Ministère de l'Equipement,
des Transports et du Tourisme

VOUTE

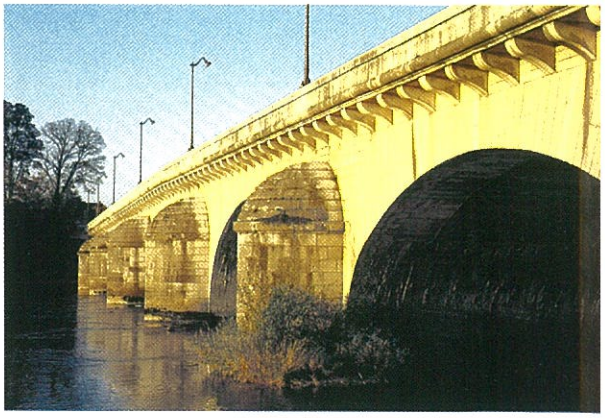
Version 1.0 - Septembre 1993







Calcul à rupture des voutes en maçonnerie



DIRECTION DES ROUTES

Service d'Etudes Techniques
des Routes et Autoroutes

SETRA

MANUEL DE REFERENCE

Version 1.0 – Septembre 1993

TABLE DES MATIERES

1 - Présentation 7

2 - Installation

Configuration nécessaire 9
Contenu du coffret 10
Première installation 10
Lancement du programme 12

3 - Méthode de calcul

Historique 13
Principe du calcul à rupture 14
Calcul détaillé 17

4 - Fonctionnement général

Particularités de la version pour micro-ordinateur 29
Organisation du programme 30
Arborescence des menus 31
Interface utilisateur 32

5 - Gestion du programme 35
Configuration 36
Accès DOS 41

6 - Fichiers 43
Nouveau 43
Ouvrir 44
Dupliquer 44
Archiver 45

7 - Données 47
Données générales 49
Géométrie 49
Résistance 62
Actions unitaires 64
Combinaisons d'actions 70

8 - Calculs 73
Test de données 73
Vérification de la géométrie 74
Calcul de stabilité 74

9 - Résultats 77
Résumé de la note de calcul 77
Visualisation des résultats 77
Impression des résultats 78
Tracé des lignes de pression 78

10 - Compléments 80
V_CALC.BAT 80
PILOTE.EXE 80
VISU. COM 81

ANNEXES 83
Annexe 1 - Messages d'erreur 85
Annexe 2 - Influence des données 89
Annexe 3 - Liste des fichiers 91
Annexe 4 - Questions -Réponses 95
Annexe 5 - Bibliographie 105

PRESENTATION

Le logiciel VOUTE permet le calcul des voûtes en maçonnerie (ou en béton non armé) selon la théorie du calcul à la rupture. Le principe du calcul est décrit dans le document "Les ponts en maçonnerie, constitution et stabilité" publié en 1982 par le SETRA. Le chapitre 3 du manuel présente de façon synthétique la méthode de calcul. Le noyau de calcul de VOUTE résulte d'un portage sur micro ordinateur du programme VOUTE décrit dans le document cité ci-dessus. Ce dernier constitue le manuel de référence général auquel l'utilisateur devra se reporter pour la description détaillée de la méthode de calcul.

VOUTE étudie la stabilité globale d'une tranche de voûte de largeur unitaire sous l'effet de la combinaison de plusieurs charges unitaires (poids de la voûte, remblai, ...), compte tenu de la résistance à la compression de la maçonnerie qui peut être variable dans l'épaisseur de la voûte pour simuler, par exemple, l'effet d'une contre-voûte de renfort. La voûte peut être instable en traction ; dans ce cas le coefficient de rupture est nul. Sinon le programme calcule le coefficient de rupture correspondant à la ligne optimale en compression. Un coefficient de rupture de 3 sous pondération maximale est déclaré admissible.

Le présent manuel comprend quatre parties :

- le chapitre 2 concerne la procédure d'installation,
- le chapitre 3 décrit la méthode de calcul,
- les chapitres suivants servent de guide d'utilisation du programme,
- les annexes à ce manuel apportent également des réponses à un certain nombre de questions telles que le domaine d'emploi, la précision des données.

Le manuel "EXEMPLE D'UTILISATION" présente une étude de cas et détaille le listing obtenu après calcul.

INSTALLATION

Configuration nécéssaire

VOUTE fonctionne sur micro ordinateur PC AT ou PS/2 comportant au minimum les caractéristiques suivantes :

- système d'exploitation DOS version 3.00 ou ultérieure,
- 430 ko de mémoire centrale disponible compte tenu des programmes résidents déjà en mémoire,
- espace disque disponible de l'ordre de 2 Mo compte tenu de la taille des fichiers transférés sur disque (environ 540 Ko) et de la taille des fichiers générés par l'utilisation du programme,
- écran texte de 80 caractères de large.

Les éléments suivants sont en outre conseillés :

- coprocesseur arithmétique,
- carte graphique CGA, EGA, VGA, HERCULES avec écran couleur,
- imprimante standard capable d'utiliser un mode compressé (132 caractères par ligne),
- souris compatible Microsoft,
- traceur BENSON, CALCOMP ou HP, imprimante POSTSCRIPT, imprimante PRESCRIBE (de type KYOCERA), HP LaserJet série II ou série III,
- logiciel de DAO capable de lire le format DXF (notamment AUTOCAD).

Le fonctionnement de VOUTE exige en outre une configuration logicielle minimale. Le fichier CONFIG.SYS utilisé lors du démarrage de l'ordinateur doit au minimum contenir les instructions suivantes :

```
FILES  = 20
BUFFER = 20
DEVICE = ANSI.SYS
```

Contenu du coffret

Le coffret VOUTE contient :

- une disquette au format 5 pouces 1/4 1,2 Mo ou une disquette au format 3 pouces 1/2 1,44 Mo,
- un manuel de référence,
- un manuel d'exemple d'utilisation,
- une carte d'enregistrement à remplir et à renvoyer au SETRA. Le retour de cette carte permet d'être enregistré en tant qu'utilisateur du logiciel et donc de bénéficier de l'assistance au produit et de recevoir les mises à jour pour correction d'erreur.

Première installation

VOUTE est prévu pour fonctionner à partir d'un disque dur. Pour installer VOUTE, il convient de spécifier le lecteur de disquette comme étant le lecteur courant (par la commande A: + <Return> ou B: + <Return>) puis de lancer la procédure INSTALLE se trouvant sur la disquette par INSTALLE + <Return>. La seule donnée à fournir au programme d'installation est le nom du répertoire dans lequel l'utilisateur souhaite installer le programme.

INSTALLE vérifie notamment que le répertoire d'installation est réellement accessible. S'il n'existe pas, il est créé. Cependant, le programme ne peut pas créer les répertoires intermédiaires ; par exemple, si le répertoire d'installation doit être D:\OA\VOUTE, il est nécessaire que le répertoire D:\OA existe. En cas d'erreur, la procédure d'installation est interrompue.

Il appartient, le cas échéant, à l'utilisateur de modifier le fichier AUTOEXEC.BAT de manière à ce que VOUTE puisse être appelé de n'importe quel répertoire.

Lancement du programme

Si l'installation s'est correctement déroulée, le lancement de VOUTE s'effectue par la commande VOUTE. Pour lancer le programme depuis un autre répertoire que le répertoire d'installation, il est nécessaire de déclarer au préalable ce répertoire dans la variable PATH du DOS (voir page 10).

METHODE DE CALCUL

La théorie du calcul à rupture des voûtes sur laquelle repose VOUTE est décrite dans le document intitulé "Les ponts en maçonnerie, constitution et stabilité" (SETRA 1982). Ce document, et notamment son fascicule "Evaluation de la stabilité" présente de façon très détaillée la méthode de calcul ; le présent chapitre constitue une synthèse de ce fascicule.

Historique

Les ponts en maçonnerie font l'objet de calculs de stabilité depuis le XVIII^{ème} siècle. Auparavant, les voûtes n'étaient dimensionnées que par référence aux ponts déjà construits. Même plus tard, de nombreux ouvrages ont été construits sans réel dimensionnement par le calcul.

Sans citer toutes les théories qui ont été élaborées, on retient de l'ensemble des méthodes proposées, deux écoles :

Calcul statique par blocs dont le mode de raisonnement relève du calcul à rupture et où on retrouve les noms de COULOMB, MERY et qui a été repris d'une façon plus rigoureuse par J. SALENCON et appliqué au calcul des voûtes à J. M. DELBECQ.

Calcul prenant en compte la déformabilité des matériaux dont l'initiateur est évidemment NAVIER et qui, dans ses formes les plus évoluées, fait appel à des méthodes de calcul aux éléments finis.

Dans l'histoire du calcul des voûtes, MERY a une place tout à fait particulière. Dans son mémoire publié en 1840, il définit les bases du calcul en partant de l'hypothèse d'une rupture par

rotation de blocs et caractérise les lignes de poussées extrémales. MERY ajoute que, la maçonnerie n'ayant pas une résistance infinie, la courbe de pression ne doit pas trop s'approcher de l'extrados et de l'intrados de la voûte.

Par la suite, la formulation de MERY a été, sous l'influence des théories sur l'élasticité, déformée en faisant l'hypothèse d'un passage de la courbe de pression à l'intérieur du tiers central de chaque section de la voûte.

L'épure de MERY, qui est la traduction graphique de sa méthode, a servi au dimensionnement de très nombreux ouvrages.

La méthode de calcul utilisé par VOUTE et établie par J. M. DELBECQ s'inscrit en droite ligne de la méthode de MERY.

Principe du calcul à rupture

Le problème posé est de déterminer si une voûte de géométrie donnée, encastrée à ses extrémités, constituée d'un matériau dont on connaît le critère de résistance, et qui est soumise à un chargement extérieur, est stable.

Le calcul à rupture permet en réalité de répondre à la question inverse : on démontre que si le chargement est à l'extérieur d'un domaine dit "domaine des chargements potentiellement supportables", la voûte est certainement instable. Par contre, si le chargement est à l'intérieur de ce domaine, il est impossible d'en déduire que la voûte est stable.

Dans le cas des voûtes, le critère de résistance admis pour la maçonnerie comprend trois composantes :

- Absence de résistance à la traction : cette résistance correspond au minimum de la résistance à la traction

des pierres, du mortier de hourdage et de l'interface pierre-mortier, soit une valeur très aléatoire et de toute façon très faible.

- Résistance finie σ_0 à la compression simple : la valeur à introduire dans les calculs est celle du matériau composite pierre+mortier et non la résistance des seules pierres.
- Critère d'interface pierre-mortier de type frottement sec de COULOMB : l'angle de frottement est de l'ordre de 27° (soit une tangente de 0,5) et la cohésion est considérée comme nulle. En réalité, ce critère n'est pas pris en compte dans les calculs, son influence étant, dans le cas général, négligeable.

La voûte est stable sous un chargement donné si, en tout point, il y a compatibilité entre les équations d'équilibre et le critère de résistance.

On en déduit que, si on découpe la voûte en blocs par des sections de direction quelconque, chaque bloc est en équilibre et sur chaque "joint" entre blocs, il existe une répartition de contrainte respectant le critère de résistance. La notion de joint possède ici une signification purement géométrique : il s'agit de la surface plane à la frontière entre deux blocs.

Par "intégration" des contraintes sur les joints, ces contraintes représentent un torseur (M, N, V) par rapport au repère local attaché au milieu I de chaque joint.

On montre alors que, si la voûte est stable, le point (M, N, V) se trouve nécessairement à l'intérieur d'un domaine convexe qui, en négligeant l'effet de V, s'écrit :

$$|M| \leq N h (1 - N/\sigma_0 S)$$

où h est la demi hauteur du joint et S sa section. Cela impose d'une part que l'effort normal N soit positif et d'autre part que le point de passage dans le joint de la résultante des efforts soit situé à l'intérieur du joint.
En joignant les centres de pression sur chaque joint, on obtient une ligne brisée dite ligne des centres de pression. L'étude des caractéristiques de ces lignes constitue l'outil privilégié de l'examen des conditions de stabilité des voûtes. Parmi l'ensemble des lignes de pression possibles, il existe des lignes correspondant à une stabilité "potentielle" si :

- sur chaque joint, le torseur (M, N, V) correspondant à la répartition des contraintes est à l'intérieur du domaine convexe de résistance défini ci-dessus,
- l'équilibre global de chaque bloc est assuré, c'est-à-dire que la somme des efforts qui lui sont appliqués, soit en tant qu'efforts externes, soit en tant que réactions par les blocs adjacents, est nulle.

S'il n'existe aucune ligne de ce type, la voûte est certainement instable. Dans le cas contraire, la stabilité n'est que potentielle :

- parce qu'on étudie seulement la stabilité globale d'un certain nombre de blocs donc avec un découpage à priori,
- parce que les conditions sur (M, N, V) obtenues par intégration ne permettent pas d'affirmer que le critère de résistance est respecté en chaque point du joint.

D'une façon générale, on définit un coefficient de rupture qui est le rapport entre le chargement extrême obtenu par une homothétie sur l'ensemble des charges et pour lequel la voûte devient certainement instable et le chargement réel :

$$F = \frac{Q\ extrême}{Q\ réel}$$

F < 1 : la voûte est certainement instable
F > 1 : la voûte est potentiellement stable

Calcul détaillé

Données du problème

Géométrie

La voûte est définie par un extrados et un intrados. L'intrados est concave.

La voûte est limitée à droite et à gauche par deux sections d'encastrement ; ceci exclut donc le cas des voûtes articulées.

Dans le sens transversal, la voûte est rectangulaire. Le programme VOUTE considère une largeur unitaire de voûte.

La voûte est découpée en voussoirs par des joints interceptant l'intrados et l'extrados de la voûte. Les joints sont en général normaux à l'intrados. Le joint de clé est vertical.

Bien que la terminologie soit la même, il n'y a pas nécessairement équivalence entre les joints définis ci-dessus qui correspondent à un découpage géométrique de la voûte en blocs et

les joints du matériau maçonnerie. Les joints de calcul sont généralement moins nombreux que les joints réels dans le matériau. De plus, le corps de voûte n'a évidemment pas le même découpage en voussoirs que le bandeau extérieur.

Résistance

La voûte est constituée d'un matériau de résistance homogène à la compression simple sur la hauteur des joints. Pour la suite de ce chapitre on admet, pour simplifier l'écriture, que la résistance à la compression est la même sur l'ensemble des joints. VOUTE autorise cependant une résistance définie sur chacun des joints (Cf chapitre 7).

Chargement

La voûte est soumise à son poids et à des charges réparties ou concentrées, définies par leur densité et appliquées sur l'extrados de la voûte. Les chargements tels que déplacements d'appui, température, sont exclus de l'analyse.

Afin d'aboutir à un algorithme de résolution simple, le programme apporte les limitations suivantes pour les chargements :

- Les forces verticales sont orientées vers le bas (elles sont négatives).
- Les forces horizontales sont orientées vers la clé (elles sont positives à gauche de la section, négatives à droite de cette section).

Ceci exclut le cas des forces horizontales concentrées à la clé et celui des forces de freinage.

Propriété des lignes de pression

La voûte étant bi-encastrée, la structure est 3 fois hyperstatique et chaque ligne de pression est définie par 3 paramètres quelconques. On retient les 3 paramètres suivants pour caractériser ces lignes :

- la poussée horizontale H à la clé (effort normal)
- la poussée verticale V à la clé (effort tranchant)
- la cote z du point de passage de la ligne de pression à la clé.

