VOUTE Python 1.2

Calcul à la rupture des voûtes en maçonnerie et des ponts à plusieurs arches. VOUTE Python reprend le programme SETRA VOUTE1 (IBM, 1983) et toutes les possibilités de la version PC VOUTE 1.0 (1993), et les étend : ouvrages à plusieurs arches avec piles et culées, programmation linéaire et mécanisme de ruine, facteur sur des actions choisies, approche cinématique, glissement, diffusion des charges dans le remblai, coefficients de sécurité (coefficient de rupture, facteur sur les charges variables, coefficient géométrique d'Heyman), piles et culées de forme quelconque (faces brisées, naissances inclinées, bloc en tête).

Tout est écrit en Python (avec la bibliothèque numpy) : le moteur de calcul (dossier `voute`), l'interface graphique (dossier `interface`) et les outils. Il n'y a pas de programme compilé : le code est lisible et modifiable par les utilisateurs.

Ce qui change par rapport à la version PC de 1993 :

- **géométrie exacte** : les courbes sont calculées exactement (intersections, aires et efforts intégrés sur les courbes elles-mêmes), sans les approximations de la version de 1993 (découpage en 200 points, raccord des courbes d'extrados depuis le dernier point calculé, ellipse par polygone) ;
- **joints numérotés de 0 (clé) à N**, sans le voussoir fictif de 1993 : le joint k de la version de 1993 ($k \geq 2$) est le joint $k - 1$ de VOUTE Python. Les zones de résistance des fichiers gardent la numérotation de 1993 et sont traduites automatiquement ; les rotules du mode TD se donnent dans la numérotation de VOUTE Python ;
- les écarts avec la version de 1993 s'expliquent par la géométrie exacte et par l'optimiseur de 1993, qui ne trouve pas toujours la ligne optimale des chargements dissymétriques ; ils sont détaillés dans `VALIDATION.md`. Le plus important : un piédroit vertical qui finit exactement à l'abscisse de fin du remblai ne reçoit pas la poussée (règle de 1993, conservée ; la version de 1993 inclinait légèrement ce piédroit au raccord des courbes, et il recevait alors la poussée), ce qui divise à peu près par deux le coefficient des voûtes ALLIE*.

Coefficients de sécurité (version 1.1)

Chaque chargement reçoit quatre coefficients, qui répondent à quatre questions différentes ; ils ne sont pas ordonnés entre eux et aucun ne remplace les autres. La note les résume à la fin (tableau « COEFFICIENTS DE SECURITE » et paragraphe « SIGNIFICATION ET LIMITES DES COEFFICIENTS ») ; l'interface les affiche en colonnes, avec une bulle d'aide par coefficient et la fiche Aide > Coefficients de sécurité. Le détail est dans `notices\Note_technique_coefficients_securite.pdf`.

Coefficient	Définition	Limites et repères
FM, coefficient de rupture	Facteur sur toutes les charges pondérées, poids propre compris ; résistance finie, glissement si le frottement est donné. C'est aussi le facteur sur les résistances : l'ouvrage tient avec σ / FM (la note donne ces résistances nécessaires).	Mesure l'écrasement, pas la marge vis-à-vis d'un mécanisme (infini si σ l'est). Repère de 1993 : 3 sous charges pondérées ELU.
λ, facteur sur les charges variables	Facteur sur les seules actions multipliées (`--variable`, cases « Multiplier », ligne `VARIABLE`), les autres fixes ; résistance finie.	Dépend du choix des actions ; non défini sans action multipliée ; $\lambda < 1$: ruine sous le chargement.
λ∞, facteur à résistance infinie	λ pour une maçonnerie infiniment résistante, glissement vérifié comme pour λ.	$\lambda \leq \lambda_\infty$, l'écart est dû à l'écrasement ; infini si les actions multipliées seules ont une ligne de pression dans la maçonnerie.

Coefficient	Définition	Limites et repères
FS géo, coefficient géométrique d'Heyman	Épaisseur réelle / épaisseur minimale d'un ouvrage concentrique qui contient encore une ligne de pression ; charges inchangées, résistance infinie, ni traction ni glissement (pour un ouvrage : toutes les sections, arches, piles, culées, fondations).	≥ 1 : stable en traction ; 2 : ligne dans la moitié centrale ; 3 : dans le tiers central. Ne tient compte ni de la résistance, ni du glissement, ni d'une augmentation des charges.

FS géo est calculé exactement (méthode de Dinkelbach, quelques programmes linéaires), avec la ligne optimale géométrique (la ligne de pression la mieux centrée) et les joints ou sections limitants, où elle touche l'ouvrage réduit. Pour un ouvrage, FM est calculé aussi pour les chargements avec `VARIABLE` ; avec un convoi, cela multiplie leur durée de calcul par 3 à 6.

Piles et culées polygonales (version 1.2)

Les faces d'une pile ou d'une culée peuvent être décrites par leurs sommets (lignes `FACE`) : fruits variables, retraites, semelles débordantes, culées en L avec talon, gradins, encorbellements. Les arches peuvent finir par un joint de naissance incliné (sommier d'un arc surbaissé), posé directement sur la pile ou la culée, et deux naissances voisines peuvent être à des cotes différentes ; la tête de l'appui au-dessus de la plus basse naissance forme alors un seul bloc. Un bloc de maçonnerie peut être ajouté en tête d'une pile ou d'une culée (ligne `BLOC` : tête de pile montant entre les reins, massif de culée) : monolithique, il prend avec lui les voussoirs qu'il recouvre. Enfin, le poids des terres qui reposent sur la face arrière des culées (prisme sur une face à fruit, terres sur un talon) est maintenant compté, comme dans la méthode des murs-poids.

Un appui à faces droites, à naissances horizontales à la même cote et sans bloc est calculé exactement comme avant. Le poids des terres sur la face arrière change les résultats des culées à fruit arrière qui ont des terres ; sur les ouvrages fournis, l'écart est faible (le coefficient de l'ouvrage est le plus souvent gouverné par les arches). Avec ces modèles, VOUTE Python retrouve Voute_jf V30 sur la série des 16 ponts (λ à $2{\cdot}10^{-6}$ près, essieu à $5{\cdot}10^{-5}$ près ; voir `VALIDATION.md`). Dans l'interface : onglet Piles et culées, bouton « Faces et bloc de l'appui… ».

