

ArcMac 2.2

Manuel de référence

Index de l'aide du programme ArcMac version 2.2	3
Les fondements de la méthode	8
Le fonctionnement général de l'application	10

Index de l'aide du programme ArcMac version 2.2

Voir aussi [Le fonctionnement général de l'application](#)

Ce programme est destiné à l'étude de la stabilité des arcs, voûtes et coupoles en maçonnerie.

Les fondements de la méthode utilisée sont consultables [ici](#)

Vocabulaire

On appelle :

- voûte une construction cintrée ayant une fonction porteuse
- arc l'élément structurel porteur indépendant ou constituant une voûte
- voussoir ou claveau une pierre taillée constituant un des éléments de l'arc
- naissances les deux joints d'extrémité de l'arc, qui prennent appui sur les supports de l'arc
- clé le point haut de l'arc, cad le point de tangence de la plus haute horizontale, ou le point de rebroussement pour un arc d'ogive ; la clé d'arc peut se trouver au milieu du claveau de clé

Données de calcul

NB : le séparateur décimal est le point.

Niveau supérieur de l'ouvrage fini

Tous les coordonnées et niveaux définis sont dans un même repère, dont la position est indifférente.

Ce niveau est le niveau haut du remplissage, considéré constant ; s'il n'est pas constant, on fixe le niveau fini au plus bas niveau, et on complète par des charges additionnelles.

Il doit être au dessus de l'extrados de la clé de voûte ; la distance entre l'extrados de l'arc et le niveau supérieur de l'ouvrage fini est la hauteur de diffusion.

Les charges additionnelles sont appliquées au niveau supérieur de l'ouvrage fini et diffusées dans la hauteur de diffusion avec un angle de diffusion variable (voir plus bas), puis descendues verticalement jusqu'à l'extrados de la voute.

L'absence de diffusion dans les reins (ou "tas de chargement") peut se discuter, mais ce coin de matière est dans un état d'équilibre complexe qu'on a choisi de ne pas expliciter.

A noter que le poids propre de la matière dans cette hauteur de diffusion ne sera pas diffusé, tout comme une charge additionnelle appliquée sur toute la surface.

Cette valeur est sans intérêt si l'arc ne porte que son poids.

Poids volumique du remplissage

Le poids du remplissage peut différer de celui de la pierre de l'arc

Poids volumique de la pierre de l'arc

Sans commentaire

Largeur de l'arc

On peut indiquer la largeur réelle ou une largeur fictive (par ex 1 m). C'est une valeur par défaut qui sera utilisée en l'absence de valeur de largeur dans la liste des joints.

Creux de joint

Permet de prendre en compte soit un lissage en creux, soit une dégradation superficielle du mortier de joint.

On indique la profondeur du creux du joint de mortier entre pierres ; la hauteur de l'arc sera réduite de la profondeur, la largeur par défaut de 2 x profondeur.

Résistance de la maçonnerie

On entre la valeur de la résistance de la maçonnerie telle que définie dans l'EC6. ARCMAC vérifie les contraintes aux joints, tels que définis dans la liste des joints.

Cette liste peut ne pas correspondre à la réalité des joints de claveaux et constitue alors la définition des points de calcul ; en effet, l'EC6 n'impose pas la vérification des contraintes aux joints.

Coefficients de pondération des charges

On entre les coefficients de pondération pour les charges permanentes et pour les charges d'exploitation (en général 1.35 et 1.5)

Nombre de claveaux neutralisés

Pour étudier le fonctionnement de l'arc, il peut être utile de neutraliser certains claveaux à l'origine ou à l'extrémité de l'arc, qui empêchent de trouver une solution.

Par ailleurs, ces claveaux peuvent se trouver bloqués par des tas de chargement ou d'autres dispositifs et être ainsi considérés comme des culées d'arc.

Ces valeurs sont sans incidence sur la liste des joints et des charges sur claveaux, qui doivent rester identiques quel que soit le nombre de claveaux neutralisés.

Liste des joints

La liste des joints peut être tapée, mais est en général renseignée par copier-coller à partir d'un tableur.

On peut aussi engendrer rapidement un arc plein cintre à partir de ses rayons, ou décalquer les lignes d'intrados et d'extrados en important une image.

Il est également possible d'importer des listes de coordonnées, et d'importer la liste de points d'une polyligne sélectionnée dans Autocad (Outils, Renseignements, Liste, sélectionner les lignes affichées, puis ctrlC).

Une bonne pratique est de rentrer dans cette liste les vrais joints de l'ouvrage. En effet, les calculs ne sont faits que sur les joints, et les joints réels sont les points faibles de l'arc, car le calcul suppose qu'ils n'ont pas de résistance en traction, alors que la pierre peut supporter dans sa masse un peu de traction.

Si on le souhaite, on peut ajouter des joints intermédiaires fictifs au sein d'un claveau, avec toutefois la limitation dite ci-avant.

