindre une valeur égale à la pression hydrostatique aval plus le tiers de la différence entre les pressions hydrostatiques amont et aval. A l'aval de la galerie de drainage, la sous-pression diminue linéairement pour atteindre la pression hydrostatique aval.

4.3.3 Calcul de la sous-pression en cas de traction

Lorsqu'une tension s'exerce à la face amont, la stabilité de l'ouvrage doit être analysée avec une redistribution des sous-pressions hydrostatiques dues au décollement à la base de l'ouvrage, dans toute la zone de tension. Lorsqu'il n'y a pas de drainage, la pleine pression hydrostatique amont s'applique alors sous la partie où il y a décollement, ce qui accentue ce dernier. Le processus doit être résolu d'une façon itérative.

Cependant, cette règle ne s'applique pas lors des cas de chargement dynamique.

Actuellement, il est possible de calculer cet accroissement de tension que dans les cas non-drainés, car le comportement de cet accroissement de pression lorsqu'il y a drainage n'est pas connu.

4.4 Glace (G)

Les informations de cette section sont tirées d'une étude de la SEBJ (ref. 1) publiée en 1976.

4.4.1 Poussée thermique

Une force de 150 kN par mètre linéaire, s'appliquant à 300 mm sous la surface de l'eau, est considérée sur toute la largeur de l'ouvrage.

Une force de 180 kN par mètre linéaire, 300 mm sous la surface de l'eau, agit latéralement sur les piliers, en amont des vannes, dans le cas où la vanne est ouverte.

4.4.2 Poussée dynamique

Force due à l'impact de la glace lorsqu'il y a une évacuation ou un déplacement des glaces sous l'action du vent. (réf. 1). Deux forces sont considérées: une force F agissant sur le nez du pilier dans le sens de l'écoulement et une force F_1 agissant latéralement sur le nez du pilier. Ces forces n'agissent pas simultanément.

a) Force dans la direction amont-aval (figure 4)

$$F = m n h f_g B$$

m : coefficient de forme du nez du pilier (Tableau 1)

n : coefficient d'inclinaison du pilier (Tableau 2)

h : épaisseur de la glace (en m) (0,6 m)

f_g : résistance en compression de la glace

B : largeur du pilier (en m)

b) Force agissant latéralement (figure 6)

$$F_1 = 0,5 h f_g B \operatorname{cosec}(\alpha)$$

α : angle du nez du pilier (figure 5)

4.5 Silt (S)

Force causée par la présence de sédiments déposés au pied amont de la structure. D'après Rankine:

Force: $P_a = 0,5 \gamma' K_O h$ (en kN pour 1 m de largeur)

Moment: P_a à $0,33 h$ du mur amont

h : hauteur du dépôt de sédiment à la face amont de l'ouvrage.

γ' : poids unitaire du sol déposé saturé

K_O = coefficient de poussée au repos

4.6 Séisme (T1,T2)

Les forces sismiques résultent de l'effet de l'accélération de la masse de la structure et de l'eau retenue. Le calcul des forces sismiques est effectué selon une méthode pseudo-dynamique décrite ci-après.

Selon l'importance de l'ouvrage ou de la zone sismique considéré, le concepteur pourra recourir à une méthode dynamique simplifiée (ref. 2) ou à une étude dynamique par éléments finis.

4.6.1 Poussée pseudo-dynamique de la retenue

Par Westergaard (figure 7):

Force = $5,33 h a / g$ (en kN pour 1 m de largeur)

Moment = Force appliquée à $0,4h$ du fond amont

h = profondeur entre le niveau de l'eau et le niveau du fond amont

a: accélération sismique pour la région considérée

4.6.2 Poussée pseudo-dynamique du poids de la structure

De façon simplifiée, la force due au poids propre est multipliée par un facteur d'accélération sismique, tiré du CNB, et est appliquée horizontalement au centre de gravité de l'ouvrage. Le facteur d'accélération verticale est égal au facteur d'accélération horizontal multiplié par 0,6.

Dans ce type d'analyse, on ne considère pas que les accélérations sismiques verticales et horizontales agissent simultanément.

5. Critères de stabilité

5.1 Renversement

$$F_r = MS / MR$$

Condition normale: $F_r \geq 1,2$

Condition extrême: $F_r \geq 1,1$

MS = Σ Moment Stabilisant

MR = Σ Moment Renversant

5.2 Soulèvement

$$F_s = W / U$$

Condition normale: $F_s \geq 1,2$

Condition extrême: $F_s \geq 1,1$

W = Σ Forces verticales sans la sous-pression

U = Forces dues à la sous-pression

5.3 Glissement

$$F_g = c A + (\sum V \cos \alpha + \sum H \sin \alpha) \operatorname{tg} \varnothing$$
$$\frac{\sum H \cos \alpha - \sum V \sin \alpha}{\quad}$$

