VOUTE Python 1.3 — Notice d'utilisation

Nov 14, 2026 · @Jean-François

VOUTE Python calcule à la rupture les voûtes en maçonnerie et les ponts à plusieurs arches. Cette notice explique comment s'en servir, de l'installation à la lecture des résultats ; la référence complète des fichiers et des options est dans `LISEZMOI.md`, la validation dans `VALIDATION.md`.

Présentation

VOUTE Python cherche la ligne de pression la plus favorable dans une voûte et dit de combien on peut multiplier les charges avant la ruine : c'est le coefficient de rupture, issu de la théorie du calcul à la rupture. Il traite une voûte seule (fichier `.DON`) ou un pont complet avec ses piles et ses culées (fichier `.VMA`).

Le programme est le dernier d'une lignée de trois versions, qui lisent toutes les mêmes fichiers de voûtes :

Version	Date	Ce qu'elle apporte
VOUTE1 (SETRA, IBM)	1983	Calcul à la rupture d'une voûte symétrique, données en cartes
VOUTE 1.0, version PC (SETRA)	1993	Fichiers `.DON`, 13 types de courbes, voûtes et chargements dissymétriques, poussée des terres
VOUTE Python 1.3	2026	Géométrie exacte, programmation linéaire et mécanisme de ruine, ponts à plusieurs arches, facteur sur des actions choisies, mode TD, glissement, diffusion dans le remblai, interface graphique, coefficients de sécurité, piles et culées polygonales, domaine de stabilité des ouvrages ; tout en Python

VOUTE Python est écrit entièrement en Python, avec la bibliothèque numpy : le moteur de calcul (dossier `voute`), l'interface graphique (dossier `interface`) et les outils. Le code se lit et se modifie avec un simple éditeur de texte.

Ce que VOUTE Python ne fait pas : la maçonnerie y est un matériau sans résistance à la traction, de résistance en compression limitée. Il ne calcule ni déformations ni fissuration en service, et il ne tient pas compte de l'eau, des sous-pressions ou des terres en butée devant les appuis.

Installation et vérification

La version redistribuable est le fichier `VOUTE_Python_1.3_2026-11-14.zip`. Il suffit de l'extraire : Python 3.13 (avec Tkinter) et numpy sont fournis dans `interface\python`, et rien n'est écrit dans le registre. Il faut Windows 10 ou 11, 64 bits, et environ 100 Mo.

1. **Débloquer le zip** s'il a été téléchargé ou reçu par courriel : clic droit > Propriétés > cocher « Débloquer ».
2. **Extraire** dans un dossier où l'on peut écrire (par exemple `D:\Voute` ou Documents), pas dans `C:\Program Files` : le calcul écrit ses résultats à côté du fichier de données. Garder ensemble `VOUTE_Python.exe`, `voute.bat` et les dossiers `voute` et `interface`.
3. **Lancer** `VOUTE_Python.exe`. Les programmes ne sont pas signés : au premier lancement, Windows peut afficher « Windows a protégé votre ordinateur » ; cliquer sur « Informations complémentaires » puis « Exécuter quand même ». Sur un poste géré, le service informatique peut devoir autoriser `VOUTE_Python.exe`, `interface\python\pythonw.exe` et `interface\python\python.exe`.
4. **Vérifier** : ouvrir `exemples\voutes\EXEMPLE.DON` et appuyer sur F5. Les coefficients doivent être 5,2638 (chargement 1) et 6,7481 (chargement 2). Le menu Aide > À propos indique « VOUTE Python 1.2.1 » et le moteur de calcul utilisé.