Si le problème est symétrique, la structure n'est que deux fois hyperstatique et les lignes de pression peuvent être caractérisées par H et z uniquement.

Cas symétrique - stabilité en traction

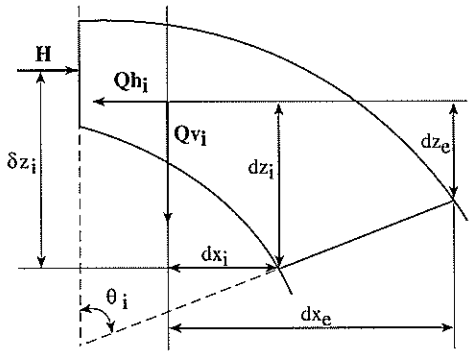
Pour une cote z donnée, la stabilité du bloc compris entre la section de clé et le joint Si d'indice i impose que H soit compris entre deux valeurs extrêmes Hmin (i,z) et Hmax (i,z).

Soit O_i l'angle du joint S_i par rapport à la verticale. La résultante des efforts extérieurs (poids, remblai, ...) appliqués sur le bloc compris entre S_i et le joint de clé vaut Qh_i (effort horizontal dirigé vers la clé) et Qv_i (effort vertical vers le bas).

Pour que la ligne définie par (z, H) à la clé soit compressive sur S_i, il est nécessaire que la résultante des efforts sur S_i soit une compression, soit :

$$Hmin1 \leq H$$
$$Hmin1 = Qh_i - Qv_i \times tg(\theta_i)$$

Pour que la ligne de pression soit interne à la voûte, il faut que la résultante des efforts sur le joint S_i passe entre la ligne d'intrados et la ligne d'extrados.



Résultante au niveau de l'intrados

$$Hmin2 \leq H$$

$$Hmin2 = (Qv_i \times dx_i + Qh_i \times dz_i) / \delta z_i$$

Résultante au niveau de l'extrados

$$H \leq Hmax$$

$$Hmax = (Qv_i \times dx_e + Qh_i \times dz_e) / (\delta z_i - 2\, h_i \times \cos(\theta_i))$$

Soit

$$Hmin = \max (Hmin_1, Hmin_2)$$

Pour les lignes de pression passant à la cote z à la clé, la fourchette de valeurs admissibles pour H est :

$$Hmin \leq H \leq Hmax$$

Si Hmin est plus grand que Hmax, alors il n'existe aucune ligne de pression passant à la cote z à la clé et qui soit à la fois compressive et interne à la voûte sur le joint S_i.

Les deux valeurs extrêmes Hmin et Hmax sont des fonctions de la cote z et de la position du joint S_i.
Si H est en dehors de cet intervalle, le point de passage de la résultante des efforts sur le joint S_i passe hors de la voûte ou la résultante des efforts sur le joint n'est pas une compression. La maçonnerie ne résistant pas en traction, il y a rupture en traction de la voûte.

Pour la section de clé elle-même, la résistance en traction impose que z soit compris entre la cote z_i d'intrados et la cote z_e d'extrados et que la poussée H soit positive.

Soit Hmin(z) et Hmax(z) les enveloppes de Hmin(i, z) et Hmax (i, z) pour l'ensemble des joints

$$Hmin(z) = \max_i (Hmin(i,z))$$
$$Hmax(z) = \min_i (Hmax(i,z))$$

Pour que la condition de stabilité en traction soit respectée sur l'ensemble des joints, il faut respecter que :

$$Hmin(z) \leq H \leq Hmax(z)$$

Pour une cote z fixée ($z_i \leq z \leq z_e$) il est possible que

$$Hmax(z) < Hmin(z)$$

Dans ce cas, il n'existe aucune ligne de pression passant par la cote z et répondant au critère de traction sur l'ensemble des joints.

Soit T le domaine du plan (H,z) tel que :

$$z_i \leq z \leq z_e$$

et

$$Hmin(z) \leq Hmax(z)$$

Si T est vide, la voûte est nécessairement instable en traction. Dans le cas contraire, il existe au moins une ligne de pression interne à la voûte et partout compressive (vérification faite uniquement sur la famille de joints S_i).

S'il est non vide, on démontre que T est un domaine convexe. Il constitue le domaine de stabilité potentielle de voûte vis-à-vis du critère de traction.

Par définition de T, si un point (H,z) est situé sur la frontière de T alors il existe au moins un joint i tel que :

$$H = Hmin(i,z)$$

ou

$$H = Hmax(i,z)$$

La ligne de pression sur ce joint passe alors à l'intrados (cas de Hmin) ou à l'extrados de la voûte (cas de Hmax). La maçonnerie n'ayant pas de résistance à la traction, l'épaisseur de joint comprimé est nulle et la contrainte de compression est infinie.

VOUTE fournit quelques points caractéristiques de la frontière du domaine T (cotes z extrémales, poussées Hmin et Hmax).

Pour chacun de ces points, le programme indique le point de passage de la ligne de pression sur chaque joint ainsi que les efforts sur les joints. Les joints faibles repérés par le programme sont les joints où la ligne de pression passe à l'intrados (excentricité égale à 1) ou à l'extrados (excentricité égale à -1) et donc où le taux de compression est infini.

L'excentricité est définie par

$$e_i = \frac{M_i}{N_i \; h_i}$$

Les maxima d'excentricité peuvent être inférieurs à 1 en valeur absolue pour les lignes zmax ou zmin.

Les joints dits éventuellement faibles correspondent à des maxima locaux de la valeur absolue de l'excentricité sans atteindre la valeur 1.

Cas symétrique, stabilité vis-à-vis du critère de compression

Pour que la voûte soit stable, il est nécessaire qu'elle soit stable en traction, donc que (H,z) soit à l'intérieur ou sur la frontière de T.

La résistance de la maçonnerie à la compression ayant une valeur finie, cette condition n'est pas suffisante pour assurer la stabilité de la voûte vis-à-vis du critère de compression de la maçonnerie.

Pour un point (H,z) appartenant au domaine T, on connaît sur chaque joint S_i, d'épaisseur 2 x h_i, les efforts résultants :

- N_i effort normal
- M_i moment par rapport au milieu du joint
- V_i effort tranchant

Dans cette partie, nous négligeons l'influence de l'effort tranchant.

Le taux de compression sur le joint S_i est défini par :

$$f(i,z,H) = N_i / (2\sigma_o h_i - |M_i| / 2\sigma_o N_i)$$

où $2\,h_i$ est la hauteur du joint et σ_o la résistance à la compression.

Il existe au moins un joint sur lequel le taux de compression est maximal.

$$F(z,H) = \max_i f(i,z,H)$$

Par construction de T, la fonction F(z,H) est infinie sur la frontière de T. A l'intérieur de T, il existe un point correspondant au minimum de F(z,H).

Ce minimum correspond à la ligne optimale vis-à-vis du critère de traction-compression de la voûte. Ses caractéristiques sont fournies par le programme. C'est la ligne de pression pour laquelle la voûte est stable en traction et le taux de compression sur la maçonnerie le plus faible possible.

Si le minimum est inférieur à 1, il existe un sous domaine T' à l'intérieur de T tel que $F(z,H) \leq 1$.

Le programme fournit alors les lignes caractéristiques du domaine T'.

Les joints faibles ou éventuellement faibles sont alors définis par rapport à des maxima locaux du taux de compression.

Le minimum de F(z,H) permet également de calculer simplement le cœfficient de rupture. Si on affecte l'ensemble des charges d'un cœfficient multiplicateur F, le nouveau domaine T' de stabilité vis-à-vis du critère de traction est déduit du précédent par une affinité selon l'axe OH et de rapport F.

Le minimum du taux de compression vaut alors :

```
F  x  min( F(z,H) )
```

Par conséquent, si on multiplie toutes les charges par F = 1/F(z,H), la ligne optimale vis-à-vis du taux de compression donne un taux de compression égal à 1 et donc tous les autres points du plan (z,H) conduisent à des taux de compression supérieurs à 1. La ligne optimale est alors la seule ligne possible vis-à-vis du critère de compression. Par définition, F est le cœfficient de rupture.

Si T' est non vide, on connaît donc un domaine à l'intérieur duquel peut se trouver (H,z) de façon à vérifier les conditions de stabilité potentielle de la voûte. Il est cependant impossible de déterminer le couple (H,z) qui existe en réalité dans la structure.

Cas dissymétrique

Lorsque le problème (géométrie ou chargement) est dissymétrique, la structure est trois fois hyperstatique.

En théorie, le calcul est réalisé d'une façon tout à fait similaire au cas symétrique. Au niveau algorithmique, la recherche des maximums ou minimums tient compte de la nécessité d'itérer sur 3 variables au lieu de 2. Les domaines T et T' sont également définis dans un espace à trois dimensions.

Le programme calcule, dans ce cas, certains points caractéristiques du domaine de stabilité en traction ainsi que la position de ces lignes et efforts sur chaque joint.

Enfin, le programme fournit, si la voûte n'est pas instable en traction, la ligne optimale vis-à-vis du critère de compression ainsi que le cœfficient de rupture correspondant.

Etude des contre-voûtes

L'une des techniques de réparation des voûtes de résistance insuffisante consiste à la renforcer par une contre-voûte adhérente sous la maçonnerie. Cette contre-voûte est généralement réalisée en béton mis en place par projection. Après réparation, chaque joint de la voûte comporte deux zones de résistances différentes avec celle du béton vers l'intrados et celle de la maçonnerie au-dessus. La théorie exposée ci-dessus peut être adaptée pour en tenir compte. VOUTE autorise l'étude de ce type de structure.

Influence de l'effort tranchant

Le critère de résistance généralement admis pour la résistance au cisaillement de la maçonnerie est du type frottement sec de Coulomb (Φ est l'angle de frottement).

$$|\tau| \leq \sigma \ tg(\Phi)$$

En contraintes généralisées sur le joint S_i, cette condition s'écrit :

$$|V| \leq N \ tg(\Phi)$$

Il est en théorie possible de tenir compte de ce deuxième critère de résistance dans le calcul des cœfficients de rupture. L'expérience montre que l'incidence de l'effort tranchant est limité à quelques % du cœfficient de rupture. Il est donc loisible de ne pas tenir compte de cet aspect. VOUTE n'intègre pas de calcul tenant compte du frottement. Il est toutefois prudent de vérifier, notamment pour les lignes optimales, sur chaque joint l'inclinaison de la résultante des efforts. A cet effet, VOUTE fournit l'inclinaison (effort tranchant/effort normal) sur chaque joint, ainsi que le maximum de cette valeur sur l'ensemble des joints.

Réactions d'appuis

VOUTE fournit notamment la réaction d'appui égale, pour une ligne de pression donnée, à la résultante des efforts sur le dernier joint. L'inclinaison est mesurée par rapport à la verticale descendante. Ces valeurs peuvent être utilisées ultérieurement pour étudier la stabilité des piles ou des culées (Cf annexe 4).

Cœfficient de rupture admissible

La méthode de calcul utilisée par le programme fournit un majorant du cœfficient de sécurité réel. En outre, les résultats, et notamment le cœfficient de rupture, sont très sensibles à la géométrie de calcul et à la résistance du matériau constitutif de la voûte. Or ces paramètres sont connus avec une précision qui reste limitée. Enfin, l'influence des éléments tels que les tympans, la résistance propre du matériau de remplissage,..., est mal connue. Par conséquent, un cœfficient de rupture de 3 sous l'effet des charges pondérées à l'état limite ultime (Cf DC79) est déclaré admissible. En deça de cette valeur, il convient d'être extrêmement prudent.

FONCTIONNEMENT GENERAL

Particularités de la version pour micro-ordinateur

Le portage du programme sur micro ordinateur a nécessité le découpage du logiciel en plusieurs modules exécutables. Les restrictions suivantes ont été imposées par rapport au programme VOUTE décrit dans le document SETRA de 1982 :

- Une seule géométrie et une seule résistance par calcul. Les éléments de géométrie et de résistance définis pour le premier cas de chargement sont conservés pour l'ensemble du calcul.
- Le mode de calcul est obligatoirement standard ; il n'est pas possible d'étudier l'influence de l'effort tranchant.
- L'utilisateur ne peut pas choisir le nom des fichiers résultats du module de calcul ni demander une sortie détaillée de tous les calculs intermédiaires.
- Le nombre de courbes définissant l'intrados ou l'extrados d'une demi voûte est inférieur ou égal à 20.
- Le nombre de cas d'actions unitaires est inférieur à 20 par type de charge (remblai, charge concentrée, répartie ou exceptionnelle).
- Le nombre de combinaisons d'actions est limité à 10.

Le respect de ces limitations est vérifié lors de la saisie des données par le programme VOUTE. Cependant, il est possible de

lancer, depuis le DOS, le calcul proprement dit (Cf chapitre 10) en utilisant un fichier de données. Si celui-ci a été modifié par l'utilisateur au moyen d'un éditeur de texte, le résultat peut être imprévisible.

Organisation du programme

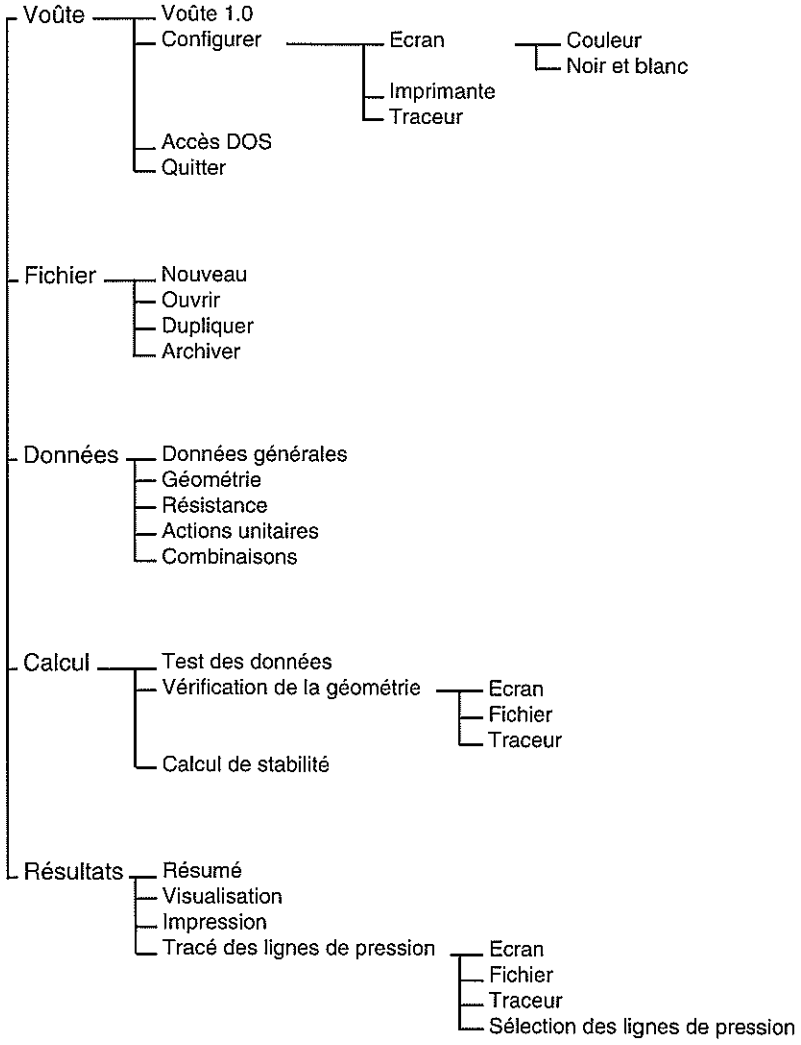
L'architecture de VOUTE est conçue autour d'un menu principal donnant accès aux différentes fonctions possibles :

- Configuration et utilitaires,
- Saisie ou modification des données,
- Test des données et calcul de stabilité,
- Utilisation des résultats.