Condition normale: F_g 3,0

Condition extrême: F_g 1,1

V = Forces verticales

H = Forces horizontales

$\operatorname{tg} \varnothing$ = coefficient de friction interne

c = Cohésion

α = angle de la fondation (voir figure 8)

Lorsqu'il y a des "marches" au niveau de la fondation, l'angle α est celui formé par une droite tracée de la fondation à la face amont jusqu'à la fondation à la face aval de l'ouvrage (voir figure 9)

A = Surface en compression

Dans les cas extrêmes où de la traction existe à

l'amont, la surface en compression doit être réduite proportionnellement:

$$A = l \sigma_{\text{aval}} w / (\sigma_{\text{aval}} + \sigma_{\text{amont}})$$

l = entraxe des piliers ou largeur de la section

w = longueur du pilier

5.4 Vérification de l'état de contraintes

5.4.1 Contraintes admissibles

Contraintes admissible	Cas Normal	Cas Extrême
Compression	$f'_c / 3$	f'_c
Traction	0	f_t

f'_c : résistance en compression du béton

f_t : résistance en traction du béton ($0,10 f'_c$)

Note: En aucun cas les efforts de compression ne doivent dépasser

10 MPa pour les conditions normales d'exploitation, ni

30 MPa pour les conditions extrêmes.

5.4.4.2 Méthode de calcul

Pour les études préliminaires, un calcul simple, basé sur la formule suivante, est utilisé pour calculer les contraintes sur les faces amont et aval de l'ouvrage.

$$\sigma = (-P / A) \pm (6 M / b h^2)$$

$\pm$: + en amont

- en aval

$$P = \Sigma V$$

$$A = l \times b$$

$$M = M_r - M_s$$

M_s : Moment stabilisant au c. de g.

M_r : Moment renversant

h = longueur du coursier

b = largeur du coursier

$s < 0$: compression

6. Cas de chargement

6.1 Stabilité d'ensemble

- Conditions normales

N1: Charges propres, poussée hydrostatique amont (aux vannes, niveau normal) et aval, sous-pressure drainée, poussée thermique de la glace, poussée du silt.

N2: Charges propres, poussée hydrostatique amont (aux vannes, niveau normal) et aval, sous-pressure drainée, poussée dynamique de la glace, poussée du silt.

N3: Charges propres, poussée hydrostatique amont (aux poutrelles, niveau extrême) et aval, sous-pressure drainée, poussée du silt.

- Conditions extrêmes

E1: Le cas N1 avec les drains bouchés.

E2: Le cas N2 avec les drains bouchés.

E3: Le cas N3 avec les drains bouchés

E4: Le cas N3 avec la poussée dynamique de la glace.

E5: Le cas N1 lors d'un séisme horizontal.

E6: Le cas N1 lors d'un séisme vertical.

E7: Le cas N3 lors d'un séisme horizontal.

E8: Le cas N3 lors d'un séisme vertical.



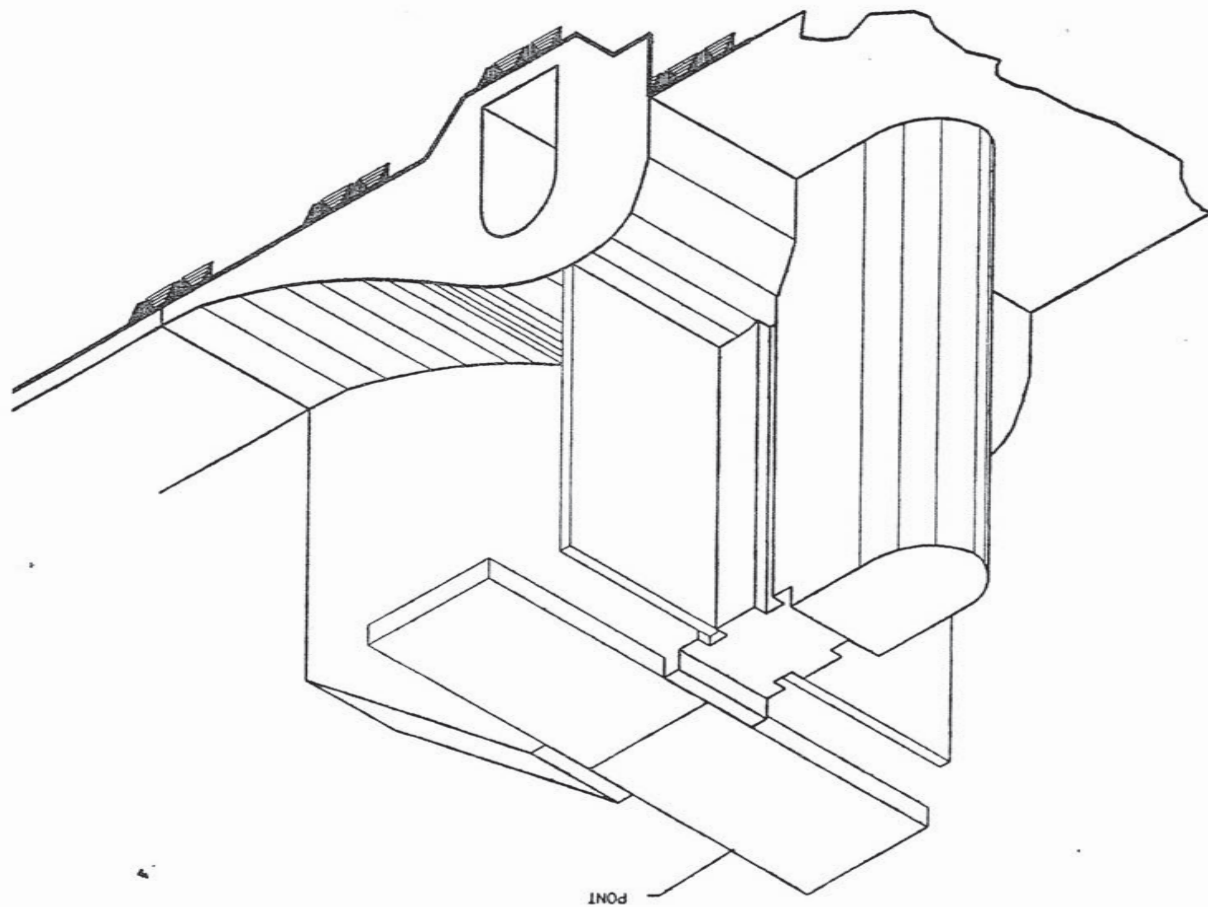
Pour les ouvrages sans galerie de drainage, les cas E1, E2 et E3 deviennent les cas N1, N2 et N3.