Élément du dossier	Rôle
`VOUTE_Python.exe`	Lanceur de l'interface graphique
`voute.bat`	Calcul en ligne de commande
`voute\`	Moteur de calcul (paquet Python)
`interface\`	Interface graphique, et Python autonome avec numpy
`exemples\`	Voûtes `.DON`, ponts `.VMA` (dont une série de 16 ponts de 1 à 7 travées), classeur Voute_jf à importer
`notices\`	Notices en PDF, notices d'origine du SETRA (1993)
`batteries\`, `outils\`	Tests de validation, convertisseur Voute_jf en ligne de commande, source du lanceur

Facultatif : raccourci sur le bureau (clic droit > Envoyer vers > Bureau) et association des `.DON` et `.VMA` à `VOUTE_Python.exe` (Ouvrir avec > Toujours). `INSTALLATION.txt` détaille ces points et les problèmes courants.

Différences avec la version PC de 1993

Les fichiers `.DON` de la version de 1993 se lisent tels quels. Les différences de résultats viennent des points suivants ; `VALIDATION.md` les détaille fichier par fichier.

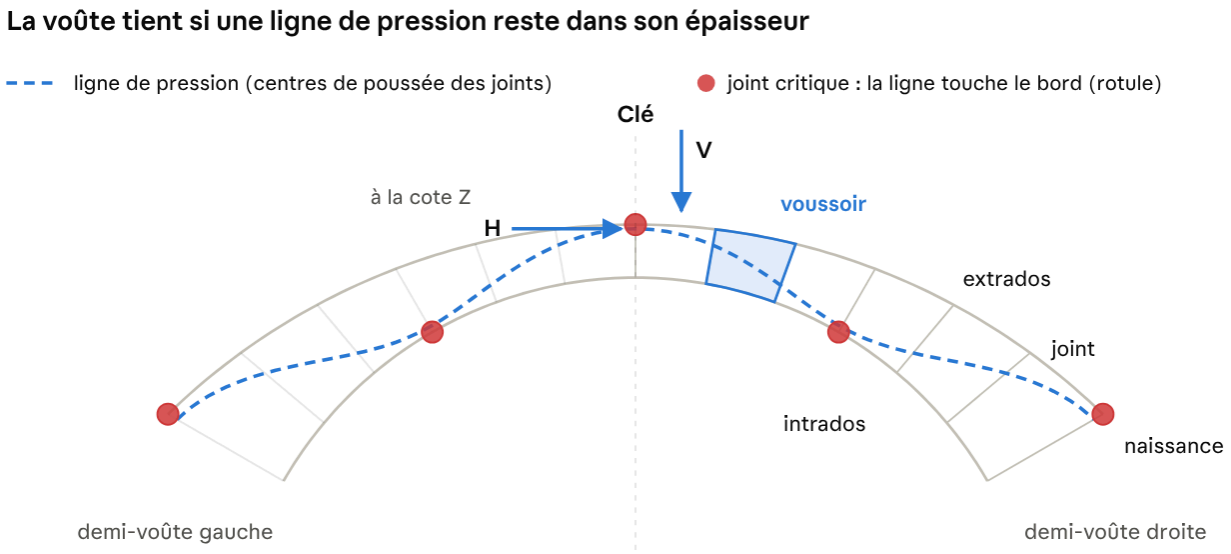
Point	Version PC de 1993	VOUTE Python 1.2
Géométrie	Approximations : découpage en 200 points, raccord des courbes d'extrados depuis le dernier point calculé, ellipse par l'algorithme ELLIPI, polygones de 24 côtés par voussoir	Exacte : intersections, aires et efforts calculés sur les courbes elles-mêmes
Numérotation des joints	Voussoir fictif à la clé (joint 1 à quelques dixièmes de millimètre du joint 0)	Pas de voussoir fictif : joints de 0 (clé) à N. Le joint k de 1993 (k ⩾ 2) est le joint k − 1
Piédroit vertical en fin de remblai	Le raccord l'inclinait légèrement : il recevait la poussée du remblai	Vertical, il ne la reçoit pas (règle de 1993, voir « Règles de 1993 conservées »)
Chargements dissymétriques	Optimum cherché sur une grille : la ligne optimale n'est pas toujours trouvée	Programmation linéaire : coefficient normalement supérieur ou égal

Les zones de résistance des fichiers gardent la numérotation de 1993 (clé = joint 1) et sont traduites à la lecture : un fichier `.DON` existant donne la même voûte. Les rotules du mode TD, en revanche, se donnent dans la numérotation du dessin et de la note, sans voussoir fictif : « 0E 9I 19E ».

