



# Guide d'utilisation du programme « Voûte »

Décembre 2013



**Centre d'études Techniques de l'équipement de Lyon**

Département Laboratoire de Lyon -Division Ouvrages d'Art  
46, rue Saint Théobald BP 128 – 38081 l'Isle d'Abeau Cédex  
tél : 04 74 27 53 00 / fax : 04 74 27 68 75

Responsable de domaine : Didier GERMAIN

Auteurs de l'étude : Bernard JACQUIER

Vérifié et approuvé par : Didier GERMAIN

# Sommaire

1	Introduction.....	4
2	Généralités.....	4
3	Entrée des données.....	4
3.1	Géométrie.....	4
3.1.1	Généralités.....	4
3.1.2	Coefficient de réduction d'épaisseur de la voûte.....	5
3.1.3	Courbes de définition de l'intrados et de l'extrados.....	5
3.1.4	Nombre de joints.....	5
3.2	Résistance à la compression des maçonneries.....	6
3.3	Chargements.....	6
3.3.1	Généralités.....	6
3.3.2	Actions de type remblais.....	6
3.3.3	Charge sur chaussée.....	6
3.3.4	Pondération des charges.....	7
3.4	Vérification de la géométrie.....	7
3.4.1	Vérification à l'écran.....	7
3.4.2	Vérification sous forme de fichier.....	7
4	Sorties du programme.....	7
5	Analyse des résultats.....	10
5.1	Coefficient de sécurité.....	10
5.2	Glissement sur joints.....	10
5.3	Réaction d'appuis.....	11
5.3.1	Vérification des culées.....	11
5.3.2	Vérification des piles.....	11

# 1 Introduction

Ce document n'est qu'un complément du manuel d'utilisation du programme « Voûte ».

Il précise et complète quelques modalités d'utilisation du programme « Voûte », la façon d'interpréter les résultats et présente quelques problèmes qui peuvent être rencontrés lors de l'utilisation.

## 2 Généralités

Le programme comporte un noyau de calcul et une interface qui génère les fichiers de données utilisés par le noyau de calcul. Les fichiers utilisés par le noyau de calcul sont les fichiers .DON. Les fichiers .DVO sont les fichiers de données de l'interface, qui se créent lors de la saisie des données.

Les fichiers de résultats sont les fichiers .OUT qui sont des fichiers texte.

Pour les lire et imprimer correctement il est préférable d'avoir des éditeurs de texte évolués type PFE32 ou PSPad.

## 3 Entrée des données

### 3.1 Géométrie

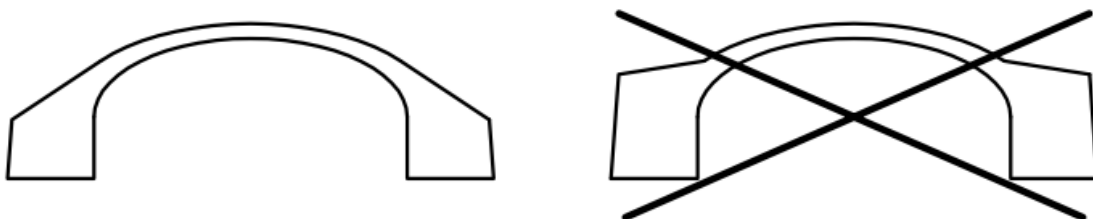
#### 3.1.1 Généralités

Il faut définir dans la géométrie la forme de la coupe longitudinale de la voûte. Pour cela il est préférable de commencer à faire un dessin de cette coupe sur un logiciel de dessin type Autocad, qui permet de mesurer les coordonnées des points utilisées comme données.

Une même géométrie peut être définie de plusieurs façons, car différentes fonctions peuvent être appelées pour définir le même objet.