Interface graphique

Double-cliquer sur `VOUTE_Python.exe` (ou faire glisser un fichier `.DON` ou `.VMA` dessus). Aucune installation n'est nécessaire : le dossier `interface\python` contient un Python 3.13 autonome pour Windows (distribution « embeddable » de la Python Software Foundation, avec Tcl/Tk 8.6) et la bibliothèque numpy.

L'interface permet de :

- saisir ou modifier toutes les données (onglets Projet, Géométrie, Résistances, Chargements) et les enregistrer au format `.DON` de la version 1993 ;
- voir la voûte et les charges du chargement choisi, redessinées à chaque modification (la géométrie est construite par le moteur de calcul : le dessin est exactement celui du calcul, et les erreurs de données s'affichent sous le dessin) ;
- être guidé dans la saisie : survoler un en-tête de colonne ou une cellule affiche la signification de la valeur et son unité, le bouton « ? » de chaque tableau et le bouton « Schéma des charges… » (aussi dans le menu Aide) ouvrent un schéma coté des conventions ; la ligne sélectionnée dans un tableau de charges est surlignée en orange sur le dessin ; les dessins ont des axes gradués et repèrent le niveau du remblai et des charges ;
- lancer le calcul (F5) : il tourne dans un fil séparé, la fenêtre reste utilisable ;

- voir les résultats : coefficients de rupture, lignes de pression (optimale et lignes caractéristiques) dessinées dans la voûte, avec les joints critiques, et courbes le long de la voûte (excentricité relative, coefficient de rupture par joint, N, T, M, T/N) ;
- voir le mécanisme de ruine (déformée amplifiée et rotules) : statique (dual du calcul), imposé ou de contrôle (mode TD) ;
- importer un classeur Voute_jf (menu Fichier > Importer un classeur Voute_jf, voir « Classeurs Voute_jf » ci-dessous) ;
- calculer, dans le cadre « Glissement, facteur λ et approche cinématique » de la page Résultats, avec frottement (associé ou non), un facteur λ sur les actions cochées, la diffusion des charges dans le remblai et le facteur d'un mécanisme de rotules imposé (bouton Calculer) ;
- lire la note de calcul ;
- exporter les dessins et les graphes en SVG (menu Fichier).

Commandes : double-clic dans une cellule pour la modifier, Tab pour passer à la suivante, Ctrl+V pour coller des lignes copiées d'un tableur ; molette pour zoomer, glisser pour déplacer le dessin, double-clic pour le recadrer.

Le calcul écrit à côté du fichier `NOM.DON` : `NOM_note.txt` et les fichiers CSV `NOM_resume.csv`, `NOM_joints.csv`, `NOM_efforts.csv`, `NOM_lignes.csv`, `NOM_contour.csv`, `NOM_mecanisme*.csv`. Le lanceur `VOUTE_Python.exe` ne fait qu'appeler `interface\python\pythonw.exe interface\voute_gui.pyw`. À la réouverture d'un `.DON`, les résultats du dernier calcul sont rechargés s'ils sont plus récents que les données.

Sans le dossier `interface\python`, le lanceur utilise le Python installé sur le poste (3.10 ou plus récent, avec Tkinter et numpy). Sous Linux ou macOS : `python3 interface/voute_gui.pyw [fichier.DON]`.

Fichier	Rôle
`interface/voute_gui.pyw`	Fenêtres, saisie, calcul (dans un fil séparé), résultats.
`interface/voute_don.py`	Lecture et écriture des `.DON`, lecture des CSV de résultats, centres de pression.
`interface/voute_dessin.py`	Dessin (voûte, ouvrage, charges, lignes de pression, graphes), zoom, export SVG.
`interface/voute_vma.py`	Ouvrages à plusieurs arches : lecture et écriture des `.VMA`, conversion d'un `.DON`, résultats.
`interface/voute_gui_ma.py`	Pages Données et Résultats des ouvrages.
`interface/voute_widgets.py`	Tableaux éditables, éditeurs communs, textes d'aide, lancement du calcul (paquet `voute`, `voute.api`).
`interface/voute_aide.py`	Fenêtre « Schéma des charges » et bulles d'aide.
`interface/voute_jf_classeur.py`	Lecture d'un classeur Voute_jf et traduction en `.DON` et `.VMA`.
`outils/lanceur/`	Source du lanceur `VOUTE_Python.exe` (C, MinGW-w64).

Calcul en ligne de commande

`voute.bat` lance le calcul en ligne de commande :

```
voute.bat EXEMPLE.DON -o note.txt --csv r
voute.bat TROIS.VMA -o note.txt --csv r --diffusion tronque
```

`voute.bat` lance `interface\python\python.exe -m voute`. Avec un autre Python (3.10 ou plus récent, numpy installé), depuis ce dossier : `python -m voute FICHIER ...`. Un programme Python peut aussi appeler le calcul directement :

```
from voute.api import execute
code, sortie, erreur = execute(['EXEMPLE.DON', '-o', 'note.txt', '--csv', 'r'])
```

Ouvrages à plusieurs arches (.VMA)

`voute.bat OUVRAGE.VMA` calcule un pont complet : plusieurs arches, piles intermédiaires et culées d'extrémité. Le coefficient de rupture est celui de l'ouvrage entier. Il tient compte des ruptures qui mettent en jeu plusieurs travées, par exemple une pile qui bascule ou dont le sol cède sous la poussée d'une arche chargée, retenue par la poussée maximale des arches voisines. Le calcul arche par arche sur appuis fixes ne voit pas ces ruptures.