D'autres cas de chargement peuvent s'ajouter à ceux-ci, selon les conditions à évaluer.

Références

- 1) SEBJ: Forces d'impact et expansion thermique de la glace sur les ouvrages du complexe La Grande.
- 2) Safety assessment of existing dams for earthquake conditions (CEA No 4206547)

FIGURE 1



LÉGENDE

- P = FORCE DUE A LA MASSE DU BÉTON
- G = POUSSEE DE LA GLACE SELON LA DIRECTION LA PLUS DÉFAVORABLE
- E = FORCE DUE A LA MASSE D'EAU
- E₁, E₂ = PRESSION HYDROSTATIQUE
- U = SOUS PRESSION
- T₁, T₂ = EFFET DU SÉISME
- S = FORCE DUE AU SIGET

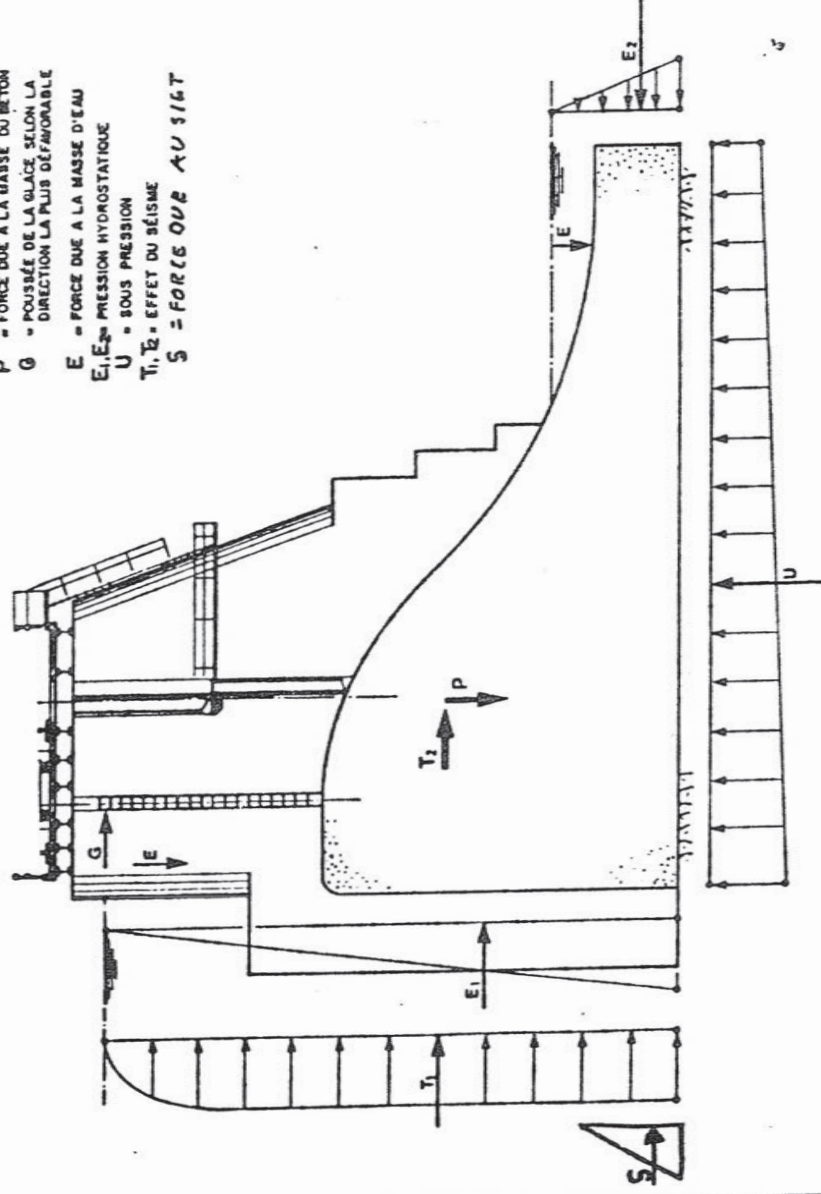
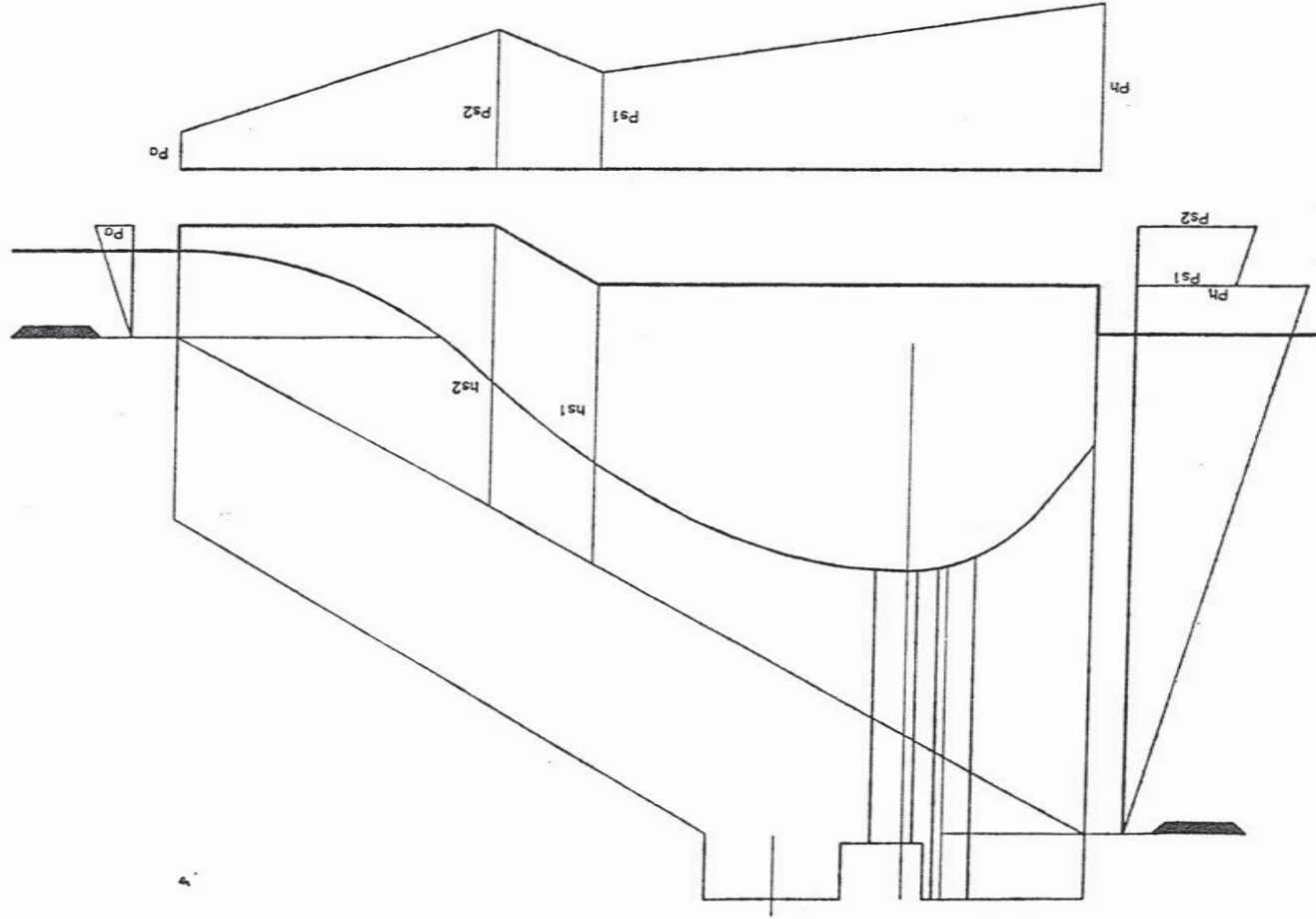