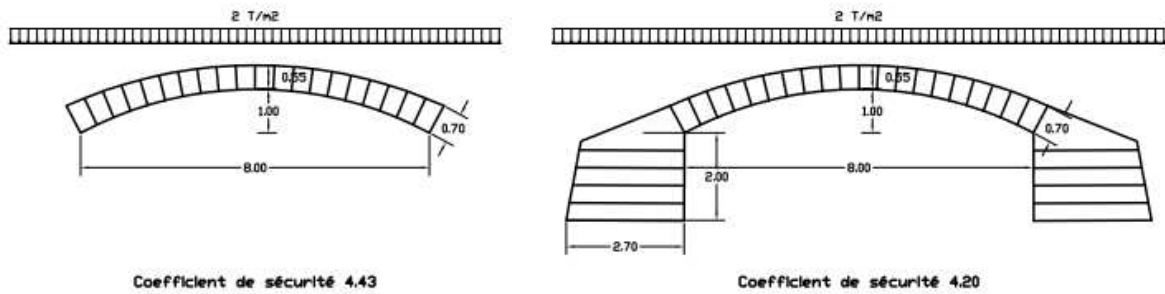
Pour certaines configurations de géométrie, le programme ne fonctionne pas. Il suffit souvent de changer la façon de définir une courbe pour qu'il puisse calculer, par exemple remplacer un cercle à tangente horizontale à la clef par un cercle défini par 3 points.

Comme la courbe d'intrados, la courbe d'extrados de l'ouvrage doit être convexe.



Le coefficient de sécurité d'une voûte, donné par le logiciel, décroît si on calcule une portion de voûte, entre deux points avant les piedsroits, si on calcule la portion de voûte entre les

piédroits et si l'on calcule en intégrant une partie des piédroits (augmentation de la poussée à la clef et de la poussée des terres)



Si le coefficient de sécurité donné en faisant un calcul avec une portion de la voûte est proche de la limite retenue, il faut faire un calcul avec une géométrie intégrant les piédroits.

### 3.1.2 Coefficient de réduction d'épaisseur de la voûte

Le coefficient de réduction d'épaisseur de la voûte est pris égale à 1 si on est sûr de la géométrie de l'intrados et si on est aussi sûr de la géométrie de l'extrados, c'est-à-dire si on a une redondance entre des données permettant de le tracer, par exemple si les épaisseurs à la clef et aux reins sont concordantes entre des valeurs calculées avec les formules de dimensionnement des voûtes et données par des plans ou concordantes avec des valeurs mesurées lors de sondages.

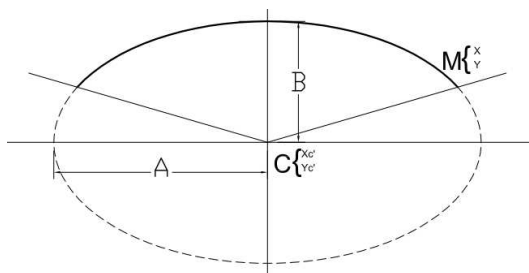
Si la géométrie de l'intrados est connue précisément et que celle de l'extrados est déterminée à partir d'épaisseurs à la clef et aux reins calculées, il est usuel de prendre un coefficient de réduction d'épaisseur de 0,9.

Cette réduction pour la géométrie de calcul s'applique du côté de l'extrados.

Cette fonction ne s'applique pas pour les réductions de section côté intrados. Par exemple si les joints sont dégarnis ou les pierres érodées sur une épaisseur de 5 cm en intrados, il ne faut pas se servir de cette fonction mais utiliser pour la géométrie de l'intrados, une courbe parallèle à 5 cm de la courbe d'intrados relevée.

### 3.1.3 Courbes de définition de l'intrados et de l'extrados

Pour un arc d'ellipse, la valeur de l'ouverture angulaire  $\alpha_f$  est donnée par la formule  $\alpha_f = \arcsin((X-X_c')/A)$



### 3.1.4 Nombre de joints

Pour des ouvertures inférieures à 30 m, une vingtaine de joints par demi voûte est nettement suffisant.

Si l'intrados est défini par plusieurs courbes, le nombre total de joints doit être réparti sur chaque courbe. Cette répartition doit être faite de façon à ce que les longueurs des voussoirs sur chacune des courbes constituant l'intrados soient proches.

Sur les voûtes classiques, pour la définition des joints, le type de section à utiliser est la

section normale. Les joints sont perpendiculaires à l'extrados, ce qui reflète bien en général la disposition des pierres dans la voûte.