Principe

- **Inconnues :** trois inconnues à la clé de chaque arche (H, V, Z), comme pour une voûte.
- **Sections vérifiées :**
- les joints des arches ;
- des sections horizontales des piles et des culées, de la tête à la fondation ;
- la section de fondation, avec la résistance du sol (ou celle de la maçonnerie si la fondation est rigide).
- **Critère :** compression limitée, contre-voûte possible. Si un coefficient de frottement est donné, la condition de non-glissement $|T| \leq \mu \cdot N$ s'y ajoute. Le glissement est associé par défaut (le joint s'ouvre de μ fois le glissement, ce que suppose l'analyse limite classique) ; avec `GLISSEMENT NON ASSOCIE`, il est pur (sans dilatance), calculé par itérations sur l'effort normal (voir « Glissement »).
- **Coefficient de rupture :** plus grand multiplicateur des charges pondérées pour lequel il existe un état d'équilibre admissible dans tout l'ouvrage. Il est calculé par programmation linéaire sur les 3 × (nombre d'arches) inconnues (critère linéarisé par plans coupants, coefficient final sur le critère exact). L'optimum est global.
- **Facteur sur des actions choisies :** avec la ligne `VARIABLE`, seules les actions citées sont multipliées, les autres restent fixes. C'est la marge sur un convoi, sur une charge d'essai, etc.
- **Mécanisme de ruine :** le dual du programme linéaire donne les rotules (sections, face comprimée, rotation relative) et le mouvement de chaque voussoir et de chaque tranche de pile ou de culée.
- **Convoi :** un groupe de charges peut être déplacé le long de l'ouvrage. Le calcul retient la position la plus défavorable (la première, quand plusieurs positions donnent le même coefficient) et donne le coefficient pour chaque position. Chaque position part de l'état de la précédente.

Format du fichier .VMA

Fichier texte, une instruction par ligne, commentaires après `#`. Majuscules et minuscules sont indifférentes.

```
TITRE PONT DE TROIS ARCHES
DENSITE 22                      # poids volumique de la maçonnerie
FROTTEMENT 0.6 0.5              # facultatif : joints, fondations
DIFFUSION BOUSSINESQ            # facultatif : diffusion des charges dans le remblai

CULEE GAUCHE                    # ou CULEE GAUCHE RIGIDE (appui fixe)
  FONDATION -3                  # cote de fondation
  LARGEUR 4                     # largeur en tête depuis l'intrados de naissance
  FRUIT 0 0.1                   # faces avant (côté arche) et arrière
  RESISTANCE 5000               # maçonnerie
  SOL 800                       # résistance du sol, ou SOL RIGIDE
  SECTIONS 10                   # intervalles de vérification
  TERRES 6.6 20 0.3             # terres à l'arrière : cote, poids volumique, K
FIN

CULEE GAUCHE                    # variante : culée en L décrite par ses faces
  LARGEUR 4
  FACE AVANT -17 -4.5           # sommets sous le coin de tête, de haut en bas
  FACE ARRIERE -21 -3   -22.5 -3   -22.5 -4.5   # talon de 1,5 m à la cote -3
  RESISTANCE 5000
  SOL 800
  TERRES 6.6 20 0.3
FIN

ARCHE                           # de gauche à droite
  CLE -12                       # abscisse globale de la clé
  INTRADOS C 12 0  0 0 5 0 90   # type, voussoirs, nature, paramètres
  EXTRADOS J 0.6 5 1
  RESISTANCE 5000 1 200
FIN

PILE                            # entre deux arches, ou PILE RIGIDE
  FONDATION -4
  FRUIT 0.05 0.05               # faces gauche et droite
  RESISTANCE 5000
  SOL 800
  TETE MONOLITHE                # facultatif : voir ci-dessous
FIN

PILE                            # variante : retraite, semelle et bloc en tête
  FACE GAUCHE -7.2 -2   -7.5 -2   -7.5 -3.5   -8 -3.5   -8 -4.5
  FACE DROITE -4.8 -2   -4.5 -2   -4.5 -3.5   -4 -3.5   -4 -4.5
  BLOC -7.4 1.2   -4.6 1.2      # contour supérieur du bloc, de gauche à droite
  BLOC DENSITE 24               # facultatif : densité du bloc
  RESISTANCE 5000
  SOL 800
FIN

ARCHE ... FIN
CULEE DROITE ... FIN

CHARGEMENT PP + REMBLAI + CONVOI
  PONDERATIONS 1.35 1.35 1.6 1.6 1
  DIFFUSION BOUSSINESQ TRONQUE  # facultatif : remplace celle de l'ouvrage
  VARIABLE CONVOI               # facultatif : actions multipliées (1 à 5, CONVOI)
  REMBLAI -23 23 6.6 20 0.3     # x début, x fin, cote, poids volumique, K
  FORCE 100 -12 6.6 0           # F, x, y, inclinaison
  REPARTIE 9 9 -20 6.6 20 6.6 0 # q1, q2, x1, y1, x2, y2, inclinaison
  EXCEPTIONNELLE ...            # comme REPARTIE
  CONVOI -18 18 1               # balayage : début, fin, pas
  CONVOI REPARTIE 60 60 -1.5 6.6 1.5 6.6 0   # abscisses relatives au convoi
  CONVOI FORCE 100 0 6.6 0
FIN
```