Le plus grand écart touche les voûtes ALLIESYM, ALLIEDI1 et ALLIEDI2 : leur piédroit vertical finit exactement à l'abscisse de fin du remblai et ne reçoit pas la poussée des terres, ce qui divise le coefficient à peu près par deux (ALLIESYM : 3,21 dans la version de 1993, 1,53 dans VOUTE Python).

Principe du calcul

La voûte est découpée en voussoirs par des joints. Sur chaque joint, l'effort transmis a une résultante (effort normal N, effort tangent T, moment M) ; la suite des centres de poussée forme la ligne de pression. La voûte est stable si l'on peut trouver une ligne qui reste dans l'épaisseur sans écraser la maçonnerie.



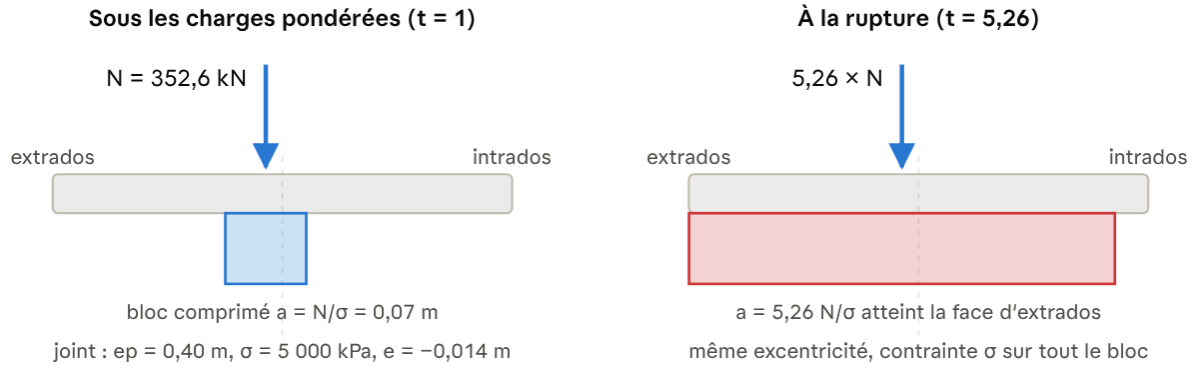
principe du calcul à la rupture · ligne de pression et rotules

La ligne est entièrement fixée par les efforts à la clé : la poussée horizontale H, sa cote Z et, en dissymétrique seulement, l'effort vertical V. Pour chaque ligne, chaque joint donne un coefficient CR = ep (1 − |ex|) σ / N, où ep est l'épaisseur du joint, ex l'excentricité relative de la poussée et σ la résistance de la maçonnerie. VOUTE Python cherche, par programmation linéaire, la ligne qui rend le plus faible de ces coefficients le plus grand possible : c'est le coefficient de rupture de la voûte. Les joints où il est atteint (en rouge) sont ceux où la voûte s'ouvrirait en rotule.

Le critère d'un joint, sur un exemple

Dans chaque joint, la ligne de pression transmet un effort normal N à une distance e du centre du joint. La maçonnerie ne résiste pas à la traction et sa résistance en compression σ est limitée. L'effort N doit donc être porté par un bloc comprimé à σ, de largeur a = N/σ, centré sur le point de passage, et ce bloc doit tenir dans le joint.