Le fonctionnement général de VOUTE est dirigé par l'utilisateur au moyen d'une interface faisant appel à un menu déroulant principal et des saisies plein-écran. Les touches de fonctions utilisables lors des saisies sont rappelées sur la ligne inférieure de l'écran.

Arborescence des menus

L'utilisateur accède aux différentes options au moyen de menus arborescents dont la structure est définie ci-dessous :



Utilisation du menu principal

L'écran d'accueil du programme propose en ligne supérieure un menu déroulant dont les options sont accessibles soit en déplaçant la sélection au moyen des touches flèches, soit en tapant la touche correspondant à la première lettre de l'option souhaitée, soit encore au moyen de la souris. Les options ne sont pas toutes accessibles à un moment donné ; par exemple, l'option de calcul de la stabilité de la voûte ne peut être choisie que si les données ont été saisies et sont correctes ou encore, les résultats ne peuvent pas être visualisés que si le calcul a été effectué. Les options non sélectionnables sont indiquées par un tiret devant le libellé de l'option ; le texte de l'option apparaît en outre en grisé sur les moniteurs couleurs.

Saisies plein écran

Pour l'ensemble des écrans de saisie, les touches de fonctions disponibles sont rappelées en bas de l'écran.

Dans les cas courants, l'écran de saisie possède plusieurs champs qui sont accessibles au moyen des touches flèches. La touche <Return> a alors le même effet que la flèche basse. Les nouvelles valeurs peuvent alors être introduites ou modifiées champ par champ. La validation de l'ensemble des données d'un écran de saisie se fait par appui de la touche <F10>. Toutefois, lorsque l'écran comporte une seule valeur à saisir, la touche <Return> valide cette valeur de la même façon que <F10>.

Des groupes de données peuvent nécessiter la saisie de données sur plusieurs écrans identiques. A l'intérieur d'un groupe de données, l'accès aux différents écrans se fait au moyen des touches <F7> (écran précédent) et <F8> (écran suivant). L'ensemble du groupe de données est validé par la touche

<F10> qui n'est active que lorsque le dernier écran de la série est affiché.

Sélection d'une option dans une liste

L'utilisateur peut avoir à choisir une ou plusieurs options parmi une liste. Les options possibles se présentent alors sous la forme d'un menu vertical avec une barre de menu. La sélection s'opère en déplaçant la barre de menu au moyen des touches flèches sur l'option choisie et en validant le choix par appui sur la touche <Return>.

Dans certains cas, la liste des options est trop longue pour être affichée en totalité à l'écran. Les lignes hautes et basses du menu signalent alors, par des pointillés, l'existence d'autres choix possibles qui sont accessibles, soit en continuant à actionner les touches flèches (décalage d'une option), soit au moyen des touches <PgUp> et <PgDn> (déalage par bloc), soit au moyen des touches <Home> et <End> qui permettent de se déplacer respectivement en tête et en fin de liste.

Enfin, certains menus permettent le choix simultané de plusieurs options. Le déplacement de la barre des menus obéit aux mêmes règles que précédemment. La sélection d'une option est réalisée par la touche <Return>. L'option validée est alors signalée par un astérisque en première colonne du menu. Une deuxième pression sur cette touche permet d'annuler une sélection précédente.

Utilisation de la touche <Escape>

La touche <Escape> a pour effet d'annuler l'opération en cours et de faire revenir le programme au niveau du menu principal. Dans les modules de saisie des données, <Escape> annule les modifications effectuées.

Utilisation de la touche de fonction <F2>

Sur certains écrans de saisie, l'appui sur <F2> fait apparaître un menu de type liste d'options proposées à l'utilisateur. La sélection d'une option par <Return> a pour effet de remplir automatiquement un ou plusieurs champs de l'écran en cours.

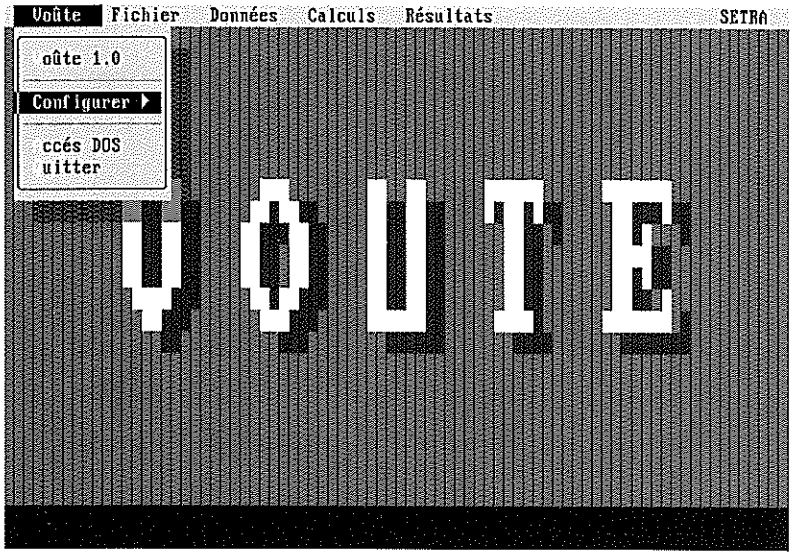
Utilisation d'une souris

VOUTE détecte la présence éventuelle d'une souris. Celle-ci peut être utilisée pour sélectionner une option du menu principal, sélectionner un champ lors d'une saisie plein-écran, déplacer la barre de sélection des menus verticaux grâce au bouton gauche, et pour choisir une option dans un menu de type liste par un clic double sur le bouton gauche de la souris. La souris peut également être utilisée à la place des touches de fonction en cliquant la zone correspondante sur la dernière ligne de l'écran. Le bouton droit de la souris permet de simuler l'appui sur la touche <Escape>.

Sur les écrans graphiques, le bouton gauche de la souris équivaut à <Return> et le bouton droit à <Escape>.

GESTION DU PROGRAMME

Cette partie de menu permet de gérer la configuration du logiciel (type d'écran, paramétrage de l'imprimante, type et paramétrage du traceur) ou d'accéder au DOS soit de façon provisoire, soit en quittant définitivement VOUTE. Elle correspond à la première option intitulée "Voûte" de menu principal.



Couleur des écrans

Le logiciel est fourni avec deux bibliothèques d'écrans, l'une en couleur (VOUTE.CO) l'autre en noir et blanc (VOUTE.NB). Ceci permet d'adapter le logiciel aux préférences de l'utilisateur ou d'améliorer la lisibilité sur des écrans monochromes. Le choix du type d'écran s'effectue par une sous-option du menu principal.

Imprimante

Le calcul d'une voûte génère un fichier ASCII stocké sur le disque dur mais qu'il est possible d'imprimer (Cf chapitre 9). Le listing comporte des lignes de 132 caractères de large alors que la plupart des imprimantes sont par défaut configurées pour imprimer des lignes de 80 caractères environ. Sans modification de la programmation de l'imprimante, les lignes trop longues peuvent être selon les cas tronquées à droite ou écrites sur deux lignes au lieu d'une seule. Il est donc nécessaire de configurer l'imprimante en mode dit compressé. L'utilisateur dispose pour cela de deux possibilités.

Il peut, au moyen du panneau de contrôle de l'imprimante, mettre celle-ci en mode compressé avant l'impression proprement dite ; le passage par l'option de configuration de l'imprimante est alors inutile, le programme faisant une pause permettant ce réglage avant le lancement de l'impression.

Le passage en mode compressé est normalement également possible en transmettant à l'imprimante une suite de caractères préalablement à l'impression du fichier. Cette suite de caractères est fournie par la documentation de l'imprimante. L'option "Configurer / Imprimante" permet de mémoriser les caractères à transmettre. La fenêtre apparaissant à l'appel de l'option comporte 30 champs. Les caractères sont indiqués par

leur code ASCII (Par exemple Esc par le code numérique 27). Après la validation par <F10>, le programme mémorise les caractères en s'arrêtant au premier champ vide (la valeur numérique 0 correspond à un caractère ASCII et non à un champ vide). L'impression se fera alors sans pause d'attente pour réglage.

Pour annuler l'effet de cette option, il suffit d'effacer le premier champ des caractères de contrôle et de quitter l'écran par <F10>.

Par défaut, l'impression comporte 60 lignes par page. Ce paramètre peut être modifié grâce au premier champ de cette écran. La valeur autorisée est comprise entre 40 et 80 lignes par page. Le programme génère alors un saut de page avec impression des données générales en haut de la page suivante. Ceci est indépendant de la configuration réelle de l'imprimante. Il appartient à l'utilisateur de vérifier que son imprimante est capable d'imprimer selon le nombre de lignes spécifiées. Il est généralement possible de programmer le nombre de lignes par page de l'imprimante. La suite des caractères à transmettre à l'imprimante peut alors s'ajouter aux caractères de passage en mode compressé définis ci-dessus.

Nota 1 : la sortie du fichier résultat vers l'imprimante est également possible en dehors de VOUTE par une commande classique du DOS, par exemple par un ordre PRINT. Dans ce cas, il appartient à l'utilisateur de configurer correctement l'imprimante.

Nota 2 : l'imprimante reste en mode compressé après l'impression. Il faut donc la remettre en mode normal pour l'utiliser avec d'autres logiciels.

Traceur

VOUTE permet la visualisation de certains résultats sous la forme de dessins au format A4. La restitution peut se faire soit sur écran, soit sur traceur. L'utilisateur a en outre la possibilité de diriger la sortie traceur sur un fichier de manière à pouvoir procéder au dessin en différé, notamment si le traceur est connecté à une autre machine. La sortie traceur directe ou sur fichier nécessite donc que soit défini le type de traceur à utiliser. La sélection de l'option Voûte / Configurer / Traceur fait apparaître un menu de choix du type de traceur parmi les types suivants :



La notion de traceur est ici définie au sens large dans la mesure où elle inclut certaines imprimantes et même une option dite fichier DXF.

Dans le cas d'une sortie de type DXF, seule la sortie sur fichier sera autorisée ; ce fichier peut être ensuite relu par un programme acceptant ce format (de type AUTOCAD). Deux types de sorties sont possibles : le fichier DXF de type ASCII peut être relu par tout logiciel compatible DXF, les fichiers DXF de type binaire sont spécifiques à AUTOCAD à partir de la version 10 de ce logiciel. Les sorties de type DXF permettent notamment d'utiliser d'autres traceurs non répertoriés dans la liste ci-dessus.

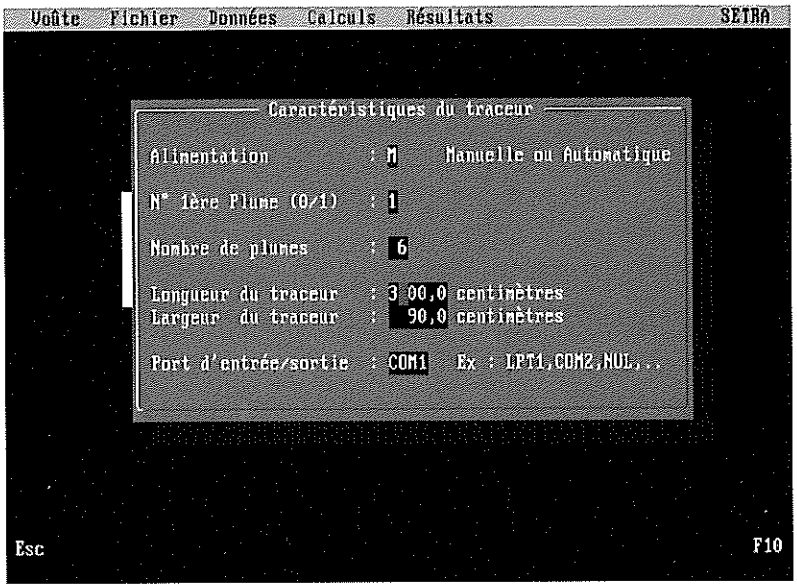
Les dessins sont également possibles sur trois types d'imprimantes :

- imprimante POSTSCRIPT,
- imprimante PRESCRIBE (notamment de type KYOCERA),
- imprimante HP LaserJet des séries II ou III.

La sélection d'un type de traceur fait apparaître un deuxième écran de saisie qui sert à paramétrer les caractèristiques du traceur (type d'alimentation, format du traceur, nombre de plumes). Le format du traceur défini par la longueur et la largeur de la feuille permet d'optimiser le nombre de dessins de format A4 sur une feuille de traceur. Le chargement de cet écran provoque l'affichage des valeurs standard pour chaque type de traceur.

Le dernier champ concerne le port d'entrée/sortie utilisé par le traceur. Il peut s'agir des ports suivants : LPT1, COM1, LPT2, COM2 ou encore de NUL si l'utilisateur ne souhaite effectuer

que des sorties sur fichier. Le champ n'est pas accessible pour le traceur de type "Fichier DXF".



La validation de cet écran avec un port d'entrée/sortie COM1 ou COM2 (interface série) fait apparaître un dernier écran comprenant les paramètres de configuration du port série utilisés par le DOS :

- Vitesse de transmission en bauds (les valeurs autorisées sont 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800 et 9600 bauds),
- Utilisation des bits de parité (N = Aucune, O = parité impaire, E = parité impaire),
- Nombre de bits de données (7 ou 8),
- Nombre de bits d'arrêt (1 ou 2).

Lors de l'exécution des dessins, le programme ne vérifie pas le fonctionnement correct du traceur. Si le port d'E/S n'existe pas, s'il n'est pas bien configuré ou si le traceur n'est pas en service, le programme reste bloqué et il est nécessaire de redémarrer entièrement l'ordinateur. Les données étant de toute façon sauvegardées dès leur validation, il n'y a toutefois pas de risque de perte de données.

Accès au DOS

Cette option permet l'Accès provisoire au DOS sans quitter VOUTE. Ceci permet de lancer des commandes telles que des copies de fichiers ou le paramétrage des ports série. Le retour au programme s'effectue par la commande EXIT sur l'invite du DOS.

VOUTE n'est pas déchargé de la mémoire. La mémoire disponible est donc fortement réduite. Il est également vivement recommandé de ne pas charger de programmes résidents pendant cette opération. En effet, la place mémoire occupée par VOUTE n'est plus alors récupérable même après avoir quitter définitivement le programme.

Pendant la session DOS, les fichiers de suffixe .TMP qui pourraient être présents dans le répertoire courant ne doivent pas être modifiés ou supprimés.

FICHIERS

Ce module permet de gérer les fichiers de données à traiter, c'est-à-dire de créer un nouveau fichier, de sélectionner un fichier existant ou de sauvegarder le fichier en mémoire sous un autre nom.