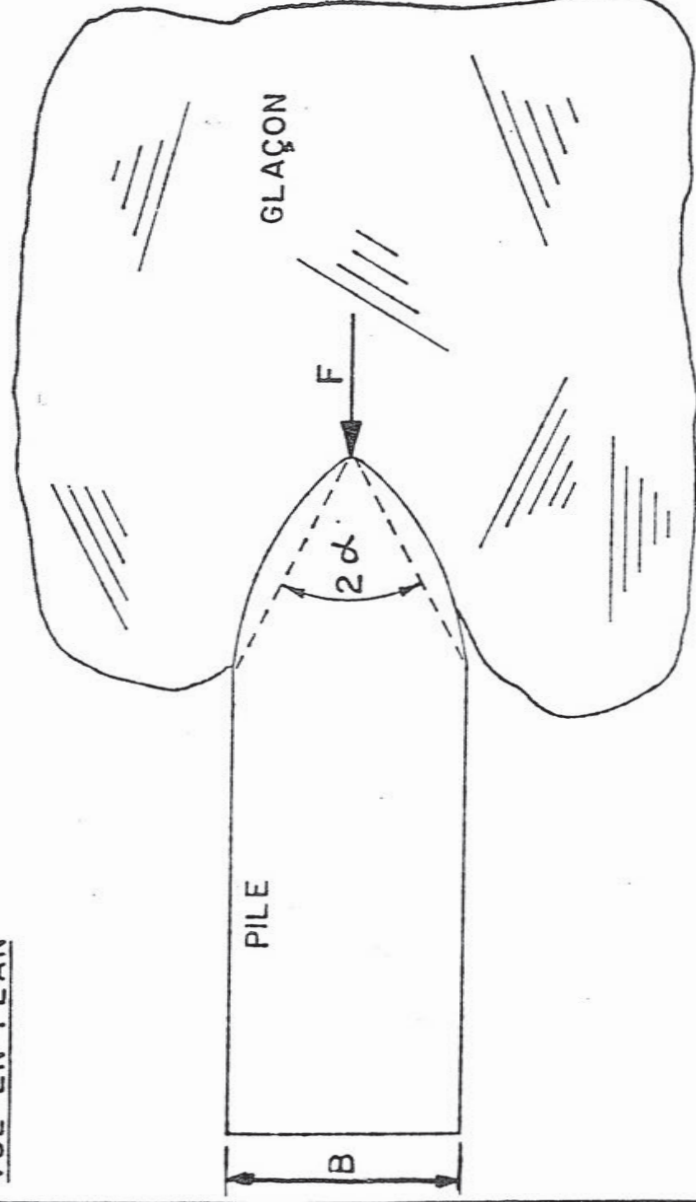
Figure 2
Charges

PRESSION HYDROSTATIQUES ET SOUS-PRESSIONS SANS DRAINAGE

FIGURE 3



VUE EN PLAN



VUE EN ELEVATION

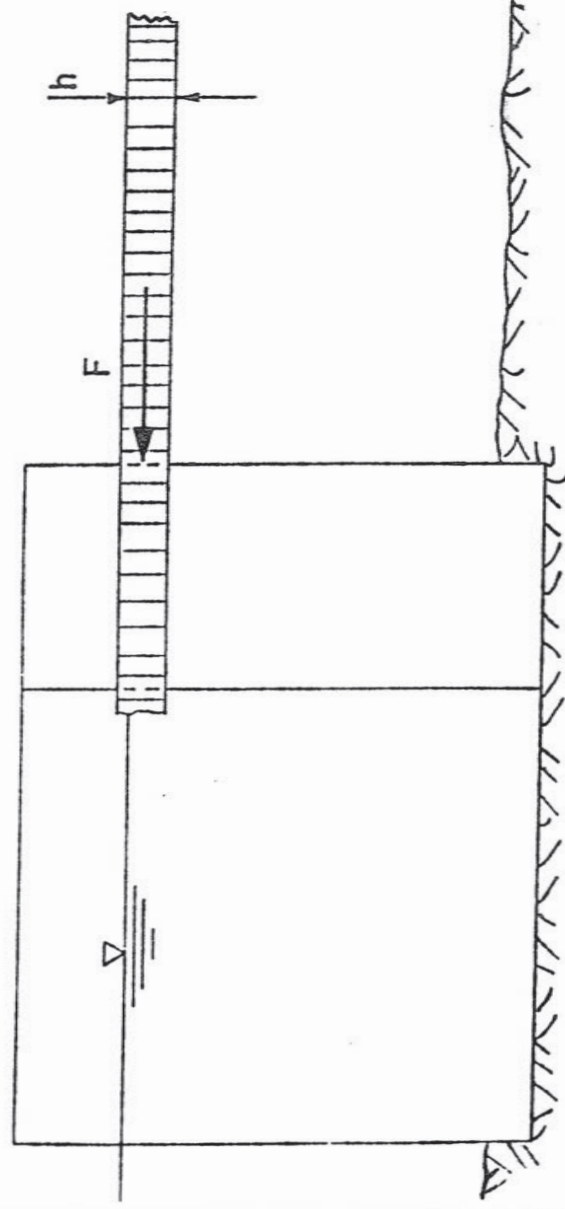


Figure 4

Force d'impact longitudinal de la glace

VUE EN PLAN