Un joint rompt quand le bloc comprimé atteint le bord du joint



Excentricité relative ex = 2M / (N·ep), de +1 (intrados) à −1 (extrados). Ici ex = −0,072.
Coefficient du joint CR = ep (1 − |ex|) σ / N = 0,40 × 0,928 × 5 000 / 352,6 = 5,26

critère de résistance d'un joint · joint de clé de EXEMPLE.DON

Quand toutes les charges sont multipliées par t, N devient t·N mais le point de passage reste le même : le bloc s'élargit autour de ce point jusqu'à toucher une face. Ce multiplicateur limite est le coefficient du joint.

Exemple chiffré : joint de clé du chargement 1 de `EXEMPLE.DON`, sur la ligne optimale.

Grandeur	Valeur
Épaisseur du joint ep	0,40 m
Résistance de la maçonnerie σ	5 000 kPa
Effort normal N	352,6 kN
Moment au centre M	−5,08 kN·m
Excentricité relative ex = 2M/(N·ep)	−0,072, du côté de l'extrados
Coefficient CR = ep (1 − |ex|) σ / N	0,40 × 0,928 × 5 000 / 352,6 = 5,26

Ce joint donne exactement le coefficient de l'ouvrage, 5,2638 : c'est un des joints critiques de la ligne optimale.

Interprétation du coefficient de rupture F :

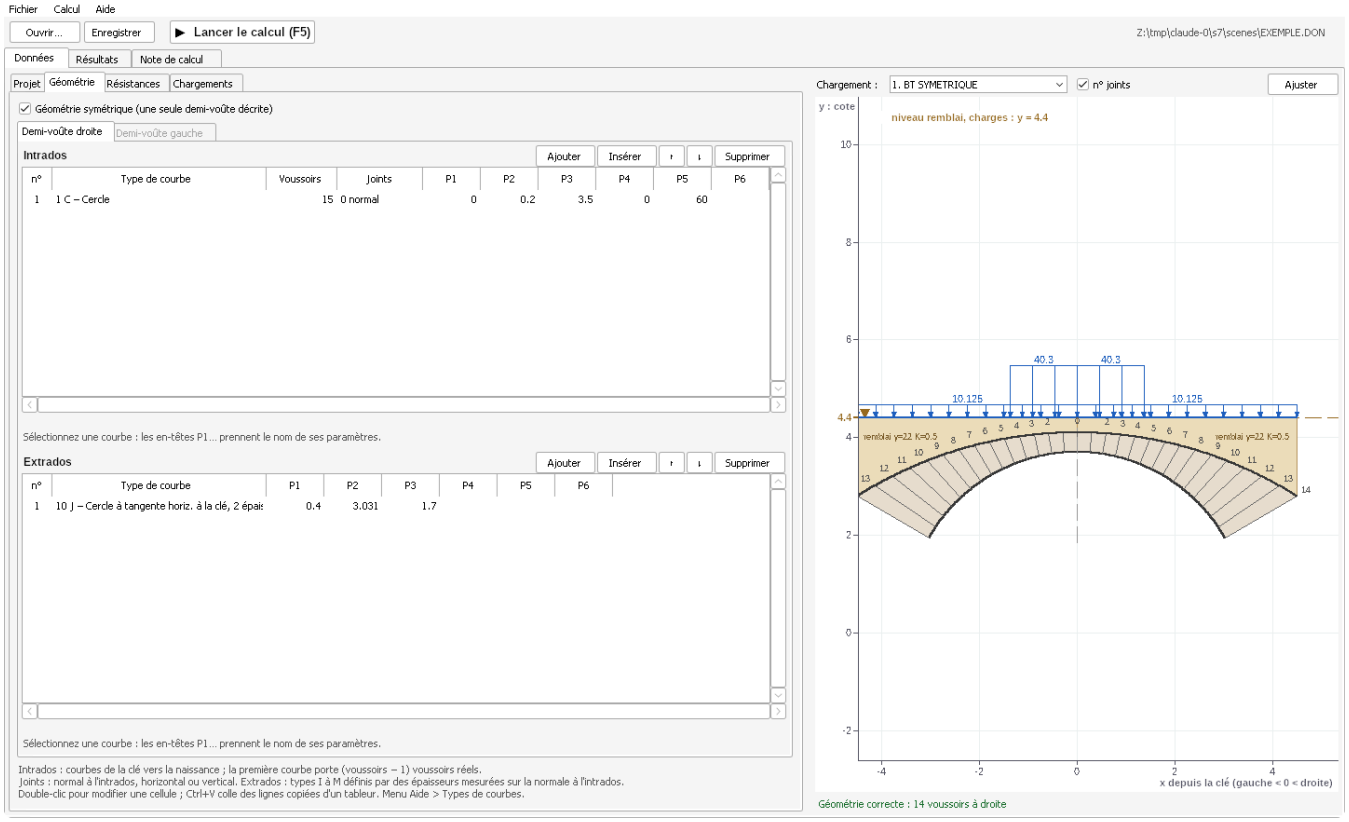
- F < 1 : la voûte est certainement instable sous les charges données ;
- F > 1 : la voûte est potentiellement stable ; la notice du SETRA (1993) demande F ⩾ 3 sous charges pondérées, et l'interface affiche en rouge un coefficient inférieur à 3 ;
- « instable vis-à-vis du critère de traction » : aucune ligne de pression ne reste dans l'épaisseur ; le coefficient affiché vaut 0.