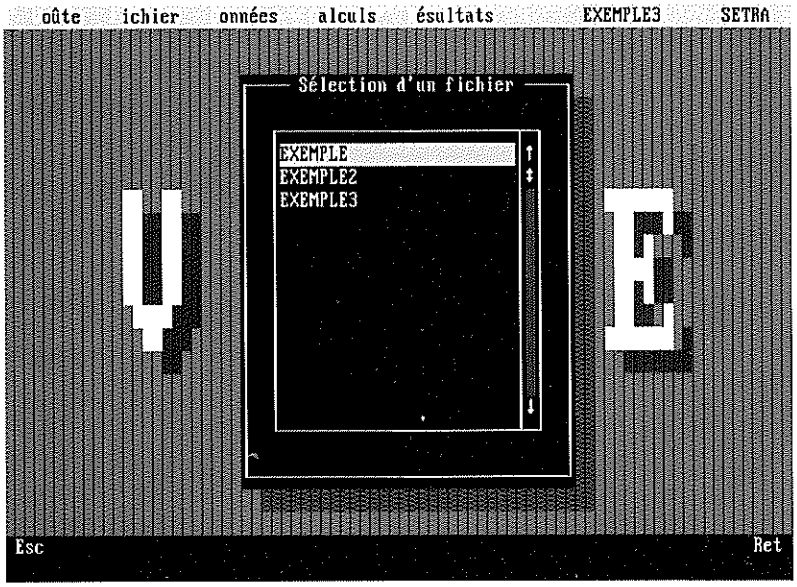
Création d'un nouveau fichier de données

La première option de ce menu permet de créer un nouveau fichier. Son nom est fourni au moyen d'un champ à valider par <F10> ou <Return>.

Le programme ajoute le suffixe .DVO au nom de fichier pour créer le fichier réel qui sera stocké sur disque dur. Si le nom fourni par l'utilisateur correspondant à un nom de fichier existant, le programme demande de confirmer la commande ; en cas de réponse positive, le fichier existant est détruit. Si le fichier est inexistant, l'ensemble des données est initialisé ; le fichier .DVO n'est créé sur le disque dur dans le répertoire courant qu'après validation d'une partie des données.

Ouverture d'un fichier existant

La deuxième option appelle un menu vertical qui comporte la liste des fichiers de suffixe .DVO contenus dans le répertoire courant. Le fichier sélectionné est alors lu et devient le fichier courant utilisable par les autres options du menu principal. La sortie par <Escape> de cette option rétablit le nom du fichier précédent.



Sauvegarde des données sous un autre nom

Cette option n'est accessible que si un fichier a déjà été sélectionné. Elle permet de dupliquer des données en les sauvegardant sous un autre nom. La fenêtre de saisie comporte le rappel du nom antérieur et une zone permettant d'entrer le nouveau nom. Si le nom correspond à un fichier déjà existant, le programme demande la confirmation de la commande.

Archivage d'un projet

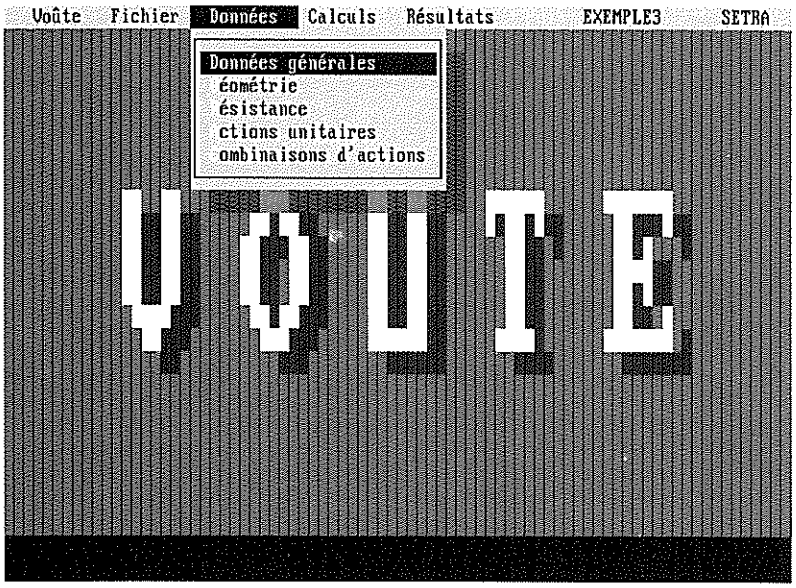
L'option Archivage efface sur le disque dur les fichiers .DON et .OUT dont le préfixe est celui du fichier courant. Cela permet de gagner de la place sur le disque dur tout en conservant les données de base dans le fichier de suffixe .DVO. Le calcul n'est alors possible qu'en repassant par le menu Données et en validant une saisie.

Nota :

les fichiers reconnus par VOUTE sont ceux du répertoire courant. Il est possible de changer ce répertoire sans quitter le programme en accédant provisoirement au DOS et en modifiant le répertoire actif par la commande CHDIR. La modification du répertoire actif n'est possible que si le répertoire d'installation de VOUTE est défini dans la variable PATH. Dans le cas contraire, le programme est interrompu. Lors du retour au programme, le nom du fichier courant de données est effacé s'il y a eu réellement changement de répertoire.

DONNEES

La saisie ou la modification des données est découpée au niveau du menu principal par type de données faisant appel à des modules différents.



Pour l'ensemble de ces modules, on adopte les conventions suivantes :

- Le système d'unités est quelconque pourvu que les unités de longueur, de contrainte et de force soient homogènes.
- La clé de voûte est située à l'abscisse 0.
- L'axe horizontal permettant de décrire la partie droite

de la voûte a son origine au niveau de la clé et est dirigé vers la droite. Cet axe est utilisé aussi bien pour la géométrie que pour les actions appliquées à la voûte.

- L'axe horizontal permettant de décrire la partie gauche de la voûte a son origine à la clé et est dirigé vers la gauche.
- L'axe des y a une origine quelconque.
- Les angles sont exprimés en degrés décimaux par rapport à l'axe vertical ascendant ; l'angle est positif en tournant vers l'axe OX (différent pour la demi voûte droite et la demi-voûte gauche).

La sortie d'un des modules de saisie par <Escape> entraîne l'annulation des modifications déjà effectuées et l'abandon de l'action en cours. La saisie complète d'un groupe de données et sa validation par <F10> entraîne la modification du fichier sur disque de suffixe .DVO. Le programme vérifie un certain niveau de cohérence des données (Cf chapitre 8). Si les données sont valables, un fichier de même nom que le fichier courant mais de suffixe .DON est également créé dans le répertoire courant. C'est ce fichier qui est utilisé pour les calculs. Si les données sont incorrectes, le fichier .DON n'est pas créé ; il est effacé s'il existait auparavant.

Les fichiers .DON sont des fichiers ASCII et peuvent éventuellement être modifiés par un éditeur de texte quelconque. Dans ce cas, les résultats risquent de ne pas être conformes aux données initiales stockées dans le fichier .DVO. Pour rétablir un fichier .DON correct, il suffit, dans VOUTE, de recharger le fichier, d'accéder à une des options de saisie de données et d'en sortir en validant les données par <F10>.

Données générales

Les données à saisir comportent les éléments suivants :

- Titre du calcul sur 2 lignes de 40 caractères.
- Numéro du calcul.
- Date sous la forme jj/mm/aa.

Ces éléments figurent sur chacune des pages du listing final. Leur saisie est facultative.

Géométrie

La géométrie de la voûte est définie par la géométrie de la courbe intrados et la géométrie de la courbe d'extrados.

Chacune de ces courbes est elle-même définie pour la demi-voûte située à droite de la clé et pour la demi-voûte située à gauche. L'utilisateur a la possibilité d'indiquer que la voûte est géométriquement symétrique par rapport à la clé. Il suffit alors de définir la demi-voûte de droite.

Enfin, chaque portion de courbes (intrados ou extrados, droite ou gauche) est définie par la succession de courbes élémentaires de forme géométrique donnée (segment de droite, arcs de cercle, de parabole ou d'ellipse).

La saisie des données géométriques comporte donc les étapes suivantes :

- caractéristiques générales de la géométrie,
- définition de l'intrados droit,
- définition de l'extrados droit.

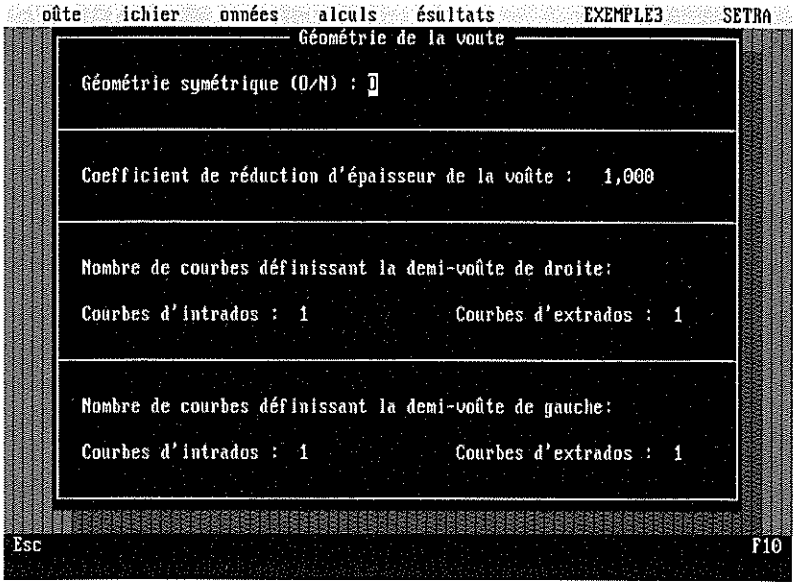
Le cas échéant, les deux dernières étapes sont reproduites pour la partie gauche de la voûte.

Caractéristiques générales de la géométrie

Les champs à saisir sont les suivants :

- Symétrie de la voûte (réponse par oui ou non).
- Cœfficient de réduction d'épaisseur : à partir de la géométrie réelle, l'utilisateur a la possibilité d'imposer une réduction d'épaisseur sous la forme d'un cœfficient numérique s'appliquant à l'ensemble de la voûte. La géométrie de calcul est alors obtenue en conservant la courbe d'intrados et en effectuant une déformation de l'extrados de façon à respecter le cœfficient réducteur d'épaisseur.
- Nombre de courbes élémentaires définissant l'intrados droit.
- Nombre de courbes élémentaires définissant l'extrados droit.
- Nombre de courbes élémentaires définissant l'intrados gauche.
- Nombre de courbes élémentaires définissant l'extrados gauche.

Les deux derniers champs ne sont accessibles que si la géométrie de la voûte est non symétrique. Dans le cas contraire, les champs sont pré-remplis avec les valeurs fixées pour la partie droite de la voûte. La validation par <F10> de cet écran autorise la saisie des groupes de données concernant la saisie de l'intrados puis de l'extrados de la demi-voûte droite suivie le cas échéant par des données du même type concernant la partie gauche.



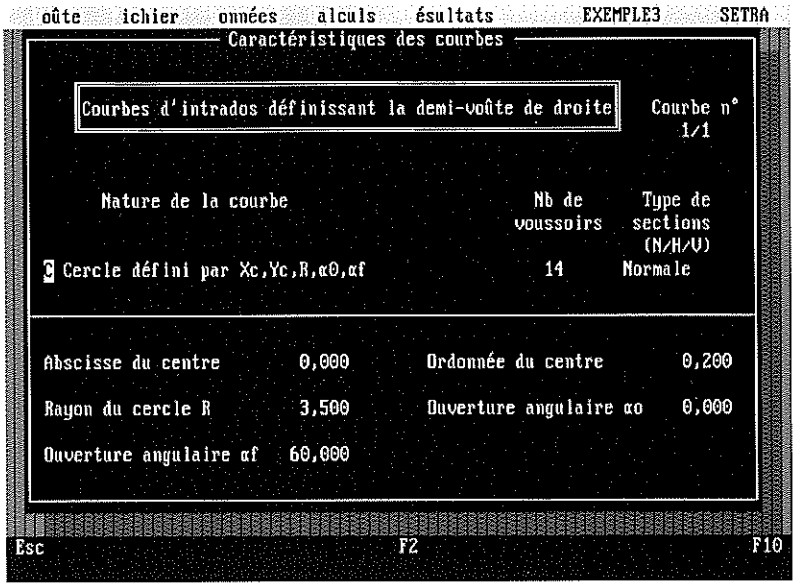
Il est évidemment possible de déclarer une voûte de géométrie symétrique par rapport à la clé comme étant non symétrique. Cela ne présente pas d'autre inconvénient que d'allonger inutilement (et de façon importante !) les temps de calcul et de doubler le volume des données à introduire.

On peut également définir dans un premier temps une géométrie symétrique pour ensuite revenir à cet écran pour déclarer la géométrie comme non symétrique et modifier une partie seulement des données.

Définition de l'intrados

Ce groupe de données comporte autant d'écrans que le nombre de courbes déclaré précédemment. Le passage d'un écran à l'autre se fait donc au moyen des touches <F7> et <F8>. La validation des données est réalisée par l'appui de <F10>.

Les courbes doivent être introduites dans l'ordre à partir de la clé. L'utilisateur doit en outre vérifier que les courbes forment une ligne continue. Dans le cas contraire, la géométrie de la voûte ne sera pas correcte et son calcul pourra générer un message d'erreur.



Les champs à saisir sur chaque écran sont les suivants :

Type de courbe

Ce type est défini par une lettre avec les significations suivantes :

- A Arc de parabole
- B Arc d'ellipse
- C Cercle défini par X_c , Y_c , R , α_o , α_f
- D Cercle tangent à la courbe précédente
- E Cercle à tangente horizontale à la clé
- F Cercle défini par 3 points
- G Segment jusqu'au point X_f , Y_f
- H Segment entre 2 points

La frappe de la lettre correspondant au type de courbe désiré a pour effet d'afficher en partie basse de l'écran les champs numériques caractérisant la courbe. Lorsque le curseur se trouve sur le champ "type de courbe", l'appui sur <F2> fait apparaître un menu d'aide permettant de sélectionner simplement le type de courbe. Certains types de courbes sont réservés à la première courbe de l'intrados ; c'est le cas pour les types E et H. Inversement, d'autres types ne sont utilisables qu'en prolongement d'une courbe déjà introduite ; c'est le cas pour les types D et G. Si l'utilisateur introduit un type ne correspondant pas à ces limitations, il est averti par un message d'erreur.

Le libellé complet du type de courbe est rappelé sur l'écran pour information.

Nombre de voussoirs découpant cette portion de courbe

Le principe du calcul suppose que la voûte est découpée en un certain nombre de voussoirs dont le nombre total pour l'ensemble des courbes d'une demi-voûte ne doit pas dépasser 200 (une vingtaine est un ordre de grandeur raisonnable). Chaque portion d'intrados peut ainsi être découpée par des joints de voussoirs équidistants. La valeur minimale pour ce champ est 1.

Attention : pour les besoins du calcul, le programme crée un voussoir fictif de longueur nulle à la clé. Le nombre de voussoirs de la première courbe de l'intrados est le nombre de voussoirs réels et ce nombre n'est incrémenté de 1 qu'au moment du calcul proprement dit.

Orientation des joints de voussoirs

A partir de l'intrados, les joints de voussoirs peuvent être normaux à l'intrados (cas général), horizontaux pour l'étude de la stabilité des piles, verticaux dans le cas de voûtes très surbaissées.

Caractéristiques des courbes

Lors de l'introduction du type de courbe, un certain nombre de champs numériques définissant les caractéristiques des courbes apparaissent sur la partie inférieure de l'écran de saisie. Le nombre et la signification des champs dépendent du type de courbe.