Sur une demie-voûte, pour que le dernier joint coté piedroit soit bien perpendiculaire à l'intrados, il faut que l'extrémité rentrée en données de la dernière courbe d'extrados de la demie-voûte se trouve avant ce joint. Cette dernière courbe d'extrados est alors prolongée automatiquement jusqu'à celui-ci.

## 3.2 Résistance à la compression des maçonneries

Pour déterminer la valeur de la résistance de la maçonnerie à rentrer voir le document « Recueil des données nécessaires à l'évaluation de la stabilité d'un pont voûte en maçonneries » mis sur le site de téléchargement du programme <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr/html/logicielsOA/VOUTE/voute.html>

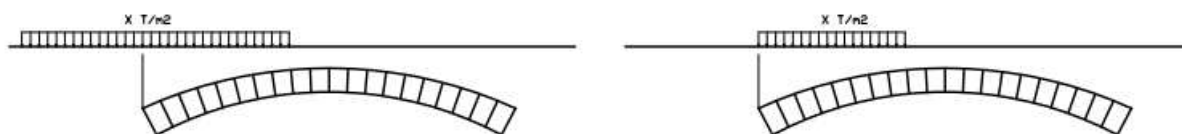
**Le coefficient de sécurité d'une voûte est directement proportionnel à la résistance à la compression des maçonneries.**

## 3.3 Chargements

### 3.3.1 Généralités

Seule la partie des charges comprises entre les deux plans verticaux passant par les extrémités de l'extrados est prise en compte.

Les calculs dans les 2 configurations suivantes donnent les mêmes résultats.



Le déplacement d'une charge peut donc être fait juste en incrémentant les abscisses de début et fin, les parties de charges hors voûte ne sont pas prises en compte.

Si les deux extrémités d'une zone chargée sont totalement hors de la voûte, le calcul ne s'effectue pas et le programme affiche un message d'erreur.

### 3.3.2 Actions de type remblais

Il est usuel de prendre 0,5 ou 1 pour le coefficient de poussée des terres. Cette valeur influe peu sur le coefficient de sécurité de la voûte. Par contre elle influe parfois fortement sur l'inclinaison des résultantes sur les joints et sur les réactions d'appuis. Pour calculer les réactions d'appuis pour la vérification de la stabilité des appuis il est conseillé de faire un calcul en fourchette.

Pour que la charge de remblais soit prise en compte, il faut que  $X_0 < X_f$ .

La cote du remblai  $Z_r$  doit être supérieure à celle de la clef de voûte en extrados.

### 3.3.3 Charge sur chaussée

Le principe de diffusion des charges sur chaussée n'est pas le même pour la vérification de la stabilité de la voûte et pour la vérification de celle des appuis.

Pour vérifier la stabilité de la voûte, on considère que la largeur de l'impact après diffusion est égale à celle de la charge plus 2 fois l'épaisseur de remblais à la clef.

Pour vérifier la stabilité des appuis on considère que les contraintes amenées par la charge sur les appuis est diffusée sur toute la largeur de la voûte.

Si sur une voûte de largeur  $B$  et d'épaisseur de remblais à la clef  $e$ , on a une charge  $P$  uniformément répartie sur une surface de longueur  $L$  dans le sens longitudinal de la voûte et de largeur  $l$  dans le sens transversal, la pression dans la bande de calcul de 1 m de largeur

sur la longueur de diffusion  $L + 2e$  sera de  $P/(L+2e)(I+2e)$  pour la vérification de la voûte et  $P/(L+2e)B$  pour obtenir la réaction d'appui par mètre linéaire à appliquer en tête des appuis, pour les vérifications des appuis et fondations.

### 3.3.4 Pondération des charges

Pour toutes les charges de même type, concentrées ou réparties, la pondération dans les combinaisons est la même. Si l'on veut rentrer des charges de même type qui auraient besoin de pondérations différentes par exemple charge permanente répartie et charge variable répartie, il faut en tenir compte dans la valeur rentrée pour la définition des charges.

Pour la vérification des voûtes, le programme Voûte étant un programme de calcul à la rupture, les coefficients de pondération pour les charges permanentes et surcharges sont les coefficients ELU.