GLAÇON PERCUTANT UNE PILE
OU
GLAÇON COINCE OBLIQUEMENT ENTRE DEUX PILES

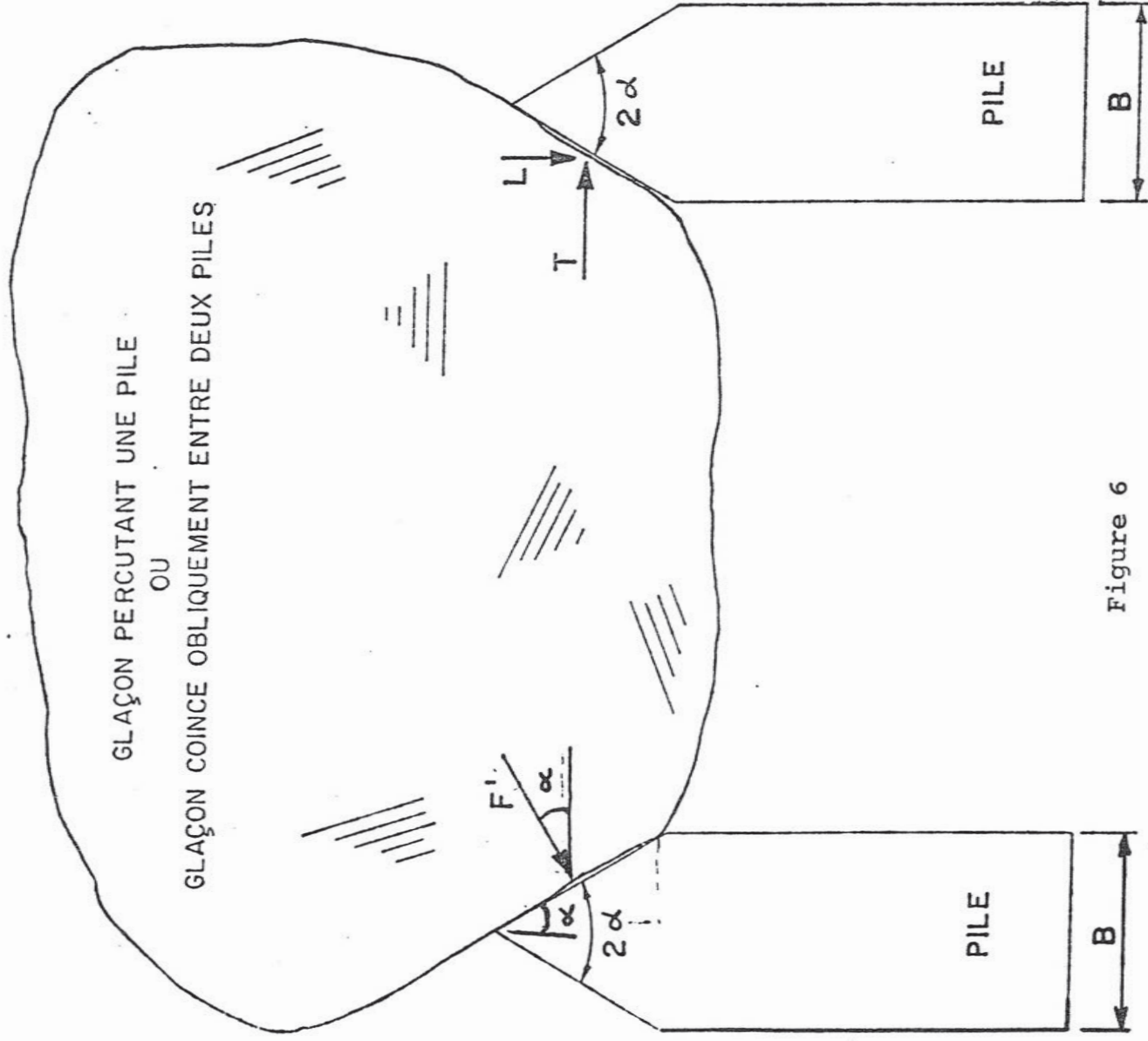
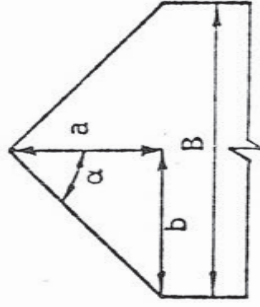


Figure 6

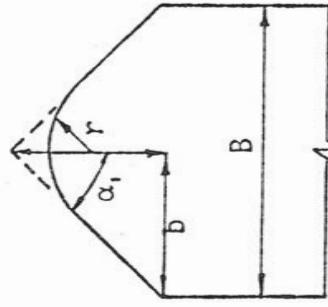
Force d'impact transversal de la glace

- Coefficient de forme (m)