Courbe de type A : Arc de parabole

L'équation de l'arc de parabole dont le sommet à une abscisse nulle est de la forme :

$$Y = Y_O - K X^2$$

L'arc de parabole est défini par l'ordonnée à l'origine Y_O, le paramètre K, les abscisses X_1 et X_2 de ses points d'extrémité. Les données à fournir sont :

- Ordonnée du sommet Y_O
- Cœfficient K
- Abscisse origine X_1
- Abscisse finale X_2

Courbe de type B : Arc d'ellipse

L'ellipse est définie par les coordonnées de son centre X_C, Y_C, ses axes A et B, les angles polaires α_o et α_f de ses extrémités. L'angle polaire α correspond à la définition de l'ellipse par les équations paramétriques $X = A \sin \alpha + X_C$, $Y = B \cos \alpha + Y_C$.
Les champs à saisir sont :

- Abscisse du centre X_C
- Ordonnée du centre Y_C
- Cœfficient A
- Cœfficient B
- Ouverture angulaire α_o
- Ouverture angulaire α_f

Nota : les angles sont exprimés en degrés décimaux depuis la verticale ascendante.

Courbe de type C : Arc de cercle défini par son centre, son rayon et des ouvertures angulaires

L'arc de cercle est défini par les coordonnées de son centre X_c, Y_c, son rayon R, les angles polaires α_o et α_f de ses extrémités repérées par rapport à la verticale. Les angles sont comptés positivement vers l'axe OX.
Les caractéristiques des courbes de type C sont définies par 5 paramètres :

Abscisse du centre X_c
Ordonnée du centre Y_c
Rayon du cercle R
Ouverture angulaire α_o
Ouverture angulaire α_f

Courbe de type D : Arc de cercle tangent à la courbe précédente

L'arc de cercle est défini par les coordonnées de son point final X_f, Y_f. Le programme effectue le raccordement avec la courbe élémentaire précédente. Ce type de courbe ne peut donc pas être utilisé pour la première courbe élémentaire.
Les données sont :

Abscisse finale X_f
Ordonnée finale Y_f

Courbe de type E : Arc de cercle à tangente horizontale à la clé

L'arc de cercle est alors la première courbe élémentaire et il possède une tangente horizontale dans la section de clé. Il est défini par l'ordonnée Y_o à la clé et par les coordonnées du point d'extrémités X_f, Y_f. Il y a donc 3 champs à saisir :

Ordonnée à la clé Y_o
Abscisse finale X_f
Ordonnée finale Y_f

Courbe de type F : Arc de cercle défini par trois points

L'arc de cercle est défini par les coordonnées de 3 points. Les points (X_1, Y_1) et (X_3, Y_3) sont les points d'extrémité de l'arc et la portion de cercle passe par (X_2, Y_2). Il y a donc 6 champs numériques à renseigner :

Abscisse X_1
Ordonnée Y_1
Abscisse X_2
Ordonnée Y_2
Abscisse X_3
Ordonnée Y_3

Courbe de type G : Segment rectiligne défini par son extrémité

Le segment de droite est défini par les coordonnées de son point final X_f, Y_f. Le programme effectue alors le raccordement avec la courbe élémentaire précédente. Ce type de données ne peut donc pas être utilisé pour la première courbe élémentaire. Les données sont :

Abscisse finale X_f
Ordonnée finale Y_f

Courbe de type H : Segment de droite défini par ses points extrémités

Le segment de droite est défini par les coordonnées de ses points extrémités X_o, Y_o, X_f, Y_f. Les courbes de type H ne peuvent être utilisées que pour la première courbe d'un intrados ou d'un extrados. Les quatre champs à saisir sont :

Abscisse initiale X_o
Ordonnée initiale Y_o
Abscisse finale X_f
Ordonnée finale Y_f

Définition de l'extrados

Sur autant d'écrans que de courbes indiquées au niveau des données globales, les champs à saisir sont les suivants :

Type de courbe

Outre les types de courbe indiqués pour l'intrados, l'extrados peut être défini par une ou plusieurs épaisseurs de voûte mesurées depuis l'intrados selon les orientations de joints de voussoirs définies précédemment. Les abscisses fournies en données sont celles des origines des joints sur l'intrados. Les types de courbes possibles sont les suivants :

A Arc de parabole
B Arc d'ellipse
C Cercle défini par son centre, son rayon et deux angles
D Cercle tangent à la courbe précédente
E Cercle à tangente horizontale à la clé
F Cercle défini par 3 points
G Segment jusqu'au point X_f,Y_f
H Segment entre 2 points
I Cercle d'extrados défini par 1 épaisseur
J Cercle d'extrados à tangente horizontale à la clé
K Cercle défini par 3 épaisseurs
L Segment d'extrados défini par 1 épaisseur
M Segment d'extrados défini par 2 épaisseurs

L'appui sur <F2> permet une sélection rapide du type de courbe grâce à un menu déroulant.

Certains types de courbe sont réservés à la première courbe de l'extrados ; c'est le cas pour les types E, H, J et M. Inversement, d'autres types ne sont utilisables qu'en prolongement d'une courbe déjà introduite ; c'est le cas pour les types D , G, I et L. Si l'utilisateur introduit un type ne correspondant pas à ces limitations, il est averti par un message d'erreur.

Caractéristiques des courbes

Les caractéristiques des courbes dépendent de leur type. En sus des types précédents définis page 58, on trouve les types suivants :

Courbe de type I : Cercle d'extrados défini par une épaisseur

L'arc de cercle tangent à la courbe précédente est défini par une épaisseur E au point d'intrados d'abscisse X.
Ce type ne peut donc pas être utilisé comme première courbe.
Les deux champs à remplir sont :

Abscisse finale X_f
Epaisseur finale E_f

Courbe de type J : Arc de cercle d'extrados à tangente horizontale à la clé

L'arc de cercle à tangente horizontale dans la section de clé est défini par son épaisseur E_o à la clé et son épaisseur E_f au point d'intrados d'abscisse X_f. Il est donc déterminé par les quatre paramètres suivants :

Epaisseur à la clé E_o
Abscisse finale X_f
Epaisseur finale E_f

C'est nécessairement la première courbe de l'extrados.

Courbe de type K : Arc de cercle défini par 3 épaisseurs

L'arc de cercle est défini par 3 épaisseurs E_1, E_2, E_3, aux 3 points d'intrados d'abscisses X_1, X_2, X_3. Il y a donc six champs numériques :

Epaisseur E_1
Abscisse X_1
Epaisseur E_2
Abscisse X_2
Abscisse X_3
Epaisseur E_3

Courbe de type L : Segment rejoignant le point défini par une abscisse d'intrados X_f et une épaisseur E_f

Cette courbe ne peut pas être utilisée comme première courbe de l'extrados. Les deux champs à saisir sont :

Abscisse finale X_f
Epaisseur finale E_f

Courbe de type M : Segment entre 2 points définis par leurs abscisses d'intrados et leurs épaisseurs

Les données sont :

Abscisse initiale X_o
Epaisseur initiale E_o
Abscisse finale X_f
Epaisseur finale E_f

Définition de la partie gauche de la courbe

La définition de la partie gauche de la voûte se fait de la même manière que pour la partie droite dans le repère local pour l'axe horizontal (donc orienté vers la gauche).

Remarques : L'orientation du dernier joint de la voûte est déterminée de la façon suivante :

- *A partir de l'intrados, on trace une demi droite avec l'orientation prévue du joint (dans le cas général normal à l'intrados).*
- *Si cette demi droite ne coupe pas l'extrados, la dernière courbe d'extrados est poursuivie jusqu'à intercepter le joint théorique.*
- *Si cette demi droite coupe l'extrados, le dernier joint est modifié de manière à joindre le dernier point d'intrados au dernier point d'extrados.*

L'orientation du dernier joint peut donc ne pas être conforme à celle définie par l'utilisateur pour les autres joints.

La position des joints sur l'extrados est déterminée par l'intersection des courbes d'extrados avec les joints issus de l'intrados. Si les joints d'intrados ne sont pas assez nombreux et si l'extrados est de géométrie complexe, la géométrie de calcul peut être différente de la géométrie réelle. Il convient donc de choisir le découpage de l'intrados de façon à ce qu'il existe un joint à chaque changement de courbe d'extrados.

Résistance

La résistance de la voûte est définie pour chaque joint de voussoir. Il est possible de définir des zones de résistance homogène sur un certain nombre de joints.

L'appel du module résistance fait apparaître un écran permettant d'indiquer :

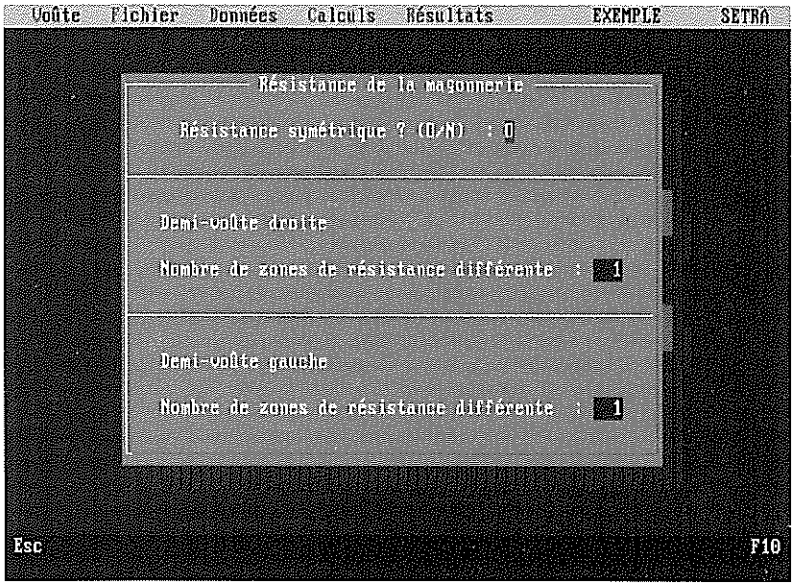
- si la résistance de la voûte est définie de façon identique sur la demi-voûte droite et sur la demi-voûte gauche,
- le nombre de zones de résistance homogène pour la demi-voûte droite,
- éventuellement le nombre de zones de résistance pour la demi-voûte gauche.



La validation par <F10> de cet écran entraîne la saisie du groupe de données de résistance pour la demi voûte droite et, le cas échéant, pour la demi-voûte gauche.

Un groupe de données comporte autant d'écrans que de nombre de zones indiqué précédemment. Chaque écran comporte les champs suivants :

- Résistance à la compression de la maçonnerie,
- Numéro du premier joint de voussoir de la zone,
- Numéro du dernier joint de voussoir. Si il n'y a qu'un seul écran à saisir, ce champ et le champ précédent ne sont pas accessibles ; le programme générera automatiquement le numéro des joints pour l'ensemble de la demi-voûte,
- Epaisseur et résistance de la zone inférieure de la voûte. VOUTE permet de définir pour chaque joint de voussoir deux valeurs de résistance sur l'épaisseur de la voûte. Dans les cas courants, cette possibilité n'est pas utilisée. On peut toutefois étudier de cette façon l'effet d'une contre-voûte ; la géométrie d'intrados correspond à l'intrados de la contre-voûte et non à l'intrados de la voûte d'origine.



La résistance de la maçonnerie doit être strictement positive. Il en est de même pour la résistance de la contre-voûte si son épaisseur est non nulle.

Il appartient à l'utilisateur de vérifier que la résistance est définie sur chaque joint. La numérotation des joints est, sur chaque demi-voûte, la numérotation des joints réels, le joint n°1 étant le joint de clé.

Actions Unitaires

Un chargement de la voûte résulte de la superposition d'actions unitaires qui doivent être au préalable définies dans ce module. Chaque action possède un des types suivants :

- poids propre calculé à partir de l'épaisseur de la voûte et d'une masse volumique,
- charge de type remblai,
- charge concentrée sur la voûte,
- charge répartie variant linéairement.

Il n'est possible de définir pour l'ensemble du calcul qu'une seule masse volumique s'appliquant à l'ensemble de la voûte. On peut définir au maximum 20 actions élémentaires différentes pour chacun des autres types.

Chaque charge unitaire peut s'appliquer sur la demi-voûte de droite, sur la demi-voûte de gauche ou de façon symétrique sur les deux demi-voûtes. Dans cette dernière hypothèse, on définit l'action unitaire pour la demi voûte droite, le programme procédant automatiquement à la symétrisation du cas de chargement.

Un chargement s'appliquant de façon non symétrique sur la demi voûte de droite et sur la demi-voûte de gauche devra être défini au moyen de deux actions unitaires.

Nota 1 : Les efforts (hormis le poids propre) sont appliqués à l'extrados des voûtes. Il appartient à l'utilisateur de calculer si nécessaire l'effet de la répartition des efforts au travers du matériau de remplissage. Pour les efforts appliqués au niveau de la chaussée, il est d'usage d'admettre une répartition des efforts à 45° sur une profondeur de remblai égale à la hauteur de remblai à la clé.

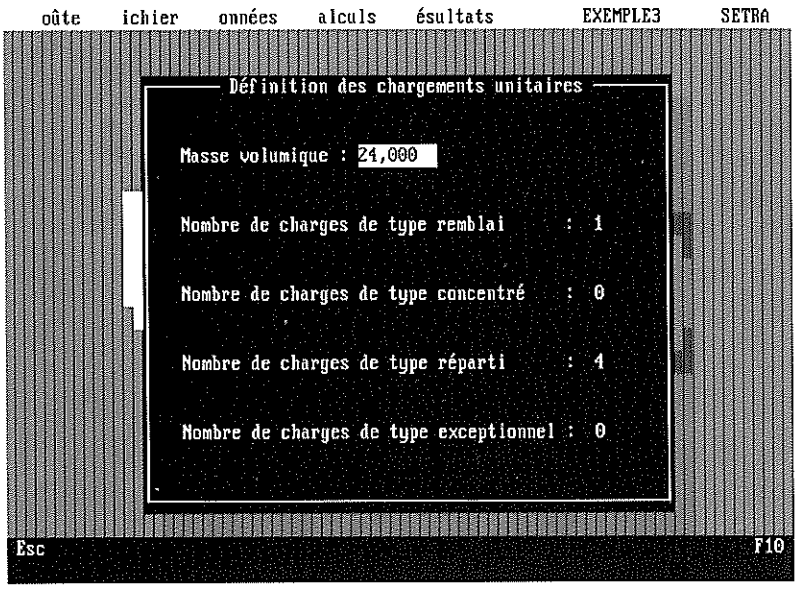
Nota 2 : Le calcul considère la stabilité d'une tranche de voûte de largeur unitaire dans le sens transversal. Il y a lieu d'en tenir compte pour la définition des efforts et dans le calcul de l'effet répartiteur du remblai (Cf annexe 4).

Caractéristiques générales des actions unitaires

Le premier écran du module "Actions Unitaires" permet de spécifier :

- la masse volumique de la voûte,
- le nombre d'actions unitaires de type remblai,
- le nombre d'actions unitaires de type charge concentrée,
- le nombre d'actions unitaires de type charge répartie,
- le nombre d'actions unitaires de type charge exceptionnelle.

Lorsque le nombre d'actions unitaires est non nul, on accède successivement à chacun des groupes de données ci-après.