Pour la vérification des fondations, les calculs des efforts amenés par la voûte sur les appuis sont faits à l'ELU et à l'ELS, suivant le type de vérifications à réaliser.

## 3.4 Vérification de la géométrie

La vérification de la géométrie, après l'entrée des données, peut se faire à l'écran ou sous forme de fichier informatique au format DXF.

### 3.4.1 Vérification à l'écran

La vérification à l'écran permet un contrôle rapide, mais approximatif de la géométrie de la voûte prise en compte dans le calcul Voûte. On voit si elle est proche de la géométrie de voûte que l'on veut calculer.

En général on se retrouve avec une fenêtre plein écran qui ne permet plus d'accéder à aucune commande. Pour revenir à une fenêtre normale, il faut cliquer sur Escap à l'écran ou taper sur la touche Echap du clavier puis faire au clavier la combinaison de touches Alt + Entrée.

### 3.4.2 Vérification sous forme de fichier

Lors de la création du fichier de dessin le nom du fichier de dessin qui est demandé doit se terminer par .DXF.

Ce fichier peut être ouvert avec Autocad et d'autres logiciels de dessin mais il n'est pas à une échelle connue permettant de faire des mesures et vérifications.

Si l'on a fait un dessin de la voûte avec Autocad, on peut récupérer le dessin généré par Voûte dans le fichier Autocad et le superposer avec le dessin original pour vérifier si la géométrie de la voûte dessinée à partir des données de l'ouvrage et la géométrie de calcul sont concordantes. Cela peut se faire en utilisant la commande Align, avec l'option mise à l'échelle, en se servant de point homologues des 2 dessins comme les naissances de la voûte ou les extrémités de la partie d'intrados prise en compte si on ne fait pas le calcul sur la voûte entière, pour remettre à la bonne échelle le dessin généré par Voûte.

Ce dessin permet de repérer les joints dont les coordonnées des extrémités sont données dans les sorties de Voûtes pour éventuellement faire d'autres calculs avec des zones de résistance différente dont l'entrée demande les numéros des joints de début et fin ou de vérifier la position des joints les plus sollicités pour expliquer certaines pathologies de la voûte.

## 4 Sorties du programme

Pour chaque cas de charge de calcul, en dernière page du listing de sortie des résultats,

sont indiqués les coefficients de sécurité à la rupture de la voûte et les composantes horizontales et verticales de ces réactions d'appuis et le cas de charge le plus défavorable.

EXEMPLE DE CALCUL D'UNE VOÛTE - - 1 - 21-04-93  
PAGE 52

---

RAPPEL GENERAL DES RESULTATS

---

CHARGE	TITRE	COEFFICIENT	REAC.HORI.DR.	REAC.VERT.DR.	REAC.HORI.GA.	REAC.VERT.GA.
1	BT SYMETRIQUE	.5264D+01	.334D+03	.368D+03		
2	BT DISSYMETRIQUE	.6722D+01	.253D+03	.410D+03	-.253D+03	.299D+03

LE CAS DE CHARGE NUMERO 1 EST LE PLUS DEFAVORABLE  
SON COEFFICIENT DE RUPTURE VAUT : .5264D+01

Des résultats plus détaillés sont à rechercher dans les pages décrivant les lignes optimales traction-compression.

On y trouve :

- Pour chaque joint de calcul :
  - la résultante des efforts arrivant sur le joint, décomposée suivant ses valeurs normale N et tangente T au joint (effort normal et effort tangent),
  - le moment M sur le joint,
  - la tangente de l'angle entre la résultante et la normale au joint (inclinaison)
  - le rapport e entre la distance à l'axe du joint au point d'application de la résultante sur la demie largeur h du joint (excentricité),
  - le taux de compression, rapport entre la contrainte maximum sur le joint et la contrainte limite admise par les maçonneries, c'est-à-dire l'inverse du coefficient de sécurité,
  - la contrainte maximum admissible par les maçonneries  $\sigma_{0i}$  (limite).
- Le numéro du joint le plus défavorable pour le glissement avec la valeur de la tangente de l'angle entre la résultante et la normale au joint (inclinaison).
- Le numéro du joint le plus défavorable pour la compression avec le rapport (taux) entre la contrainte maximum sur le joint et la contrainte limite admise par les maçonneries, c'est-à-dire l'inverse du coefficient de sécurité.
- Les valeurs des réactions d'appui avec les coordonnées de leurs points d'application par rapport à l'origine utilisée pour la construction géométrique de la voûte et leurs inclinaisons en degré par rapport à une verticale descendante. L'angle est compté positif dans le sens trigonométrique.