La liste comprend un joint par ligne ; la ligne contient les coordonnées intrados et extrados, et optionnellement la largeur nette du joint (le creux de joint ne sera pas déduit de cette valeur) ; les valeurs sont séparées par des espaces :

<Xintrados> <Zintrados> <Xextrados> <Zextrados> [largeur nette] [;commentaire]

L'arc est décrit de la gauche vers la droite (X croissant).

Il DOIT comprendre un joint de clé (réel ou fictif), qui est le plus haut des joints de l'arc (le niveau d'un joint est défini comme le niveau du milieu du segment de joint).

Un arc dont un des appuis serait le point haut sera refusé.

La largeur variable permet de modéliser un quartier de coupole. Dans ce modèle, on considère que les effets de ceinture sont négligeables, par exemple à cause d'un défaut de harpage des lits.

NB : On peut neutraliser une ligne en la commençant par ;.

Liste des charges

Des charges additionnelles peuvent être introduites dans le calcul en complément du poids propre de l'arc et du remplissage.

Le format est le suivant (1 charge par ligne) :

R G/Q P/U <abs> <charge totale> [<abs.fin>] [<ang.diff.>] [;commentaire]

Définit des charges appliquées au niveau du sol fini (cas d'un pont ou d'une voûte remplie de terre) ; les charges sont diffusées jusqu'au niveau de la clé de voûte, puis appliquées verticalement aux claveaux situés à l'aplomb.

R : charges sur remplissage

G/Q : charge permanente ou exploitation (sélectionne le coefficient de pondération applicable),

P/U : charge Ponctuelle ou Uniforme,

<abs> : position de la charge ponctuelle ou position de départ de la charge répartie uniforme,

<charge totale> : valeur de la charge ponctuelle ou valeur totale de la charge répartie uniforme NON pondérée, positive vers le bas,

<abs.fin> : abscisse de fin de la charge répartie uniforme,

<ang.diff> : angle de diffusion de la charge en degrés, entre 0 et 80°, par défaut 45°, 0° = pas de diffusion ; pour une charge ponctuelle, un angle minimum de 5° est appliqué

C G/Q H/V <liste d'efforts Horizontaux ou Verticaux à appliquer au centre de chaque claveau> [;commentaire]

Définit des charges à appliquer au centre de chaque claveau ; permet par exemple d'introduire des charges de voûtes ou nervures supportées par l'arc calculé.

C : charges sur claveaux

G/Q : charge permanente ou exploitation (sélectionne le coefficient de pondération applicable),

H/V : sens de l'effort ; V est positif vers le bas, H est positif en direction du premier claveau (claveau de gauche)

La liste qui suit contient une valeur par claveau (éventuellement à 0), y compris pour les claveaux neutralisés.

H < poids du m² de mur > < espace(s) > < liste des points définissant l'héberge : X Y X Y ..., sép. espace(s) >

Définit une héberge, c'est à dire la géométrie de la tête d'un mur chargeant l'arc. Les coordonnées sont en m.

Cette charge est considérée comme permanente.

Le niveau supérieur de l'ouvrage fini peut dès lors ne pas avoir de sens ; dans ce cas, on mettra à 0 le poids volumique du remplissage

NB : On peut neutraliser une ligne en la commençant par ;.

Paramètres de calcul

Ces paramètres servent à régler le fonctionnement du programme, qui fonctionne par essais successifs de construction d'un funiculaire, en faisant varier différents paramètres :

- le nombre de points de passage au 1er joint (à gauche) : la 1ère assise est divisée en segments égaux (n+1), le funiculaire est construit à partir de chaque point de découpe,
- le nombre de pas sur l'effort normal : on calcule une plage réaliste d'effort normal (en calculant le moment isostatique des efforts à mi-portée, et en le divisant par la flèche de l'arc, prise en bas et en haut de clé), et on construit différents funiculaires en faisant varier l'effort normal par pas entre la valeur la plus faible et la plus forte,
- les coefficients d'amplification (> 1) / réduction (< 1) : les bornes précédemment calculées de la variation de l'effort normal peuvent être modulées au moyen de ces coefficients (le calcul étant fait par essais et erreurs, agrandir la plage d'essais peut permettre d'accrocher des solutions, principalement en cas de chargements ou de formes atypiques).

Le nombre minimum de joints sert à faire un rappel, mais est sans conséquence sur le calcul.

Afficher toutes les courbes sert à comprendre les raisons d'un échec de calcul ; en fonctionnement normal, dès que le funiculaire sort d'un joint, ou présente une contrainte trop forte, sa construction est abandonnée, et il n'est pas tracé ; en cochant cette case, les funiculaires en échec sont aussi tracés.

Interprétation des résultats

Le programme calcule les différents funiculaires d'effort possibles en utilisant 2 paramètres :

- variation de la réaction d'appui horizontale gauche dans une plage réaliste,
- variation du point de passage de la réaction d'appui résultante le long du joint d'appui gauche.

Pour chaque funiculaire, il calcule la contrainte sur chaque joint ; si le funiculaire sort de la section, ou si la contrainte dépasse la valeur fixée, le funiculaire est éliminé.