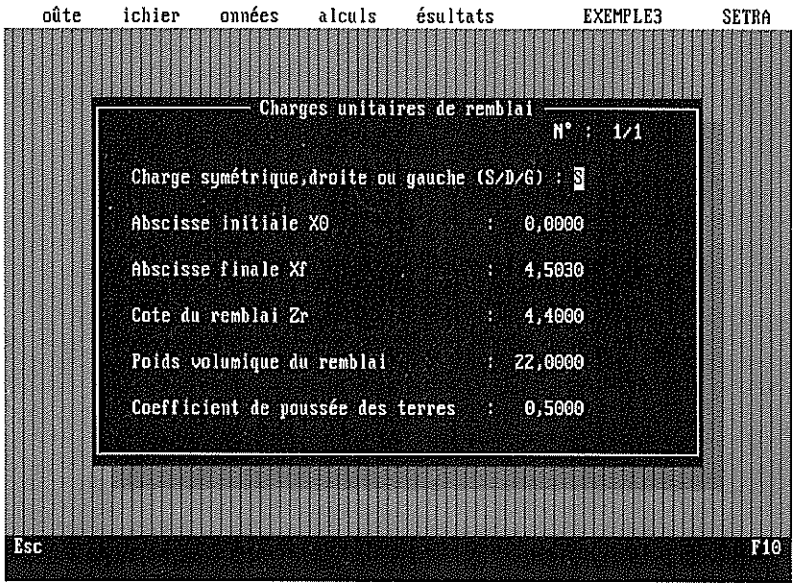


Actions de type remblai

Ce groupe de données est décrit au moyen d'un nombre d'écrans égal au nombre de charges de ce type.

Chaque écran comporte les champs suivants :

- Zone d'application de la charge définie par le lettre D si la charge ne s'applique qu'à la demi-voûte droite, G si seule la demi-voûte gauche est concernée et S si la charge est symétrique (dans ce cas, les valeurs décrites ci-dessous ne s'appliquent qu'à la demi-voûte droite seule)
- Abscisse initiale X_0
- Abscisse finale X_f
- Cote du remblai Z_r
- Poids volumique G du remblai
- Cœfficient de poussée des terres K

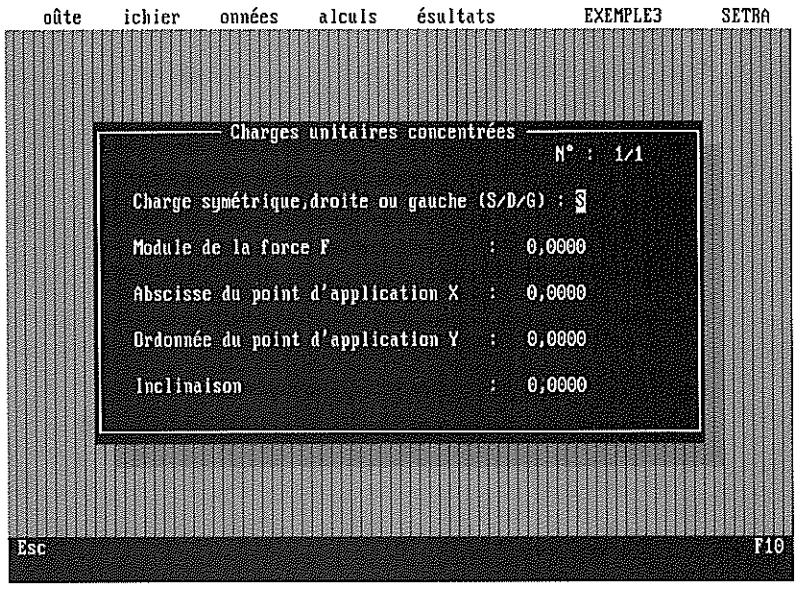


Généralement le cœfficient de poussée des terres a un effet négligeable sur le cœfficient de rupture de la voûte. Cependant il intervient de façon assez sensible sur la valeur des réactions d'appui de la voûte, et donc sur les conditions de stabilité des piles ou des culées. La valeur du cœfficient de poussée des terres est normalement compris entre 0,5 et 1.

Actions de type charge concentrée

Sur le ou les écrans correspondant à ce type de charge, l'utilisateur doit fournir les éléments suivants :

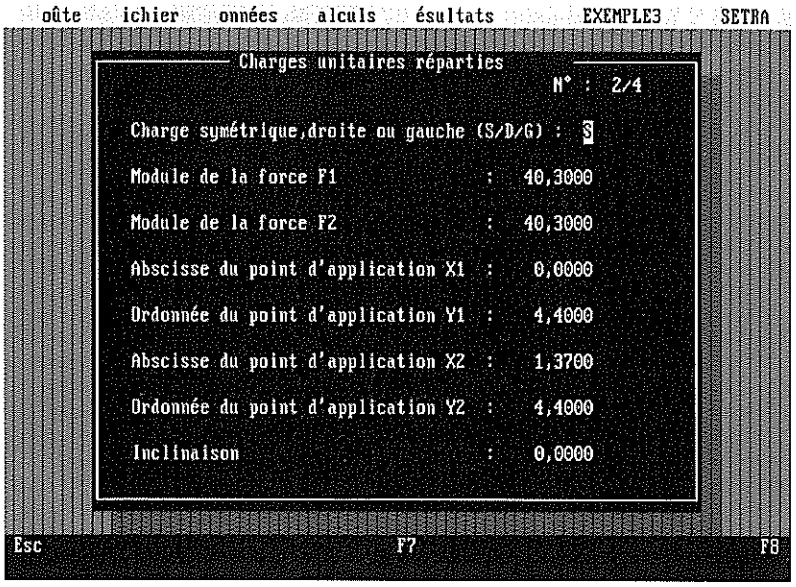
- Zone d'application de la charge (D, G ou S)
- Module de la force
- Coordonnées (X,Y) du point d'application
- Inclinaison par rapport à la verticale



Actions de type charge répartie

Les écrans comportent les champs suivants :

- Zone d'application de la charge (D, G ou S)
- Modules de la charge répartie en début et en fin de la zone chargée
- Coordonnées (X,Y) du début et de la fin de la zone chargée
- Inclinaison de la charge



Actions de type charge exceptionnelle

Ce type d'action est identique au type précédent. Il ne s'en distingue que lors des combinaisons de chargement qui peuvent faire intervenir des coefficients de pondération différents.

Combinaisons d'actions

Le calcul de stabilité n'est lancé que si l'utilisateur a défini un ou plusieurs chargements. Un chargement est lui-même défini par :

- Un titre (facultatif)
- Des coefficients de pondération
- La sélection d'une ou plusieurs actions unitaires définies au préalable

Le premier écran de ce module permet d'indiquer le nombre total de combinaisons d'actions et donc le nombre d'écrans de ce groupe de données. Le nombre de combinaisons est limité à 10.

Chaque écran permet de définir un chargement. Il est divisé en trois zones qui sont accessibles de façon cyclique au moyen de la touche <Tab>. Le titre de la zone active à un moment donné est clignotant. Ces trois zones sont :

- Titre du chargement : titre libre sur 40 caractères
- Coefficients de pondération. Cette zone permet la saisie de 5 coefficients de pondération correspondant aux 5 types possibles d'actions unitaires. L'ensemble des actions unitaires d'un même type sont, pour un chargement donné, affectées du même cœfficient de pondération. Lorsque cette zone est active, l'appui sur <F2> permet de choisir rapidement trois types de pondération de base :

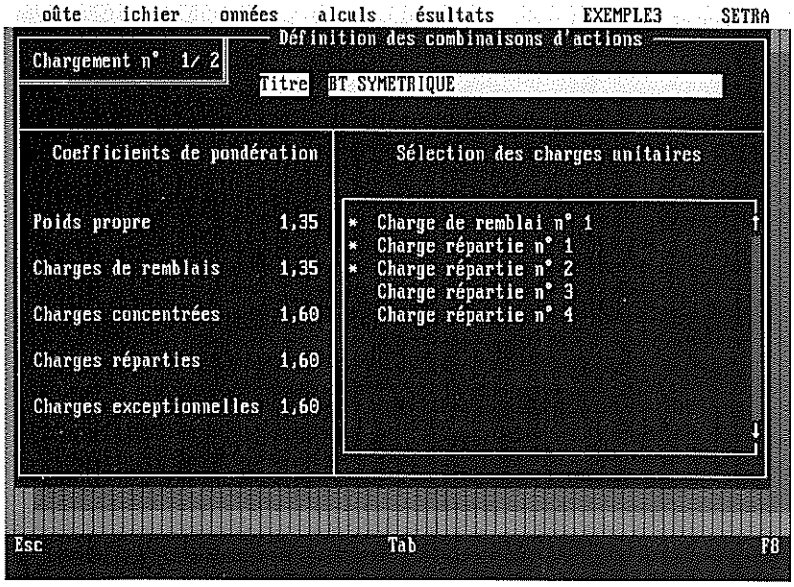
	Standard	Maximale	Minimale
Poids propre	1	1,35	1
Remblai	1	1,35	1
Charges concentrées	1	1,6	1,6
Charges réparties	1	1,6	1,6
Charges exceptionnelles	1	1,35	1,35

- La limite du cœfficient de rupture de 3 tient compte de coefficients de pondération de type Etat Limite Ultime, donc avec une pondéra-

tion maximale ou minimale. Dans la plupart des cas, et notamment pour les voûtes surbaissées, la pondération maximale est la plus défavorable. Si l'utilisateur souhaite affecter une action d'un cœfficient de pondération différent de celui utilisé pour les autres charges du même type, il lui appartient d'en tenir compte manuellement lors de la définition des actions unitaires.

- Sélection des charges unitaires.
- Au moyen d'un menu à sélections multiples, l'utilisateur peut choisir les actions unitaires faisant partie du chargement. Le poids propre est automatiquement sélectionné pour tous les cas de chargement de la voûte ; si les actions unitaires ne comportent pas d'autres actions que le poids propre, le passage sur cette zone génère l'affichage d'un message de rappel.

Les touches <F7> ou <F8> permettent de passer d'un cas de chargement à un autre. <F10> valide l'ensemble des cas de chargement.



CALCULS

Cette partie du menu principal regroupe trois options. Les options "Test des données" et "Vérification de la géométrie" permettent de procéder à une vérification sommaire des données avant de lancer la troisième option "Calcul de stabilité".

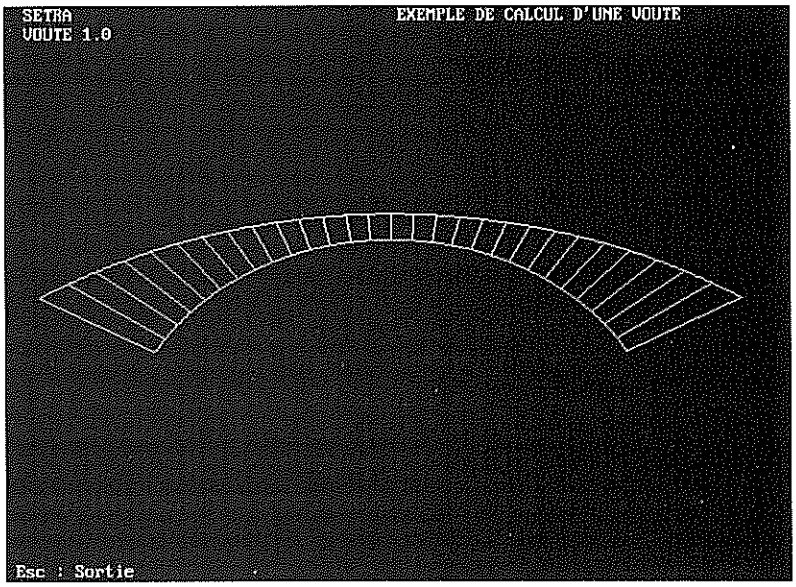
En accédant à ce niveau du menu principal, l'utilisateur peut ne pas avoir accès au calcul ; sous réserve d'avoir effectivement des données en mémoire (utilisation au moins une fois depuis le début de la session de l'option "Fichier/Nouveau" ou "Fichier/Ouvrir"), cela signifie qu'une des données n'est pas valable. En sélectionnant "Test des données", l'utilisateur commande une relecture de l'ensemble des données. Le cas échéant, un message d'alerte s'affiche en indiquant la nature de la première erreur rencontrée. Ce peut être, par exemple, la non définition du type d'une courbe d'intrados ou encore l'utilisation d'une masse volumique nulle. Toutefois la vérification à ce stade n'est que sommaire. D'autres erreurs ne sont détectées que lors des phases de calcul ; c'est le cas par exemple du contrôle du non croisement des courbes d'intrados et d'extrados.
En cas de détection d'erreur après un test de données, l'utilisateur peut modifier les données par l'option "Données" du menu principal.

Vérification de la géométrie

La géométrie constitue un des points les plus délicats de la saisie des données. Il peut être utile de vérifier la géométrie en dessinant la voûte avant de lancer le calcul proprement dit. L'option "Vérification de la géométrie" donne accès à un troisième niveau de menu proposant une restitution de la géométrie de la voûte ainsi que des joints entre voussoirs soit sur écran, soit sur traceur, soit sur fichier. Les types traceur et fichier ne sont disponibles que si le type de traceur à été défini (Cf chapitre 5).

La commande lance dans un premier temps le calcul de la géométrie. Certaines erreurs de données peuvent être détectées à ce stade. L'utilisateur est alors averti par le lancement du programme exécutable V_ALERT.COM qui indique le numéro d'erreur, ainsi qu'un message explicatif (Cf annexe 1).

Pour les restitutions sur écran et si le type d'écran déclaré par l'utilisateur est de type écran couleur, il est possible de modifier la couleur du tracé au moyen de la touche <F3>.



Calculs de stabilité

Le calcul de stabilité est découpé en 4 étapes utilisant chacune un module exécutable différent.

V_CALC_0

vérification de la place mémoire,

vérification de la présence du fichier de données,

comptage des chargements,

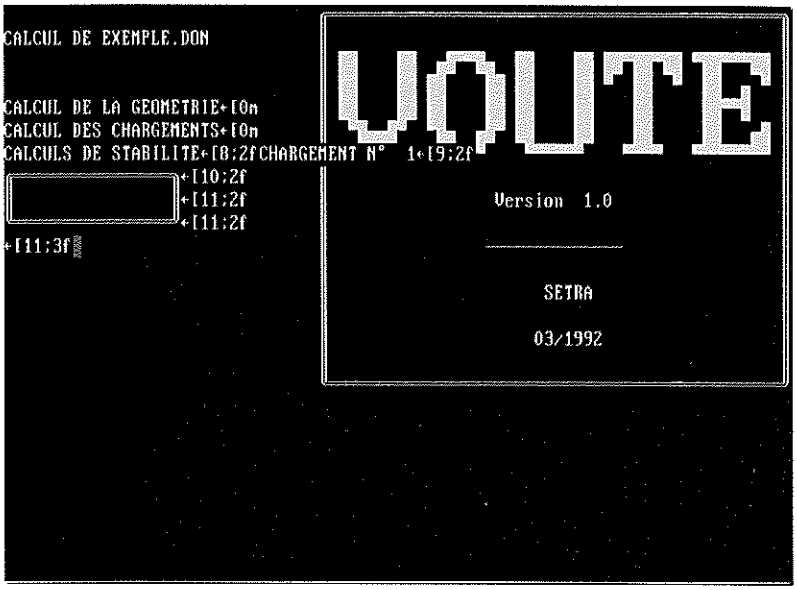
affichage de l'écran de calcul.

V_CALC_1

calcul de la géométrie,

écriture du listing pour la partie géométrie,

calcul pour chaque chargement des efforts appliqués aux voussoirs.



V_CALC_2
calculs de stabilité proprement dit.

V_CALC_3
mise en forme des résultats,
recherche du cas de charge le plus défavorable.

V_CALC_4
création finale du fichier de sortie.

Le préfixe du fichier de sortie est celui du fichier de données et son suffixe est .OUT.

Si une erreur intervient à chacun de ces étapes, l'utilitaire V_ALERT indique le numéro d'erreur ainsi qu'un message explicatif de l'erreur.