LIGNE OPTIMALE TRACTION-COMPRESSION

JOINT	EFFORT NORMAL	EFFORT TANGENT	MOMENT	INCLINAISON	EXCENTRICITE	TAUX	LIMITE
0	.353D+03	.000D+00	-.509D+01	.000D+00	-.722D-01	.190D+00	.500D+04
1	.353D+03	-.258D-02	-.509D+01	-.731D-05	-.722D-01	.190D+00	.500D+04
2	.354D+03	-.334D+01	-.378D+01	-.945D-02	-.526D-01	.184D+00	.500D+04
3	.357D+03	-.663D+01	.151D+00	-.186D-01	.199D-02	.169D+00	.500D+04
4	.364D+03	-.981D+01	.672D+01	-.270D-01	.815D-01	.175D+00	.500D+04
5	.372D+03	-.128D+02	.159D+02	-.344D-01	.173D+00	.182D+00	.500D+04
6	.381D+03	-.894D+01	.282D+02	-.234D-01	.269D+00	.190D+00	.500D+04
7	.387D+03	.634D+01	.405D+02	.164D-01	.339D+00	.190D+00	.500D+04
8	.393D+03	.211D+02	.509D+02	.536D-01	.372D+00	.179D+00	.500D+04
9	.400D+03	.351D+02	.596D+02	.878D-01	.376D+00	.162D+00	.500D+04
10	.408D+03	.484D+02	.667D+02	.119D+00	.363D+00	.142D+00	.500D+04
11	.417D+03	.610D+02	.724D+02	.146D+00	.338D+00	.123D+00	.500D+04
12	.429D+03	.728D+02	.768D+02	.170D+00	.306D+00	.106D+00	.500D+04
13	.444D+03	.840D+02	.798D+02	.189D+00	.271D+00	.918D-01	.500D+04
14	.463D+03	.948D+02	.816D+02	.205D+00	.235D+00	.804D-01	.500D+04
15	.486D+03	.106D+03	.820D+02	.217D+00	.199D+00	.713D-01	.500D+04

GLISSEMENT 15 .217D+00  
COMPRESSION 7 .190D+00

REACTION D'APPUI  
MODULE .497D+03 POINT D'APPLICATION .362D+01 .229D+01 INCLINAISON .423D+02

JOINTS FAIBLES =====> 7 I 0 E 15 I

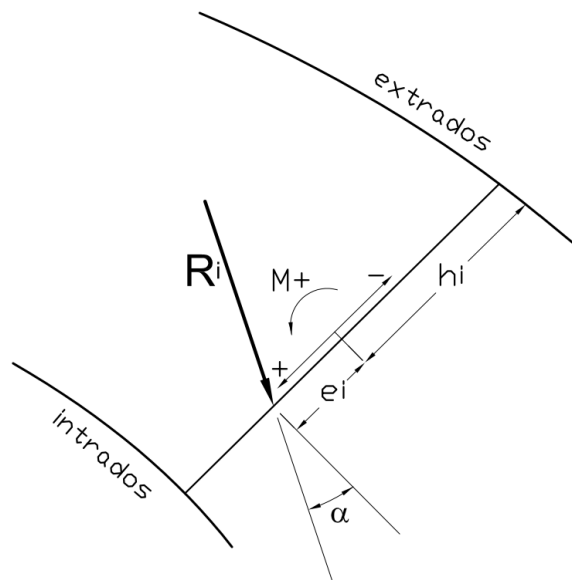
### Conventions de signe pour les sorties

L'effort tranchant T est positif lorsqu'il est dirigé vers l'extrados.

L'inclinaison est positive quand la résultante est dirigée vers l'extrados.