- **Courbes :** types A à M (ou codes 1 à 13), comme dans les `.DON`. Une arche dissymétrique se décrit avec `INTRADOS GAUCHE`, `EXTRADOS GAUCHE` et `RESISTANCE GAUCHE`. Une arche posée sur une pile ou une culée se termine par son joint de naissance, horizontal ou incliné (sommier d'un arc surbaissé, joint normal à l'intrados), à la même cote que l'arche voisine ou non. Deux arches voisines ne doivent pas se chevaucher : la pile doit être au moins aussi large que la somme des épaisseurs aux naissances (erreur 307).
- **Tête d'un appui :** la tête part des points d'intrados des naissances (coins de tête). Elle suit les sommiers jusqu'à leurs points d'extrados, puis son dessus va en ligne droite d'une naissance à l'autre (pile), ou horizontalement jusqu'à la face arrière (culée : `LARGEUR` est comptée depuis l'intrados de naissance, à la cote de l'extrados du sommier). La partie de l'appui au-dessus de la plus basse naissance d'intrados forme un seul bloc, qui reçoit les sommiers, son poids et les charges posées sur son dessus ; les sections horizontales commencent sous lui. Avec des joints horizontaux à la même cote, on retrouve exactement le calcul des versions précédentes.
- **FACE (faces brisées) :** `FACE GAUCHE x y x y ...` et `FACE DROITE ...` (pile), `FACE AVANT ...` et `FACE ARRIERE ...` (culée) donnent les sommets d'une face sous son coin de tête, de haut en bas, en coordonnées globales. Deux sommets à la même cote forment une retraite, une semelle, un talon ou un encorbellement. Le dernier sommet est sur la fondation, à la même cote pour les deux faces (`FONDATION` devient facultative et doit concorder). Plusieurs lignes `FACE` d'une même face s'ajoutent. Une face sans `FACE` garde son fruit ; `FACE` et un `FRUIT` non nul sur la même face sont refusés. Chaque coupe horizontale de l'appui doit être un seul segment (faces croisées : erreur 306 ; premier sommet au-dessus du coin de tête : erreur 308).
- **Sections des appuis :** une section à la cote de chaque sommet des faces, plus des sections intermédiaires réparties selon la hauteur des tronçons (`SECTIONS` reste le nombre total d'intervalles, au moins un par tronçon). À une retraite, la section prend la partie commune aux deux tronçons : un encorbellement repose sur sa partie étroite. Seules les coupes horizontales sont vérifiées : la note avertit quand un talon ou un encorbellement déborde de plus que sa hauteur (rupture de la console non vérifiée).
- **BLOC (bloc en tête) :** `BLOC x y x y ...` donne le contour supérieur d'un bloc de maçonnerie posé sur la tête d'une pile ou d'une culée et sur l'extrados des arches qu'elle porte (tête de pile montant entre les reins, massif de culée), de gauche à droite ; ses extrémités sont reliées verticalement à cette surface. `BLOC DENSITE d` lui donne une densité propre (sinon celle de l'appui). Le bloc est monolithique : les voussoirs qu'il recouvre en font partie, et chaque arche commence au premier joint (depuis la naissance) dont le point d'extrados sort du bloc. Ce joint devient le joint de contact avec l'appui (`CONTACT`), les joints suivants sont internes. Le bloc porte son poids, le remblai et les charges posées sur son dessus. Il doit rester entre les clés des arches portées et la face arrière d'une culée (erreur 309) et au-dessus de l'extrados et de la tête (erreur 310).
- **Charges :** abscisses globales. Une force répartie agit dans sa direction, sans la règle du « côté droit » des `.DON`, et sur la première surface rencontrée (un rayon qui traverse la voûte ne charge pas la face d'extrados par laquelle il ressort). Les charges qui tombent sur un appui rigide vont au sol. Le point d'application est cherché sur les courbes exactes de l'extrados.
- **Pondérations :** le poids des piles et culées (blocs compris) compte avec la pondération du poids propre, la poussée et le poids des terres avec celle du remblai.
- **TERRES (culées) :** poussée horizontale K·γ·(cote − y) sur un plan vertical, de la cote de la coupe au coin de tête arrière ; s'y ajoute le poids des terres qui reposent sur la face arrière, entre elle et le plan vertical passant par son point le plus en arrière au-dessus de la coupe, jusqu'à la cote des terres (méthode des murs-poids : prisme sur une face à fruit, terres sur un talon). Les versions précédentes négligeaient ce poids.
- **FROTTEMENT, GLISSEMENT, CONTACT :** `FROTTEMENT mu [mu_fondation]` active la vérification du glissement ; `GLISSEMENT NON ASSOCIE` (ou `ASSOCIE`, défaut) choisit la loi d'écoulement ; dans un bloc `PILE` ou `CULEE`, `CONTACT mu` donne le frottement des joints de naissance des arches posées sur l'appui (appui rigide : `CULEE GAUCHE RIGIDE CONTACT mu`). Les joints de naissance

horizontaux reprennent toute la poussée en effort tangent : un frottement de 0,4 à 0,6 les fait glisser dès que l'arche est surbaissée ; `CONTACT` permet d'y mettre une valeur représentative du sommier (ou une valeur élevée pour ne pas les vérifier).
- **TETE MONOLITHE (pile) :** les joints de naissance des arches posées sur la pile ne sont pas vérifiés ; les derniers voussoirs des deux arches et la tête de la pile forment un seul bloc, posé sur la section supérieure de la pile, qui reçoit la somme des deux poussées. Cette ligne servait aux sommiers inclinés convertis des classeurs Voute_jf (voussoir en coin sous le sommier) ; elle reste valable, mais les sommiers inclinés se posent maintenant directement sur l'appui, et `BLOC` généralise ce bloc. Sans cette ligne, chaque arche doit faire passer sa propre poussée dans son joint de naissance.
- **DIFFUSION :** voir « Diffusion des charges dans le remblai » ci-dessous. Au niveau de l'ouvrage, s'applique à tous les chargements ; dans un bloc `CHARGEMENT`, à ce chargement seulement.
- **VARIABLE :** actions multipliées par le coefficient, parmi 1 (poids propre, avec le poids des appuis), 2 (remblai, avec la poussée des terres), 3 (forces concentrées), 4 (forces réparties), 5 (forces exceptionnelles) et CONVOI (toutes les charges du convoi). Sans cette ligne, toutes les actions sont multipliées : c'est le coefficient de rupture. Avec elle, le résultat est le facteur de rupture sur ces actions, les autres charges restant fixes (pondérées). Les efforts et les coefficients des sections imprimés sont alors ceux de l'état à la rupture (charges fixes + facteur × charges multipliées), et les sections critiques sont celles du mécanisme : l'état des parties non critiques n'est pas unique.