RESULTATS

Ce chapitre regroupe 4 possibilités offertes par la dernière option du menu principal. Ces possibilités ne sont accessibles qu'après la phase de calcul. Le programme vérifie notamment que les données n'ont pas été modifiées postérieurement à un calcul (utilisation de la touche <F10> en saisie de données). L'historique des opérations de mise à jour des données et de calcul est conservé d'une session à l'autre. Le calcul ne doit donc pas nécessairement être relancé avant chaque interprétation de résultats.

Résumé de la note de calcul

L'appel à cette option permet l'affichage d'une fenêtre comportant, pour chaque combinaison de charges, le numéro du chargement, son titre éventuel et le cœfficient de rupture. Par définition, si la voûte est instable en traction pour un chargement donné, le cœfficient de rupture correspondant est nul. L'appui sur une touche quelconque ramène au menu principal.

Visualisation des résultats

Il s'agit de consulter à l'écran le fichier .OUT en utilisant l'utilitaire VISU.COM (Cf chapitre 10). La touche <Escape> met fin à cette option.

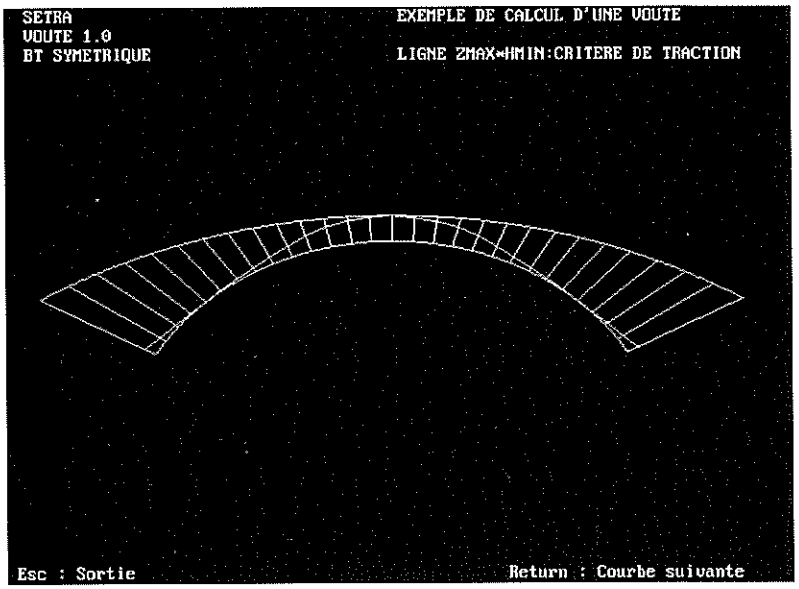
Impression des résultats

Cette option a pour effet de transférer le fichier .OUT sur toute imprimante connectée sur le port PRN du DOS.

Le listing ayant des lignes de 132 caractères de large, il appartient à l'utilisateur de configurer son imprimante pour accepter cette longueur de ligne. Il convient également de vérifier que l'imprimante interprète correctement les lettres accentuées (ou de les éviter dans le titre du calcul et les titres des chargements).

Tracé des lignes de pression

Cette option permet de représenter sur écran, traceur ou fichier tout ou partie des lignes caractéristiques des domaines de stabilité calculés pour chaque chargement. La sélection de cette option fait apparaître un deuxième niveau de menu offrant quatre possibilités . Les trois premières ont un fonctionnement identique à celles du chapitre précédent (dessin sur écran, sortie sur traceur ou fichier).



La dernière option sert à choisir les lignes de pression à tracer. La sélection des lignes à tracer se fait par un menu à choix multiple rappelant pour chaque cas de charge le nom de la courbe. Par défaut, l'ensemble des lignes est sélectionné. Cette option n'est disponible qu'après utilisation d'une des options précédentes ; elle sert généralement à limiter le nombre de dessins à effectuer sur traceur (ou indirectement sur fichier) après une première visualisation de l'ensemble des courbes sur écran.

Pendant la sortie sur écran, les lignes sélectionnées sont affichées successivement au moyen de la touche <Return> (ou le bouton gauche de la souris). La touche <Escape> (ou le bouton droit de la souris) met fin à cette option. Si l'écran est déclaré comme écran couleur, il est possible de modifier la couleur de la géométrie par la touche <F3> et la couleur des lignes de pression par la touche <F4>.

Si le nombre de lignes à tracer est important, la sortie sur traceur peut être très longue (c'est notamment le cas pour les sorties sur HP LaserJet). Quant à la sortie sur fichier, outre un temps de génération important, elle peut conduire à des fichiers très volumineux. Par exemple la sortie sur fichier de l'ensemble des lignes de pression calculées dans le manuel "Exemple d'utilisation" pour sortie différée sur HP LaserJet génère un fichier de plus de 3,5 Mo ! Si cela pose problème (notamment pour transférer le fichier sur disquette), il est possible de créer plusieurs fichiers en sélectionnant une partie seulement des lignes.

Le transfert fichier vers certains traceurs peut être réalisé au moyen de l'utilitaire PILOTE.EXE dont le fonctionnement est décrit au chapitre 10.

COMPLEMENTS

V_CALC.BAT

Il est possible, depuis le DOS, de lancer le calcul d'une voûte grâce à la procédure V_CALC suivie du nom de fichier .DON. Par exemple :

V_CALC EXEMPLE.DON + <Return>

Cela permet notamment de travailler avec une taille mémoire réduite puisqu'il suffit de 340 koctets disponibles pour lancer le calcul au lieu de 410.

Il est possible d'ajouter un paramètre supplémentaire en indiquant le nombre de lignes maximales par page du listing. Ce nombre est compris entre 40 et 80. La valeur par défaut est 60.

PILOTE.EXE

Ce programme permet le report sur traceur de dessins stockés provisoirement sur fichier. Après le lancement de ce programme, il est demandé le port d'E/S sur lequel est connecté le traceur ainsi que le nom du fichier à dessiner, puis le numéro des blocs (dessins) à transférer sur traceur. Il est ainsi possible de ne tracer qu'une partie des dessins. Il appartient à l'utilisateur de configurer correctement le port d'E/S utilisé par le traceur avant le lancement de PILOTE. Ce programme ne fonctionne qu'avec les fichiers de type ASCII ; par conséquent le transfert de fichiers binaires devra se faire directement par un ordre COPY du DOS (COPY /b nom_du_fichier PRN). Le transfert des fichiers DXF n'est évidemment pas possible avec PILOTE.

VISU.COM

VISU.COM est un utilitaire de visualisation sur écran de n'importe quel fichier ASCII, permettant un déplacement aisé à l'intérieur du fichier. Le lancement se fait par la commande VISU suivie du nom du fichier. Le déplacement à l'intérieur du fichier se fait à l'aide des touches flèches, <PgDn>, <PgUp>, <Home> et <End>.

ANNEXES

ANNEXE 1
Messages d'erreur 85

ANNEXE 2
Influence des données 89

ANNEXE 3
Liste des fichiers 91

ANNEXE 4
Questions -Réponses 95

ANNEXE 5
Bibliographie 105

LISTE DES MESSAGES D'ERREUR

Lors de l'exécution des calculs, peuvent apparaître des messages d'erreur pour signaler tel ou tel problème particulier. Le message signale un numéro d'erreur, une explication succincte de l'erreur.

La liste ci-dessous fournie l'ensemble des erreurs précédées de leur numéro. Certaines erreurs ne se produisent que si le calcul est lancé par la procédure V_CALC.BAT depuis le DOS. Les erreurs de ce type sont signalées par un astérisque.

1 Mémoire insuffisante. Reportez vous au chapitre 1 du manuel.

2 V_CALC a été lancé par le DOS soit sans préciser le nom du fichier de données soit avec un nom de fichier inexistant. *

101 Un des joints partant de l'intrados n'intercepte pas l'extrados. Prolongez l'extrados ou utilisez la commande DBOU. Vérifiez également la continuité des courbes d'extrados.

102 Le calcul obtient une épaisseur négative pour un des joints. Vérifiez les données géométriques.

103 Impossible de calculer un cercle d'extrados. Vérifiez les données géométriques.

104 Le dernier joint ne rencontre pas l'extrados. Vérifiez les données de la géométrie de la voûte. *

1056 Impossible de trouver un cercle d'extrados passant par 3 points. Vérifiez les données géométriques.

106 Impossible de trouver un cercle d'intrados passant par 3 points. Vérifiez les données géométriques.

107 Impossible de trouver un cercle d'extrados défini par un point et une tangente. Vérifiez les données géométriques.

108 Cercle d'extrados défini par un point et une tangente utilisé comme première courbe. Vérifiez les données géométriques. *

109 Impossible de trouver un cercle d'intrados défini par un point et une tangente. Vérifiez les données géométriques.

110 L'intrados de la voûte de forme circulaire ne doit pas présenter d'inversion de courbure.

111 Cercle d'intrados défini par un point et une tangente utilisé comme première courbe. Vérifiez les données géométriques. *

112 Impossible de trouver un cercle défini par un point à la clé et un autre point. Vérifiez les données géométriques.

113 Impossible de trouver un cercle d'extrados défini par une épaisseur à la clé et un autre point. Vérifiez les données géométriques.

114 Impossible de trouver un cercle défini par deux points et une tangente. Vérifiez les données géométriques.

115 Segment rectiligne d'extrados défini par un seul point utilisé comme première courbe. Vérifiez les données géométriques. *

116 Segment rectiligne d'extrados parallèle à la normale à l'intrados. Vérifiez les données géométriques.

117 Segment rectiligne d'intrados défini par un seul point utilisé comme première courbe. Vérifiez les données géométriques. *

118 Les segments rectilignes définis par deux points ne sont autorisés que pour la première courbe. *

119 Ellipse d'ouverture angulaire nulle. Modifiez les données. *

120 Incohérence détectée pendant le calcul de la géométrie et de la résistance de la voûte. Vérifiez les données. *

121 Le poids propre de la voûte est une donnée obligatoire. *

122 Le poids propre est une valeur obligatoirement positive. Le modèle défini par l'utilisateur génère un voussoir de poids négatif.

123 Une charge concentrée ne rencontre pas la voûte.

124 Une charge concentrée est parallèle à l'extrados.

125 Une charge répartie ne rencontre pas la voûte.

126 Une charge répartie possède un segment de définition et une force de directions identiques.

127 Une charge répartie est parallèle à l'extrados.

128 La cote d'un chargement de type remblai est inférieure à celle d'un point de l'extrados dans la zone d'application définie par l'utilisateur.

201 Erreur de données de résistance dans un joint possédant deux résistances (épaisseur de coque non nulle).

202 Erreur d'arrondi au moment du calcul (cas voûte + contre-voûte).

301 Erreur de données de résistance dans un joint possédant deux résistances (épaisseur de coque non nulle).

302 Erreur d'arrondi au moment du calcul (cas voûte + contre-voûte).

401 Le fichier 0.TMP n'existe pas. Relancez le calcul par V_CALC ou VOUTE. *

402 V_CALC_4 a été lancé par le DOS soit sans préciser le nom du fichier de données ou avec un nom de fichier inexistant. *

403 Le fichier 7.TMP n'existe pas. Relancez le calcul par V_CALC ou VOUTE. *

Certaines erreurs des séries 100 sont détectées au moment du calcul de stabilité ou du calcul de la géométrie.

Dans certaines configurations de données, il peut aussi survenir des erreurs de calculs mathématiques (division par zéro, racine d'un nombre négatif,...). VOUTE signale simplement l'occurrence de ce type d'erreur. L'origine en est généralement des données incorrectes particulièrement au niveau de la géométrie (rayon d'un cercle négatif ou nul,...).

Enfin l'utilisateur peut provoquer une sortie immédiate du programme avec l'émission du message "Fichier d'écrans non trouvé". Cette erreur se produit après un accés provisoire au DOS par la commande "Voûte/Accés au DOS" au moment du retour à VOUTE (par l'ordre EXIT donné depuis le DOS). L'origine peut être qu'il a été procédé, pendant l'accés au DOS, à un changement du répertoire actif sans que le répertoire d'installation de VOUTE ait été indiqué dans la variable PATH. Le programme ne retrouve plus les fichiers nécessaires à son exécution. La deuxième cause possible est un effacement accidentel, pendant l'accés au DOS, d'un fichier constituant l'application. Il convient alors de procéder à une nouvelle installation.

INFLUENCE DES DONNEES

L'influence de quelques paramètres est testée sur le premier chargement de l'exemple décrit dans le manuel EXEMPLE D'UTILISATION

Géométrie de la voûte

L'influence de la géométrie est étudiée en faisant varier le cœfficient de réduction d'épaisseur :

Cœfficient réducteur	Epaisseur à la clé	Cœfficient de rupture
1,1	0,44	5,82
1,05	0,42	5,55
1,0	0,40	5,30
0,95	0,38	5,04
0,9	0,36	4,78
0,85	0,34	4,51
0,8	0,32	4,25

Nombre de voussoirs

Le cœfficient de rupture est peu dépendant du nombre de voussoirs. Par contre, les temps de calcul y sont très sensibles :

Nombre de voussoirs	Cœfficient de rupture	Temps de calcul
10	5,32	2,3
15	5,30	3,2
20	5,29	5,3
25	5,29	6,9
30	5,28	9,7

Résistance de la maçonnerie

Dans le cas d'une voûte de résistance homogène, le cœfficient de rupture est proportionnel à la résistance :

Résistance	Cœfficient de rupture
2500	2,65
5000	5,30
7500	7,95

Symétrie du chargement

Le chargement de référence est symétrique. On peut cependant imposer qu'il soit calculé comme dissymétrique, par exemple en remplaçant la charge symétrique de remblai par la superposition d'une charge droite et d'une charge gauche. On note alors que le cœfficient de rupture est légèrement différent (5,29 au lieu de 5,3) ce qui peut s'expliquer par des précisions différentes lors des calculs itératifs. Par contre, les temps de calcul sont beaucoup plus importants en dissymétrique qu'en symétrique (12,2 au lieu de 3,2).

Conclusion

Il est nécessaire d'avoir une précision suffisante sur l'épaisseur de la voûte. Si celle-ci est mal connue, il est prudent d'adopter un cœfficient réducteur de l'ordre de 0,9. En ce qui concerne la finesse du découpage de la voûte, une quinzaine de voussoirs par demi-voûte suffisent normalement sauf dans le cas de géométrie très compliquée.

LISTE DES FICHIERS

Les fichiers suivants sont présents sur la ou les disquettes d'installation :

INSTALLE.EXE
programme d'installation. Non transféré sur disque dur.

VOUTE.EXE
module principal de pilotage.

VOUTE.CO
bibliothèque pour écran couleur.

VOUTE.NB
bibliothèque pour écran noir et blanc.

V_SWP.COM
utilitaire d'enchaînement des programmes optimisant l'occupation mémoire.

V_CALC.BAT
procédure de lancement des programmes de calcul.

V_CALC_0.COM
comptage des cas de charge, affichage de l'écran CALCUL.

V_CALC_1.EXE
calcul et édition de la géométrie, calcul des cas de charge.

V_CALC_2.EXE
calcul de stabilité.

V_CALC_3.EXE
édition des résultats.

V_CALC_4.COM
regroupement des éditions.

V_CALC_5.EXE
version de v_calc_1.exe limitée au calcul de la géométrie.

V_ALERT.COM
affichage d'un message d'alerte.

EXEMPLE.DVO
fichiers de données VOUTE.

EXEMPLE.DON
fichiers de données V_CALC.