L'excentricité est positive quand le point d'application de la résultante est du côté de l'intrados par rapport au milieu du joint.

Le moment est positif dans le sens trigonométrique.



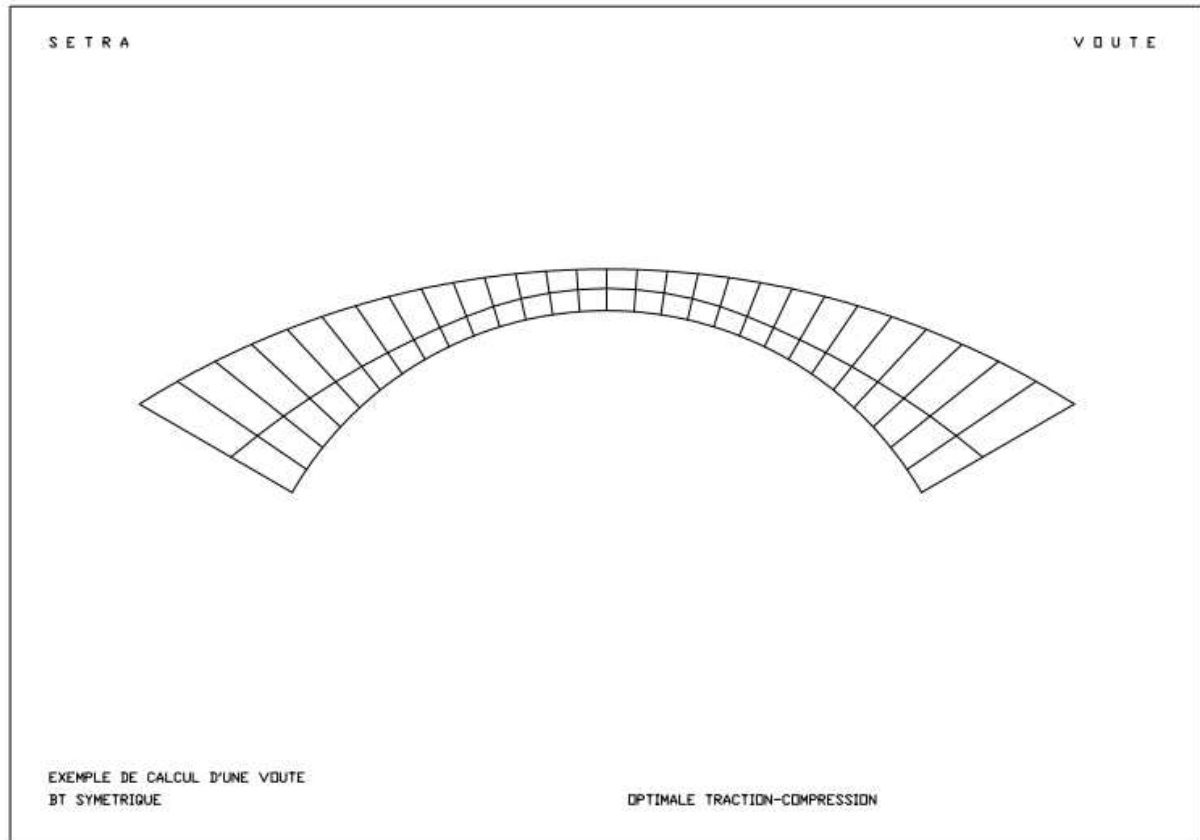
Sur le joint i on a :

$$\text{Excentricité} = e_i/h_i = M_i/N_i \cdot h_i$$

$$\text{Inclinaison} = \text{tga} = T_i/N_i$$

$$\text{Taux} = \sigma_i/\sigma_{0i}$$

Il est possible d'avoir les sorties des courbes de pression à l'écran ou sous forme de fichier informatique au format DXF récupérable sur Autocad. Les dessins obtenus peuvent être mis à la bonne échelle par les mêmes opérations que pour les dessins de vérification de la géométrie de calcul de l'ouvrage.



## 5 Analyse des résultats

### 5.1 Coefficient de sécurité

Il est usuel de considérer qu'avec un coefficient de sécurité supérieur à 3, une voûte est stable pour un chargement considéré. Mais cette valeur est à moduler.