Résultats

Fichier	Contenu
`NOM_note.txt`	Note de calcul : ouvrage, coefficient (ou facteur sur les actions multipliées), coefficients de sécurité (FM, λ∞, FS géo et sections limitantes), inconnues des arches, sections critiques, mécanisme de ruine, fondations, efforts dans toutes les sections ; tableau final des coefficients de sécurité et leur signification.
`NOM_resume.csv`	Coefficient de chaque chargement (λ avec `VARIABLE`, FM sinon) et position critique du convoi, puis `fm;position_fm;lambda;lambda_inf;fs_geo;position_fs_geo;section_fs_geo` (vide : non défini ; `inf` : infini).
`NOM_convoi.csv`	Coefficient pour chaque position du convoi, puis `fs_geo` ; colonne `charge` à F quand un convoi multiplié tombe entièrement hors de l'ouvrage (sur une culée rigide, par exemple) : la position est sans objet et n'est pas retenue pour le minimum.
`NOM_ligne_geo.csv`	Ligne optimale géométrique (coefficient d'Heyman) à la position retenue, au format de `NOM_sections.csv`, puis `limitante` (T : section limitante).
`NOM_inconnues.csv`	Z, H, V à la clé de chaque arche.
`NOM_sections.csv`	Géométrie, efforts, excentricité, coefficient et centre de pression de chaque section.
`NOM_contour.csv`, `NOM_appuis.csv`	Contours des voussoirs, des piles et des culées (dessin) : polygone de chaque appui (face `P`, tous ses sommets) et de son bloc en tête (face `B`).
`NOM_mecanisme.csv`	Mécanisme de ruine. Lignes `SECTION` : sauts normal et tangent, rotation (conjugués de N, T, M), centre de rotation et sa position sur la section (+1 intrados ou face droite, −1 extrados ou face gauche). Lignes `CORPS` : vitesse (vx, vy à l'origine du repère, ω) de chaque voussoir et de chaque tranche d'appui, normée par la puissance des charges multipliées égale à 1.

L'interface graphique ouvre et enregistre les `.VMA` (menu Fichier : Nouvel ouvrage à plusieurs arches, Exemple : pont de trois arches).

Reprendre des voûtes existantes. Deux commandes du menu Fichier :

- **Convertir la voûte en ouvrage à plusieurs arches.** La voûte ouverte (`.DON`) devient la première arche d'un ouvrage sur appuis rigides, avec ses chargements.
- **Importer une voûte (.DON) comme nouvelle arche.** Cette commande existe aussi en bouton dans l'onglet Arches. La voûte est ajoutée à droite, séparée de la précédente par une pile d'au moins 2 m entre intrados, et assez large pour que les naissances ne se chevauchent pas. Ses chargements peuvent être ajoutés à ceux de même rang de l'ouvrage, décalés à la position de l'arche et limités à son emprise. Si les naissances des deux arches ne sont pas à la même cote, ou pas horizontales, la pile est créée rigide et un message indique comment la rendre vérifiable.

La page Résultats d'un ouvrage permet d'animer la position du convoi dans l'aperçu, de dessiner les lignes de pression dans tout l'ouvrage, de tracer le coefficient selon la position du convoi et les excentricités dans les arches et les appuis, et de dessiner le mécanisme de ruine (déformée amplifiée, rotules dont la taille suit la rotation). Dans l'onglet Chargements, les cases « Multiplier » choisissent les actions multipliées (ligne `VARIABLE`).

Voûte seule : facteur λ, mode TD et glissement

Les `.DON` passent par le même solveur que les ouvrages (programmation linéaire) : la note donne le coefficient, la ligne optimale, les lignes caractéristiques et le **mécanisme de ruine** (joints, rotation relative, face comprimée, centre de rotation) ; `PREFIXE_mecanisme.csv` a le format des ouvrages (arche 1, côtés D et G).

Options de la ligne de commande (et cadre « Glissement, facteur λ et approche cinématique » de la page Résultats de l'interface) :

- **`--variable 3,5`** : facteur de rupture λ sur les actions citées (1 poids propre, 2 remblai, 3 forces concentrées, 4 forces réparties, 5 forces exceptionnelles), les autres restant fixes. La note ajoute un bloc FACTEUR DE RUPTURE SUR LES ACTIONS MULTIPLIEES (λ, ligne sous les charges de rupture, mécanisme) ; le coefficient FM global reste calculé.
- **`--rotules "0E 9I 19E"`** : mode TD (approche cinématique). Blocs rigides, rotules sur les faces des joints (`I` intrados, `E` extrados ; `G/D` devant le numéro en dissymétrique, le joint de clé 0 est commun), **dans la numérotation de VOUTE Python** (celle de la note et du dessin, sans voussoir fictif : joints 0 à N). En symétrique, 3 rotules sur la demi-voûte droite (le mécanisme à 5 rotules du TD) ; en dissymétrique, 4. Le facteur est −P(actions fixes)/P(actions multipliées) : borne supérieure du facteur de ruine. La note donne la puissance de chaque action et le message d'erreur si les faces sont incompatibles (une rotule ouvrirait le joint du côté comprimé).
- **`--controle`** (et toujours avec `--rotules`) : recherche de contrôle sur tous les mécanismes (toutes positions et faces des rotules), et facteur statique pour une résistance infinie. Les deux sont égaux (dualité) : c'est la démonstration du théorème statique = cinématique.
- **`--frottement mu[,mu_naissances]`** et **`--glissement non_associe`** : glissement des joints, comme pour les ouvrages.

Fichiers supplémentaires : `PREFIXE_mecanisme_td.csv` (mécanisme imposé), `PREFIXE_mecanisme_controle.csv` (meilleur mécanisme) ; `PREFIXE_resume.csv` gagne les colonnes `lambda`, `lambda_td` et `lambda_controle`. Avec `--variable`, la note donne aussi λ∞, le même facteur à résistance infinie (colonne `lambda_inf`).

Un chargement qui ne porte aucune des actions citées (par exemple une combinaison « poids propre et remblai seuls ») n'a pas de facteur λ : la note l'indique (« aucune action multipliée dans ce chargement : facteur non défini ») et les colonnes `lambda` du résumé restent vides.

Classeurs Voute_jf (.xlsm)

Un classeur Voute_jf (programme Excel et DLL Fortran de J.-F. Douroux, versions V13 et suivantes) se convertit en données VOUTE Python :

- dans l'interface : menu Fichier > Importer un classeur Voute_jf (.xlsm)… ;
- en ligne de commande : `interface\python\python.exe outils\vjf2voute.py classeur.xlsm [-o PREFIXE] [--voute | --pont] [--calcul]`.

Deux fichiers sont écrits à côté du classeur : `NOM_voute.DON` (voûte des feuilles Geometrie et Charges) et `NOM_pont.VMA` (feuille Pont). L'interface ouvre l'un des deux. Pour la voûte, elle coche aussi les actions multipliées et règle le frottement (page Résultats). Un compte rendu rappelle les résultats enregistrés dans le classeur, pour comparaison.