TRACE.EXE
exécution des sorties traceur.

DESSIN.EXE
exécution des sorties dessin.

ERREUR.LST
liste des erreurs.

VISU.COM
utilitaire de visualisation de fichiers ASCII.

Fichiers créés pendant l'exécution :
Le fichier VOUTE.PAR créé lors de l'exécution de VOUTE permet de conserver le paramétrage du type d'écran et du traceur. Ce fichier est conservé dans le répertoire d'installation de VOUTE.

Les données sont stockées dans les fichiers de suffixe .DVO et .DON. Les fichiers résultats ont le suffixe .OUT. Pendant l'exécution des modules de calcul, le programme utilise des fichiers temporaires de suffixe .TMP.

En fin d'exécution, les fichiers .TMP sont effacés.

Les fichiers .OUT peuvent être très volumineux. Il appartient à l'utilisateur de supprimer les fichiers occupant inutilement le disque dur. Il en est de même pour les fichiers dessin qui sont créés dans le même répertoire que les fichiers de données.

QUESTIONS REPONSES

Quel est le domaine d'emploi de VOUTE ?

Le programme VOUTE est destiné à étudier la stabilité, dans le sens longitudinal, d'une voûte de géométrie connue sous des combinaisons de charges statiques.

Faisant un minimum d'hypothèses sur le fonctionnement mécanique du matériau constitutif de la voûte, il utilise une méthode de calcul à rupture.

Son domaine privilégié d'utilisation est l'étude de la stabilité des voûtes en maçonnerie sous chargement exceptionnel. Un tel cas de charge se présente notamment dans les circonstances suivantes :

- Passage d'une charge anormalement lourde
- Décaissement important de la voûte spécialement lorsqu'on envisage une phase de déblaiement avec un chargement asymétrique de la voûte.
- Elargissement important de l'ouvrage conduisant à un surcroît sensible de poids et de charges roulantes.

VOUTE est également utilisable dans les cas suivants :

Etude de la stabilité des piles et des fondations. Le calcul fournit, entre autre, les valeurs minimales et maximales de la poussée sous chaque cas de charge, ce qui constitue l'enveloppe des efforts possibles sur les appuis.

Repérage des joints soit fortement comprimés, soit susceptibles de présenter une fissuration. Le repérage de ces joints peut être un élément d'explication de l'état réel d'une voûte.

Mesure de l'efficacité d'une contre-voûte "adhérente". Le monolithisme voûte en maçonnerie-contre-voûte doit être assuré par des aciers de couture de l'interface correctement dimensionnés. Il importe en outre que la partie d'effort de compression reprise par la contre-voûte de renfort soit transmise correctement aux fondations de l'ouvrage. Enfin, il est utile de rappeler qu'une des hypothèses de calcul est la non résistance à la traction du matériau : le dimensionnement du ferraillage de la contre-voûte est en dehors des possibilités offertes par VOUTE.

VOUTE n'est pas utilisable dans les cas suivants :

Etude des déformations imposées. La prise en compte de mouvements d'appui nécessite des hypothèses supplémentaires difficilement justifiables sur le comportement rhéologique du matériau et sur l'historique des chargements. L'étude des effets thermiques sur la voûte présente les mêmes limites.

Voûte de faible largeur pour laquelle l'effet des tympans vis-à-vis de la stabilité longitudinale est prépondérant.

Ouvrage dans lequel le matériau de remplissage est suffisamment rigide pour reprendre une part non négligeable des efforts (par exemple lorsque le matériau de remplissage est remplacé par du gros béton). VOUTE autorisant pour chaque joint deux valeurs de résistance, il serait tentant d'utiliser cette possibilité dans le type d'ouvrage. Toutefois, l'hypothèse des joints de rupture plans pourrait ne pas être acceptable surtout si l'épaisseur de remplissage aux reins est importante.

Effet d'un renforcement par contre-voûte non adhérente.

Voûte très surbaissée avec risque de rupture par glissement de joint. Cette version du programme ne permet pas la prise en compte de l'effort tranchant dans le cœfficient à rupture.

L'effet de l'effort tranchant est dans la plupart des cas négligeable. Le calcul fournit cependant l'inclinaison de la résultante des efforts sur chaque joint. Il suffit généralement de vérifier que la résultante reste proche de la normale à la section.

Etablissement d'une répartition de contraintes dans la voûte.

Ouvrage voûté avec un matériau résistant à la traction.

4.2 Comment obtenir les données nécessaires ?

Le résultat du calcul est étroitement lié à la géométrie de la voûte. Il est exclu d'envisager un calcul VOUTE si on n'a pas une idée assez précise de la géométrie de la partie résistance de la voûte.

Si le relevé de l'intrados ne présente pas de difficulté particulière, la connaissance de l'extrados nécessite des investigations complémentaires. L'utilisation des différentes formules donnant les épaisseurs de voûte à la clé ou aux reins en fonction de la portée ne fournit que des valeurs indicatives. A défaut d'un dossier d'archive fiable, seuls des sondages permettent d'avoir ces éléments. A la clé, un sondage manuel est suffisant ; il permet en outre d'affiner les connaissances concernant la nature du matériau de remplissage et l'état de la maçonnerie. Aux reins de la voûte, un sondage destructif avec enregistrement des paramètres de forage suffit pour connaître l'épaisseur du remblai et de la voûte. Des sondages carottés de diamètre plus important permettent d'envisager des essais mécaniques sur les matériaux.
Pour certains matériaux de remplissage, un simple sondage destructif peut s'avérer insuffisant pour repérer la transition du remblai à la maçonnerie. Un sondage carotté ou la mise à nu localisée de l'extrados est alors insdispensable.

La mesure de l'épaisseur de la voûte à la clé et aux reins permet, sauf cas exceptionnels, de tracer une courbe d'extrados acceptable. Toutefois, il est conseillé de réduire l'épaisseur résistante de la voûte par un cœfficient réducteur d'épaisseur si la reconnaissance effectuée ne permet pas de fixer avec certitude l'extrados de la voûte.

La résistance de la maçonnerie à la compression a également un effet direct sur le cœfficient de rupture : dans le cas d'une voûte de résistance homogène, le cœfficient de rupture est même strictement proportionnel à la résistance de la maçonnerie.

La meilleure solution consiste naturellement à réaliser des essais sur la maçonnerie, c'est-à-dire sur une éprouvette comportant à la fois des pierres et du mortier de hourdage. Ceci impose un diamètre important de carottage.

La connaissance de la nature de la pierre et mieux de sa résistance propre permet déjà une certaine approche de la valeur de la résistance de la maçonnerie proprement dite (Cf chapitre 4).

4.3 Quels sont les cas de chargements à envisager?

Il est nécessaire de faire un calcul de l'ouvrage à vide donc normalement soumis au poids de la maçonnerie et au remplissage. La mise en parallèle du cœfficient de rupture obtenu sous ce cas de charge et de l'état de la voûte apporte un élément précieux à l'interprétation des autres calculs.

Il en est de même pour tous les cas de charges "permanentes" (phase de décaissement, modification du poids propre).

Pour l'étude des charges roulantes, l'hypothèse d'un chargement direct de l'extrados à la verticale des charges appliquées est trop défavorable. On tient compte de l'effet répartiteur du matériau de remplissage. Cet effet est, de façon classique, modélisé par un étalement des charges à 45° aussi bien dans le sens longitudinal que transversal. Par précaution, il est toutefois recommandé de limiter l'épaisseur du "matelas" de répartition à la différence de hauteur entre le niveau de la chaussée et la cote de l'extrados à la clé.

Soit P la valeur de la charge rectangulaire, L et l les dimensions de l'impact sur la chaussée et h_r l'épaisseur de remblai à la clé. Le module de la charge répartie à appliquer est alors :

$$Q_r = P/((L + 2xh_r)x(l + 2xh_r))$$

La longueur effective de l'impact est dans ce cas $L+2xh_r$.

Cette règle doit évidemment être modulée pour tenir compte soit d'une largeur de voûte insuffisante (largeur entre nus internes des tympans < $l + 2xh_r$) soit de la présence de voûte d'élégissement dont les descentes de charge peuvent être assimilées à des efforts concentrés.

En ce qui concerne la position longitudinale des charges, il est prudent d'étudier un chargement symétrique autour de la clé et une position des charges n'affectant qu'une demi-voûte. Il n'existe pas de règle générale pour choisir a priori l'effet le plus défavorable.

Les coefficients de pondération influent sur le cœfficient de rupture. Toutefois, il y a lieu de tenir compte des éléments suivants :

Le programme affecte du même cœfficient de pondération l'ensemble des charges d'un type donné. Si on souhaite pondérer de façon sélective une partie seulement des charges

unitaires, il faut en tenir compte manuellement dans la définition de celles-ci.

Si le cœfficient de rupture est inversement proportionnel à un cœfficient majorateur appliqué à l'ensemble des charges, il n'y a pas de lien de linéarité entre ce même cœfficient et l'un quelconque des coefficients de pondération (les autres étant supposés constants).

Comment estimer la résistance de la maçonnerie ?

Le cœfficient de rupture est directement proportionnel à la résistance de la maçonnerie . La valeur de la résistance n'a pas d'incidence sur la stabilité de la voûte en traction; par contre, elle intervient très sensiblement sur les valeurs extrémales des poussées vis-à-vis du critère de compression.

La valeur à introduire est la résistance "caractéristique" du matériau hétérogène qui constitue l'association de pierres (plus rarement de briques) et de mortier.

La meilleure solution pour estimer cette valeur consiste naturellement à la mesurer. Ceci impose une taille importante de carottage ainsi que des précautions lors du prélèvement. Le nombre d'éprouvettes et le choix de la zone de prélèvement dépendent en outre de l'hétérogénéité de l'ouvrage.

A titre de première approche, on peut procéder à une estimation de la résistance de la maçonnerie en fonction de la résistance de la pierre plus facile à mesurer et de la qualité des joints (état du mortier, épaisseur, ...).

Le tableau ci-dessous est extrait des Recommandations Internationales pour les structures en maçonnerie. Il permet de fournir une première estimation de la valeur de la résistance à introduire dans les calculs en tenant compte de la qualité et de l'épaisseur du mortier de hourdage (M4 représente un mortier épais et/ou de mauvaise qualité, M1 correspond à un mortier en très bon état).

Résistance caractéristique à la compression simple des pierres (MPa)	Résistance caractéristique à la compression simple de la maçonnerie suivant les mortiers (MPa)				Résistance moyenne à la compression simple des pierres (MPa)
	M4	M3	M2	M1	
2,0	1,3	1,4	1,4	1,4	2,5
5,0	2,9	3,3	3,4	3,5	6,5
7,5	3,5	4,1	4,5	4,9	10,0
10,0	4,1	4,7	5,3	6,2	13,0
15,0	5,1	5,9	6,7	8,2	20,0
20,0	6,1	6,9	8,0	9,7	26,5
30,0	7,2	8,6	10,2	12,0	40,0
40,0	8,1	10,4	12,0	14,3	53,0
60,0			16,0	18,8	80,0

Comment interpréter les résultats?

Le listing fourni par VOUTE comprend les parties suivantes :

Le rappel des données géométriques.

Pour chaque chargement :

- le rappel des charges,
- l'équivalence entre ces charges et les efforts appliqués après pondération à chaque voussoir,
- la géométrie du domaine de stabilité en traction,
- les points de passage d'un certain nombre de lignes caractéristiques de ce domaine (notamment l'enveloppe Hmin-Hmax de la valeur de la poussée à la clé),
- la ligne optimale fournissant le cœfficient de rupture pour le chargement considéré,
- éventuellement des lignes caractéristiques du domaine T' de stabilité vis-à-vis du critère de traction-compression.

Un résumé des calculs sous la forme de la liste des coefficients de rupture.

Le paramètre important est bien entendu le cœfficient de rupture minimal. Si la voûte est, sous un cas de charge, déclarée instable en traction, ce cœfficient est nul. Un cœfficient de 3 doit être considéré comme admissible pour des pondérations des charges maximales ou minimales.

Cependant, il convient d'apprécier la possibilité d'avoir une influence non négligeable de l'effort tranchant. A cet effet, il y a lieu de relever la valeur du glissement pour la ligne optimale vis-à-vis du critère de compression et pour le cas de chargement

le plus défavorable ; si cette valeur est inférieure au glissement limite (de l'ordre de 0,5 dans les cas courants), le cœfficient de rupture réel peut être surévalué.

Enfin le rapport entre le cœfficient de rupture à vide et le cœfficient de rupture en charge est un élément précieux pour estimer le risque de "fatigue" de la maçonnerie sous des charges lourdes répétées. On peut également étudier cette question en déterminant le facteur multiplicatif à appliquer aux charges roulantes pour atteindre le cœfficient de rupture limite.

Comment tenir compte de l'état de la voûte ?

L'état de la voûte peut être intégré dans les calculs par le biais de la résistance à la compression de la voûte ou encore en affectant la géométrie d'un cœfficient de réduction globale d'épaisseur. On peut également tenir compte d'un défaut local (fracture importante, chute de pierres,...) en faisant intervenir une résistance fictive sur un joint (contre-voûte de résistance très faible pour simuler l'effet d'une fracture importante en intrados).

Comment étudier la stabilité des appuis des voûtes ?

Il s'agit ici de la stabilité des appuis et non des fondations de la voûte. Les appuis sont des ensembles de maçonnerie de forme particulière et soumis à leur poids propre, aux réactions d'appui des voûtes adjacentes (non nécessairement symétriques) et, pour les culées, à l'action des remblais.

Dans le cas d'une culée, le problème est résolu en intégrant la

culée dans la géométrie de la voûte de calcul. La fixation d'un cœfficient de poussée correct pour les remblais est fondamentale.

Dans le cas d'une pile, il convient théoriquement d'étudier sa stabilité sous l'ensemble des réactions d'appui possibles de la part des deux voûtes adjacentes.

Ce calcul théorique conduit à envisager une infinité de cas de chargement de la pile. En pratique, on se contente de vérifier la stabilité de la pile sous l'effet des réactions d'appui correspondant aux lignes de pression caractéristiques fournies par le programme VOUTE pour chacune des arches adjacentes. Pour chacun des couples possibles de réactions d'appui de l'arche de gauche et de l'arche de droite, on vérifie sur une famille de joints horizontaux dans la pile que le taux de contrainte (Cf chapitre 3) reste inférieur à la limite admissible (soit la résistance caractéristique de la maçonnerie divisée par trois et avec une pondération maximale des charges).

De nombreuses piles de pont sont constituées d'un parement de bonne qualité rempli d'une maçonnerie d'une qualité moindre. Le calcul du taux de contrainte doit alors intégrer cette hétérogénéité.

BIBLIOGRAPHIE

COULOMB C.A. (1773)
Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statiques relatifs à l'architecture. Mémoires de Mathématique et de Physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences par divers Savants et lus dans ses Assemblées, Vol 7 1773 pp. 343-382 Paris

DELBECQ J.M. (1983)
Analyse de la stabilité des ponts en maçonnerie par la théorie du calcul à rupture (Thèse E.N.P.C. Paris)

DELBECQ J.M. (1982)
Les ponts en maçonnerie (SETRA)

MERY E. (1840)
Sur l'équilibre des voûtes en berceau (Annales des Ponts et Chaussées 1840 I, pp. 50-70)

SALENCON J. (1978)
Calcul à la rupture et analyse limite (Cours E.N.P.C. Paris)

SEJOURNE P. (1913)
Grandes Voûtes (Bourges)