NEZ ANGULAIRE

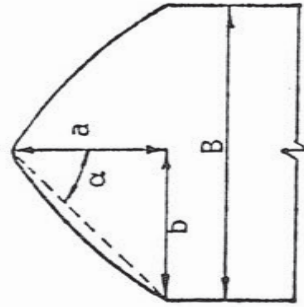
$$\alpha = \text{Arctg} \left(\frac{b}{a} \right)$$



NEZ ANGULAIRE ARRONDI

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{2r}{B} (40 - \alpha_1)$$

où: $r < B/4$



NEZ ELLIPTIQUE

$$\alpha = \text{Arctg} \left(\frac{b}{a} \right)$$

Figure 5
Angle du nez (α)

Demi-Angle α *	15°	30°	45°	60°	90°
Nez angulaire ou angulaire arrondi	0.42	0.59	0.70	0.79	1
Nez elliptique	0.48	0.66	0.79	0.88	1

* voir la figure 5

Tableau 1

Coefficient de forme (m)

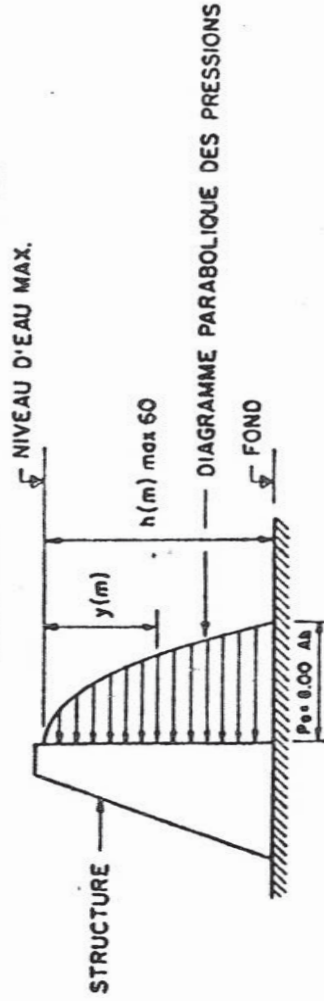
(Nez angulaire, angulaire arrondi ou elliptique)

Demi-Angle α	INCLINAISON β			
	0°	15°	30°	45°
15	1	0.92	0.83	0.77
30	1	0.88	0.76	0.66
45	1	0.85	0.71	0.60
60	1	0.82	0.67	0.55
90	1	0.79	0.63	0.50

Tableau 2

Coefficient d'inclinaison (n)

PRESSION HYDROSTATIQUE AGISSANT SUR UN PLAN VERTICAL PENDANT UN SEISME



$$P = 8,00 A \sqrt{h \cdot y}$$

$$P_0 = 8,00 A h$$

$$Q = 5,33 A h^{1/2} y^{3/2}$$

- Pression en kPa agissant à une profondeur 'y'.
- Pression en kPa agissant sur le fond.
- Force horizontale totale en kN agissant au-dessus de la profondeur 'y' sur une bande verticale d'un mètre de largeur.

$$Q_0 = 5,33 A h^2$$

- Force horizontale totale en kN agissant sur une bande d'un mètre de largeur.

$$M = 2,13 A h^{1/2} y^{3/2}$$

- Moment en kN-m agissant sur le fond par mètre de largeur

$$A = a/g$$

- Accélération maximale de la fondation durant

- un séisme

- Accélération due à la gravité

REMARQUES

Les coefficients 8,00, 5,33 et 2,13 employés dans les équations ci-dessus sont basés sur une période de vibration horizontale d'une seconde. Cette période a été choisie par le 'Bureau of Reclamation' comme étant une valeur moyenne raisonnable basée sur des observations de séismes réels. Les forces calculées ci-dessus doivent être additionnées aux pressions hydrostatiques et aux forces dues à la masse de la structure.

REFERENCES

- "Water Pressures on Dams during Earthquakes" par H.M. Westergaard, Reimpression de "ASCE Proceeding", Nov. 1931, p. 1303.
- Technical Memorandum N° 441 "Stress and Stability Analysis of Straight Gravity Dams" by Richard T. Larsen.