Le classeur est lu tel qu'Excel l'a enregistré : la voûte est lue dans les feuilles calculées Donnees et Donnees_G, c'est-à-dire exactement ce que le VBA transmet à la DLL. Il faut donc l'enregistrer dans Excel après la dernière modification. Unités : celles du classeur (t, m) ; σc est convertie de MPa en t/m².

Voute_jf	VOUTE Python
Courbes : segment, arc de cercle, ellipse, parabole	H (G pour un segment d'intrados qui n'est pas le premier), C, B, A
Courbes D, E, F (arcs tangent, à départ horizontal, par 3 points) et G	Arcs de cercle C calculés comme la DLL (Courbes_DEFG), segments
Piédroit	Courbes ajoutées à l'intrados (joints horizontaux) et à l'extrados (tête, face extérieure). Le bloc de transition de Voute_jf est un voussoir de 1 mm qui porte le premier joint horizontal. Une seule densité dans un `.DON` : celle de la voûte (avertissement si le piédroit en a une autre)
Remblai (surface polygonale), poids volumique, K	Lignes REMBLAI horizontales ; une surface inclinée est remplacée par des paliers de 0,25 m au plus, de même poids
Charges concentrées et réparties, côtés S, D, G	Forces des demi-voûtes droite et gauche ; une charge S à la clé est partagée par moitié, comme dans Voute_jf
Catégories Q et A	Forces concentrées (action 3), forces réparties Q (action 4), forces réparties A en forces exceptionnelles (action 5)
Combinaisons gG, gP, gQ, gA	Un chargement par combinaison active, plus la combinaison détaillée. Pondérations gG (poids propre), gG (remblai), gQ, gQ, gA ; la poussée des terres pondérée par gP s'obtient avec K × gP/gG
Facteur λ (charges Q et A multipliées)	`--variable 3,4,5` pour le `.DON` (actions présentes seulement), ligne `VARIABLE` de chaque chargement du `.VMA`
σc vide ou nulle, φ	Résistance 10^9 (infinie) ; frottement tan φ (joints et fondations)
Pont : travées (plein cintre, arc segmentaire, ellipse, parabole, arche de Geometrie), piles, culées	ARCHE, PILE, CULEE (poussée des terres TERRES à la cote de la surface derrière la culée). Pour un arc segmentaire, une parabole ou une arche de Geometrie, le joint de naissance horizontal de Voute_jf (option « Horizontaux ») est porté par un voussoir de 1 mm
Pont V27 : joints de naissance « Normaux à l'arche » (sommiers inclinés, E10)	Arche terminée par le sommier (joint normal à l'intrados), posé directement sur la pile, la culée ou l'appui rigide ; la tête de l'appui au-dessus de la plus basse naissance forme un seul bloc, à la densité de l'appui : c'est la tête de pile et le bloc de transition du piédroit de Voute_jf. Culée : `LARGEUR` à la cote de l'extrados du sommier et fruit arrière jusqu'au premier lit, comme Voute_jf

Voute_jf	VOUTE Python
Charge roulante du pont	Chargement « CHARGE ROULANTE » : combinaison détaillée et convoi d'une force (`VARIABLE CONVOI`), mêmes positions que le classeur

Limites :

- la charge roulante de la voûte n'est pas convertie, car les `.DON` n'ont pas de convoi. Pour l'étudier, utiliser Fichier > Convertir la voûte en ouvrage à plusieurs arches, puis ajouter un convoi ;
- joints : VOUTE les trace normaux à l'intrados, comme Voute_jf depuis la V30 (option par défaut) ; les deux programmes concordent alors sur la série de 16 ponts à $2{\cdot}10^{-6}$ près pour λ et à $5{\cdot}10^{-5}$ près pour l'essieu. Avec un classeur antérieur à la V30, ou l'option « Points de même rang », les résultats ne sont identiques que si les faces sont concentriques ; l'écart est sinon de quelques pour cent (voir `VALIDATION.md`). Le compte rendu de conversion indique le cas.

Classeurs du TD. `interface\python\python.exe outils\epure_hinge.py classeur.xlsm` lit un classeur Epure_Hinge (TD CHEMER), écrit le `.DON` correspondant (un joint placé à la rotule intermédiaire, V à la clé en force exceptionnelle) et compare les facteurs (il demande openpyxl). Convention de charge : le classeur applique V entier à la demi-voûte étudiée, donc 2V à la voûte ; le `.DON` écrit porte V sur chaque demi-voûte.

Diffusion des charges dans le remblai

Par défaut, comme en 1993, une charge posée en surface est projetée sur l'extrados sans s'étaler. Deux modèles de diffusion sont proposés au choix de l'utilisateur, par l'option `--diffusion` (`.DON` et `.VMA`) ou la ligne `DIFFUSION` des `.VMA` :

Modèle	Option	Ligne `.VMA`	Distribution à la profondeur h
Aucune (défaut)	`--diffusion aucune` ou rien	`DIFFUSION AUCUNE` ou rien	projection directe (1993)
Boussinesq	`--diffusion boussinesq`	`DIFFUSION BOUSSINESQ`	massif élastique semi-infini : solution de Boussinesq pour une bande, de Flamant pour une force concentrée
Boussinesq tronqué 30°	`--diffusion tronque`	`DIFFUSION BOUSSINESQ TRONQUE`	Boussinesq limité aux plans inclinés à 30° sur la verticale partant des bords de la charge, comme le logiciel RING

Pour des études spécifiques (comparaison avec d'autres règles, sensibilité), deux variantes restent disponibles :

Variante	Option	Ligne `.VMA`	Distribution
Troncature à un autre angle	`--diffusion tronque,angle`	`DIFFUSION BOUSSINESQ TRONQUE angle`	Boussinesq limité aux plans à l'angle donné
Pente fixe	`--diffusion pente[,angle]` ou `--diffusion angle`	`DIFFUSION PENTE [angle]` ou `DIFFUSION angle`	étalement uniforme sur b + 2 h tan θ (30° par défaut ; 26,57° pour la pente 1 pour 2 britannique, 45° pour 1 pour 1)

La note technique sur la diffusion (`notices\Note_technique_diffusion_remblai.pdf`) compare ces hypothèses ; les pentes fixes n'y sont pas recommandées pour une évaluation.