Pour une voûte en bon état, pour une charge très exceptionnelle, un coefficient de sécurité de 2,5 peut être admissible.

Par contre si pour des charges passant couramment sur l'ouvrage (itinéraire de convois exceptionnels), on a un coefficient proche de 3, il faut vérifier si l'on a des décompressions de maçonneries dans l'épaisseur de la voûte (excentricité supérieure à 0,3). Si ces décompressions sont trop répétées, elles endommagent rapidement les joints dans les zones concernées, en particulier si le mortier de ces joints est de mauvaise qualité.

### 5.2 Glissement sur joints

L'inclinaison indiquée dans les listings de sorties est, sur un joint de calcul, la tangente de

l'angle de la résultante avec la normale au joint.

On considère que pour éviter un glissement d'un voussoir sur un autre, il faut que cette tangente soit inférieure à  $0,5 = \tan 27^\circ$  angle de frottement de Coulomb pierre sur pierre. Cette hypothèse est conservatrice. En effet il n'existe pas dans une voûte de joint plan la traversant où l'on a un glissement de pierre sur pierre, mais tous les joints théoriques sont en général traversés par des pierres qui devraient être rompues par cisaillement pour qu'il y ait un glissement dans le plan du joint, en particulier sur les joints de grande largeur vers les naissances ou dans les culées.

La valeur de l'inclinaison sur un même joint varie fortement en fonction du coefficient de poussée des terres pris pour les remblais entourant l'ouvrage.

Si la valeur réelle du coefficient de poussée des terres n'est pas connue, il est conseillé de faire les calculs avec un coefficient de poussée des terres de 0,5, en général défavorable. Avec cette valeur, pour les ouvrages en arc entre les naissances, pour les ouvrages avec voûte en plein cintre, en ellipse ou anse de panier dans la partie comprise entre les reins de la voûte, il faut que l'inclinaison soit inférieure à 0,5.

En dessous des reins de la voûte, où elle est plutôt en butée contre les remblais, si l'inclinaison dépasse 0,5 avec le coefficient pris en compte, la vérification peut être reprise avec un coefficient de poussée des terres de 1 qui caractérise mieux les phénomènes de mise en butée qui se situent dans ces zones.

## 5.3 Réactions d'appui

Les réactions d'appui données dans les sorties permettent de vérifier la stabilité des appuis. Comme il a été dit précédemment, le calcul des réactions d'appuis d'une voûte pour la vérification des appuis la supportant doit être fait en considérant les charges de chaussée réparties sur la totalité de la largeur de l'ouvrage pour tenir compte de la diffusion des efforts dans la maçonnerie de la voûte.

### 5.3.1 Vérification des culées

Les culées, particulièrement quand on a un ouvrage ne comportant qu'une seule travée, peuvent être intégrées dans la géométrie de la voûte. Dans ce cas-là, on a directement les efforts au niveau de la fondation pour vérification de la stabilité de l'appui.

Cette méthode ne permet pas de prendre en compte les effets de l'eau (déjaugage, pressions) pour les culées en bord de rivière. Pour celles-ci, il ne faut modéliser que la partie supérieure de l'ouvrage qui n'est pas soumise aux effets de l'eau et faire un calcul classique de culée d'ouvrage en appliquant les réactions d'appui issues du modèle, sur la partie non modélisée de l'ouvrage.

Les déplacements étant faibles, on n'a pas de vraie mise en butée contre les terres à l'arrière. Il est donc conseillé de prendre un coefficient de réaction des terres de 1 sur la face arrière de la culée (valeur recommandée dans le dossier « Mur 73 »).

Le cas de charge le plus défavorable est la charge maximum centrée sur la travée adjacente.

### 5.3.2 Vérification des piles

Les réactions d'appui en tête d'une pile permettent de vérifier la stabilité de celle-ci.

Le cas de charge le plus défavorable est une des travées adjacente avec sa charge maximum et l'autre travée non chargée.

En plus de la vérification de la fondation, il faut vérifier que seuls des cas de charge rares amènent des décompressions dans les maçonneries et que les contraintes maximum admissibles n'y sont pas dépassées.