Figure 7

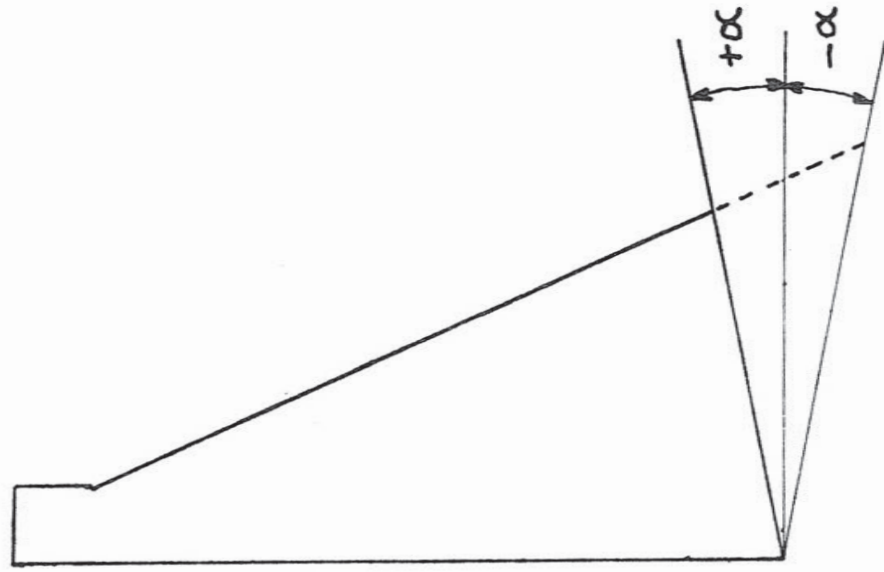


Figure 8

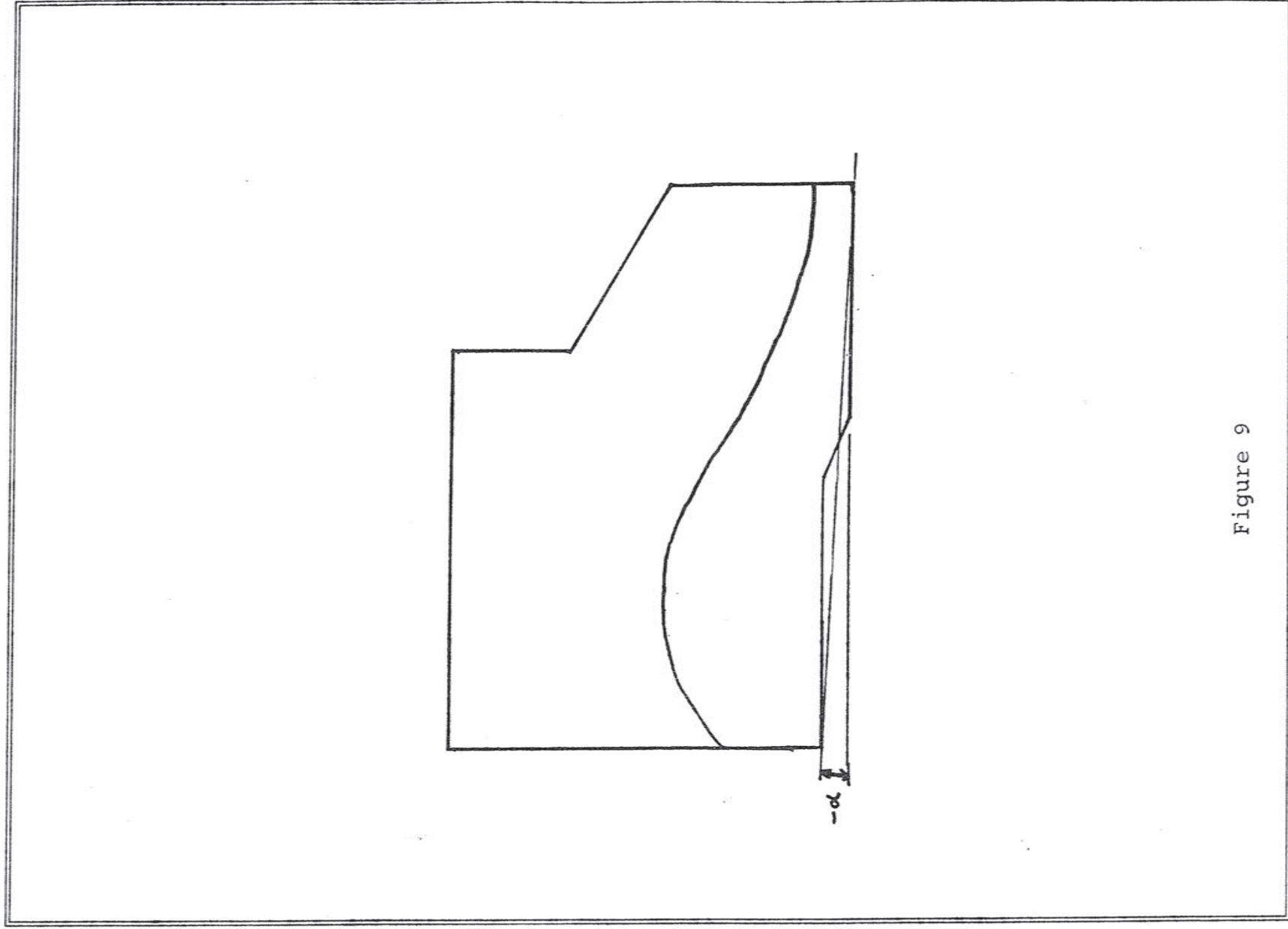


Figure 9