- **Charges diffusées :** forces concentrées et exceptionnelles, convoi compris, verticales, définies au-dessus de l'ouvrage. La cote de la charge est la surface de diffusion. Les forces réparties (chaussée, superstructure, en général uniformes sur tout l'ouvrage), le remblai et les charges inclinées ne sont pas diffusés.
- **Calcul :** profondeur h prise au droit de chaque bande de 5 cm, entre la cote de la charge et la surface supérieure de l'ouvrage (extrados exact, tête d'appui) ; chaque bande reçoit l'intégrale exacte de la contrainte verticale sur sa largeur ; la distribution est normalisée pour conserver la résultante. Boussinesq s'étend à ± 10 h, où il reste moins de 0,02 % de la charge.
- **Hors de l'ouvrage :** la part qui tombe au-delà des naissances d'une voûte seule, au-delà de l'ouvrage ou sur un appui rigide va au sol ; au-delà des naissances, la profondeur est mesurée jusqu'à l'extrados du joint de naissance (voûte seule et ouvrage d'une arche donnent le même résultat). Une bande qui dépasse la clé d'une voûte seule passe sur l'autre demi-voûte. La note donne, pour chaque chargement, le modèle, la profondeur au centre des charges et la part transmise au sol : si le gain vient surtout de là, il dépend de la modélisation de la culée.
- **Interface :** liste « Diffusion remblai » et angle (30° par défaut) dans le cadre de la page Résultats (voûte seule), « Diffusion dans le remblai » et angle dans l'onglet Ouvrage (`.VMA`) : aucune, Boussinesq, Boussinesq tronqué, pente fixe (étude).
- **Effet :** Osserain, charge d'essai de la phase 2 : λ = 1,309 sans diffusion, 1,421 avec Boussinesq, 1,355 avec Boussinesq tronqué (pentes fixes : 1,490 à 1 pour 2, 1,509 à 30°, 1,600 à 45°). Sous une charge étroite et un remblai épais, Boussinesq peut être beaucoup plus favorable que le modèle tronqué (jusqu'à deux fois sur une voûte de 10 m) : la note technique recommande de comparer les deux.

Glissement

Le critère de Coulomb |T| ≤ μ·N est **associé** par défaut : un joint qui glisse s'ouvre de μ fois le glissement. C'est l'hypothèse qui rend exact le théorème statique ; elle surestime la résistance quand le glissement gouverne. Avec **non associé** (glissement pur, sans dilatance), le programme remplace μ·N par μ·N_0, N_0 étant l'effort normal de l'état de rupture précédent (critère de Tresca, dont l'écoulement est un glissement pur), et itère jusqu'à N = N_0 (relaxation si l'écart augmente, 60 itérations au plus ; le nombre d'itérations est imprimé). Le résultat est égal au calcul associé quand l'effort normal des joints qui glissent est imposé par l'équilibre, plus faible sinon.

Dans les tableaux des lignes de la note (ligne optimale, lignes caractéristiques), les colonnes TAUX et COEF. RUPTURE donnent le critère de compression seul : le glissement se lit dans la colonne INCLINAISON (T/N) et sur la ligne GLISSEMENT (max |T/N|), et le joint qui limite par glissement apparaît dans le mécanisme de ruine (GLISSEMENTS).

Utilisation

```
voute.bat FICHIER [-o note.txt] [--csv PREFIXE] [--format DON|1983|VMA] [--court] [--sans-heyman]
voute.bat FICHIER --csv PREFIXE --geometrie
voute.bat FICHIER --ligne C Z H V
voute.bat FICHIER --reecrit SORTIE
voute.bat FICHIER --resume
```

Option	Effet
`FICHIER`	Données : `.DON` (version PC 1993), `.VMA` (ouvrage) ; toute autre extension est lue au format cartes 1983.
`-o note.txt`	Note de calcul (sinon sortie standard).
`--csv PREFIXE`	Écrit les fichiers CSV (séparateur `;`, point décimal), décrits ci-dessous.

Option	Effet
`--format DON|1983|VMA`	Impose le format de lecture.
`--court`	Note abrégée : sans les efforts par type d'action ni le détail des lignes caractéristiques.
`--sans-heyman`	Sans le coefficient géométrique d'Heyman FS géo, calculé par défaut (voûte seule et ouvrages).
`--geometrie`	Avec `--csv` : écrit la géométrie (joints, contour) et les efforts, sans calcul de stabilité. Utilisé par l'interface graphique. Les fichiers CSV des résultats sont créés avec leur seule ligne d'en-tête.
`--ligne C Z H V`	Coefficient de rupture de la ligne (Z, H, V) pour le chargement C, et efforts sur chaque joint.
`--variable 1,..,5`	Voûte seule : facteur λ sur les actions citées, les autres fixes.
`--rotules "liste"`	Voûte seule, mode TD : facteur du mécanisme de rotules imposé (numérotation de VOUTE Python), et recherche de contrôle.
`--controle`	Voûte seule : recherche de contrôle seule (meilleur mécanisme, facteur statique à résistance infinie).
`--frottement mu[,mu_n]`	Voûte seule : glissement vérifié avec le frottement mu (mu_n : joints de naissance).
`--glissement non_associe`	Glissement sans dilatance (voûte seule et ouvrages ; `.VMA` : `GLISSEMENT NON ASSOCIE`).
`--diffusion modèle`	Diffusion des charges dans le remblai : `aucune` (défaut), `boussinesq` ou `tronque` (Boussinesq tronqué à 30°) ; études spécifiques : `tronque,angle`, `pente[,angle]` ou un angle (pente fixe) ; voûte seule et ouvrages ; pour un `.VMA`, remplace les lignes `DIFFUSION`.
`--reecrit SORTIE`	Réécrit les données lues (`.DON`, `.VMA`, cartes 1983).
`--resume`	Résumé des données lues.