Pour chaque funiculaire retenu, il enregistre la valeur maximale de la contrainte ; en fin de calcul, il affiche cette contrainte pour les deux funiculaires extrêmes.

Les réactions horizontales correspondantes sont également affichées.

Les autres valeurs calculées correspondent au calcul des charges sollicitantes, et permettent de vérifier les données d'entrée.

Les tracés des funiculaires retenus sont affichés en superposition de la structure.

La plage de contraintes, ou de réactions d'appui, ou le nombre de funiculaires trouvés sont représentatifs de la sensibilité de la solution, et de sa fiabilité.

La solution retenue correspond à celle d'énergie minimale, calculée en sommant $N^2.L/S$, où N est l'effort normal dans le claveau, L sa longueur, et S la surface comprimée.

Informations de version

La version 2.2 comporte deux modifications :

- le choix des couleurs de dessin,
- le mode d'application des charges ; désormais les charges de remblai (charges implicites et charges R) ou d'héberge (charges H) sont appliquées à l'extrados de l'arc (elles étaient précédemment appliquées à l'axe).

Les fondements de la méthode

Ce programme est basé sur les principes développés dans le document "Les Ponts en Maçonnerie" rédigé par Monsieur JM Delbecq et édité par le SETRA.

Le document est disponible en téléchargement sur le site du SETRA.

La méthode est du type "à la rupture", c'est à dire qu'elle borne le domaine de résistance de l'arc par des valeurs minimales garanties, la résistance effective pouvant être supérieure.

L'algorithme utilisé consiste à construire les lignes des centres de pression en fonction de différentes hypothèses de position du centre de pression en 3 points "clé" qui sont :

- la clé de l'arc,
- les naissances de l'arc.

(cet algorithme n'est PAS celui du programme du SETRA, et ne produit probablement pas les mêmes résultats ; ils ont juste comme point commun d'identifier les épures de MERY acceptables).

Cette méthode vient du fait qu'un arc sans point d'articulation est hyperstatique de degré 3.

La méthode usuelle pour lever l'hyperstaticité est d'utiliser une méthode de calcul de type "éléments finis".

Or cette méthode est peu compatible avec les caractéristiques des matériaux employés, et surtout le mortier de chaux couramment employé dans les maçonneries anciennes ; les caractéristiques spécifiques difficilement compatibles avec les moyens de calculs actuels sont :

- absence de résistance à la traction des mortiers et des interfaces,
- fluage et lessivage des joints,
- incertitude sur l'homogénéité des paramètres des matériaux.

La méthode utilisée dans ArcMac consiste à rechercher les lignes de pression passant de manière acceptable dans tous les joints de mortier, et dépendant de :

- 1 - la valeur de la poussée horizontale aux appuis (naissances),
- 2 - la position du point de passage de la poussée globale (V+H) aux appuis.

Un passage acceptable dans un joint se caractérise par :

- une position se situant dans l'emprise du joint,
- une contrainte acceptable dans le joint.

La contrainte est constante et calculée par $\sigma = N / (b * d * 2)$, où :

- N est l'effort normal,
- b est la largeur de la voute,
- d est la distance du centre de pression au bord le plus proche, déduction faite du creux de joint.

L'algorithme consiste à calculer une limite supérieure de la valeur de la poussée, qui serait celle de l'arc à 3 articulations où les articulations des naissances sont placées à l'extrados de l'arc et celle de la clé à l'intrados.

On calcule ensuite une "quasi limite inférieure" en inversant les positions des articulations ; cette valeur sert à déterminer l'incrément de diminution de la poussée.

Sur le joint d'appui gauche, on définit un ensemble de points de passage de la ligne de pression (actuellement 7), de haut en bas du joint.

Pour chaque point de passage, on fait ensuite varier la poussée jusqu'au premier refus par excès de contrainte ou sortie de la section.

Le fonctionnement général de l'application

Voir aussi [Index de l'aide](#)

Différentes applications sont basées sur le même schéma standard d'application à onglets, où chaque onglet contient un calcul spécifique, et présente les mêmes zones de saisie. Les caractéristiques communes de comportement sont la prise en charge du défaire/refaire et la modification simultanée d'onglets multiples, à l'identique du comportement d'un tableur.

Pour démarrer une nouvelle étude, choisir Fichiers|Nouveau, ou cliquer sur le bouton montrant une page blanche.

L'onglet PG devient accessible et affiche une zone de texte libre.

Pour ouvrir un onglet de calcul, clic droit sur l'onglet PG, puis choisir Ajouter ; après avoir saisi le nom souhaité du nouvel onglet, la page de saisie des données s'affiche.

Selon les cas, cette page affiche aussi les résultats, mais peut aussi contenir plusieurs onglets, généralement : Données, Dessin, Résultats.

Ces onglets comportent un bouton permettant la copie dans le presse-papiers, l'usage étant d'importer les résultats dans un traitement de texte.