Les fichiers CSV d'une voûte seule :

Fichier	Contenu
`PREFIXE_resume.csv`	Une ligne par chargement : stabilité en traction, coefficient, ligne optimale, facteurs λ, puis `lambda_inf` (λ à résistance infinie) et `fs_geo` (coefficient géométrique d'Heyman).
`PREFIXE_joints.csv`	Géométrie des joints et résistances.
`PREFIXE_efforts.csv`	Efforts par voussoir, par type d'action, puis le total pondéré.
`PREFIXE_lignes.csv`	Efforts sur chaque joint pour chaque ligne caractéristique et pour la ligne `OPTIMALE GEOMETRIQUE` (coefficient d'Heyman).
`PREFIXE_contour.csv`	Contour réel de chaque voussoir (intrados et extrados, 13 points par face), pour le dessin.
`PREFIXE_mecanisme.csv`	Mécanisme de ruine (format des ouvrages) ; avec `--variable`, celui du facteur λ.
`PREFIXE_mecanisme_td.csv`, `PREFIXE_mecanisme_controle.csv`	Mode TD : mécanisme imposé, meilleur mécanisme.

En cas d'erreur de données, le programme s'arrête avec un message sur la sortie d'erreur. Le numéro d'erreur est celui de la version 1993 (annexe 1 du manuel de référence), par exemple 101, 120, 125 ou 128, ou des ouvrages (300 à 310). Le code de retour vaut 1 (option incorrecte), 2 (géométrie), 3

(lecture) ou 4 (chargement).

Conventions

- Unités quelconques, homogènes.
- Abscisses comptées à partir de la clé, vers la droite pour la demi-voûte droite, vers la gauche pour la demi-voûte gauche.
- Angles en degrés depuis la verticale ascendante.
- Joints numérotés de 0 (clé) à la naissance, sans voussoir fictif. Sur la première courbe d'intrados, le nombre de voussoirs du fichier compte le voussoir fictif de 1993 : la courbe a un voussoir de moins. Les zones de résistance gardent la numérotation des fichiers de 1993 (clé = joint 1 ; le joint n de VOUTE Python est le joint n + 1 des zones).
- **V**, l'effort vertical à la clé, est imprimé dans la convention de la version 1993.
- Excentricité : +1 à l'intrados, −1 à l'extrados.

Organisation du code

Module	Rôle
`voute/donnees`	Modèle de données (classes), lecture et écriture des `.DON`, des cartes 1983 et des `.VMA` (format libre Fortran reproduit), conversions (`.DON` en ouvrage d'une arche…).
`voute/geometrie`	Géométrie exacte : primitives (cercle, ellipse, parabole, segment), courbes A à M, joints à longueurs d'arc égales, extrados, voussoirs, résistances.
`voute/charges.py`	Poids propre, remblai (poids et poussée K·γ·h), forces concentrées, réparties et exceptionnelles (première surface rencontrée), pondération.
`voute/diffusion.py`	Diffusion des charges dans le remblai : Boussinesq, Boussinesq tronqué, pente fixe ; surface supérieure exacte ; bilan.
`voute/pl`	Programmation linéaire : simplexe (gradient projeté de Rosen, mise à jour de la factorisation QR, anti-cyclage), critère des sections, coefficient par plans coupants, glissement non associé ; coefficient géométrique d'Heyman (méthode de Dinkelbach) et facteur à résistance infinie (`geometrique.py`).
`voute/calcul.py`	Voûte seule : sections, stabilité en traction, coefficient, ligne optimale, lignes caractéristiques, λ, mode TD.
`voute/lignes.py`	Lignes caractéristiques (domaines de traction et de compression, cotes extrêmes par l'algorithme de Dinkelbach), domaine discret.
`voute/cinematique.py`	Facteur sur des actions choisies, mécanisme imposé, recherche de contrôle vectorisée, facteur statique à résistance infinie.
`voute/mecanisme.py`	Mécanisme de ruine d'une voûte : rotules, glissements, mouvement des voussoirs.
`voute/ouvrage`	Ouvrages à plusieurs arches : modèle (arches, piles, culées, sections, charges des corps) et calcul (coefficient, convoi, réoptimisation des arches).
`voute/sorties`	Notes de calcul et fichiers CSV.
`voute/api.py`	Calcul dans le processus appelant (interface graphique).
`voute/__main__.py`	Ligne de commande (`python -m voute`, `voute.bat`).

Validation

VOUTE Python a été comparé à la version PC de 1993, à des valeurs de référence calculées en géométrie de 1993, au programme Voute_jf et à des solutions analytiques. Le détail est dans `VALIDATION.md`.

Tests

Les batteries de tests sont dans `batteries` :

```
interface\python\python.exe batteries\lance_tout.py
```

Batterie	Contrôle
`run_tests.py`	117 chargements : non-régression, comparaison aux références en géométrie de 1993 et à la version PC de 1993 (écarts de la géométrie exacte listés à part), mécanismes, 952 lignes caractéristiques admissibles.
`test_interface.py`	Relecture et réécriture des 40 `.DON` par le module de l'interface ; calcul identique ; 34 144 centres de pression sur les joints.
`test_td.py`	Mode TD : 4 classeurs Epure_Hinge (TD CHEMER) retrouvés à 0,2 % près, dualité contrôle / statique à résistance infinie, cas du TD et messages d'erreur.
`test_glissement.py`	Glissement associé et non associé (Osserain, BAGNEUX1, TD10).
`test_multi.py`	Ouvrages : voûte = ouvrage d'une arche (34 fichiers), symétrie, translation, équilibre des appuis, appuis rigides, ligne VARIABLE, mécanisme.
`test_diffusion.py`	Diffusion : sans effet, voûte = ouvrage d'une arche (6 modèles), résultante conservée, Osserain, ligne DIFFUSION, convoi.
`test_repartie.py`	Force répartie inclinée : version PC de 1993, face cachée, résultante, voûte = ouvrage d'une arche.
`test_coefficients.py`	Coefficients de sécurité : FS géo de pleins cintres contre Voute_jf (1e-7) et Milankovitch, valeurs figées (`coefficients/references.csv`), FS géo ≥ 1 ⇔ stabilité, $\lambda \leq \lambda\infty$, FM facteur sur les résistances.

Le moteur de calcul a en plus ses propres tests (115 tests unitaires, comparaison du simplexe à HiGHS), livrés avec le paquet de développement, ainsi que les cas croisés avec Voute_jf, qui demandent les sources de Voute_jf.