- F mesure la réserve vis-à-vis de l'écrasement ; la marge sur le trafic (λ, λ∞) et la qualité de la forme (FS géo) sont décrites dans « Coefficients de sécurité ».

Pas à pas : un premier calcul

L'exemple fourni est la voûte de la notice du SETRA : un arc de cercle surbaissé sous remblai, avec une charge routière. Il se refait en cinq minutes.

1. **Ouvrir l'exemple :** lancez `VOUTE_Python.exe`, puis Fichier > Ouvrir…, et choisissez `exemples\voutes\EXEMPLE.DON`.
2. **Contrôler la géométrie :** dans l'onglet Géométrie, l'intrados est un cercle (type C : centre, rayon, angles de début et de fin) et l'extrados un cercle à tangente horizontale (type J : épaisseur à la clé, point et épaisseur à la naissance). Le dessin de droite montre la voûte, les numéros des joints et les charges du chargement choisi. Le message vert « Géométrie correcte » confirme que le moteur de calcul accepte les données.
3. **Lancer le calcul :** appuyez sur F5. Les données sont enregistrées, le calcul tourne en arrière-plan (la fenêtre reste utilisable), puis la page Résultats s'ouvre avec le coefficient de chaque chargement : 5,2638 pour le chargement symétrique, 6,7481 pour le dissymétrique.
4. **Lire les lignes de pression :** sélectionnez la ligne optimale, HMAX et HMIN, puis choisissez la courbe « Excentricité relative » (voir la section suivante). Les gros points marquent les joints critiques.
5. **Ouvrir la note :** l'onglet Note de calcul contient la note complète, que le bouton « Ouvrir dans l'éditeur de texte » permet d'imprimer.



Pour comprendre l'effet des données, trois variantes à essayer :

Modification de EXEMPLE.DON	Chargement 1	Chargement 2	Ce que cela montre
Aucune	5,26	6,75	Référence.
Résistance de la maçonnerie 3 000 au lieu de 5 000 (onglet Résistances)	3,16	4,05	Le coefficient est proportionnel à σ : la rupture vient de l'écrasement de la maçonnerie dans les joints critiques.
Épaisseur à la clé 0,50 au lieu de 0,40 (extrados, P1)	6,58	8,29	Une voûte plus épaisse laisse plus de place à la ligne de pression et au bloc comprimé.
Résistance très grande (10^6)	1 053	1 350	Sans limite d'écrasement, une voûte stable ne romprait jamais sous des charges multipliées : le coefficient mesure bien la réserve vis-à-vis de l'écrasement.

Avant de comparer, enregistrez chaque variante sous un autre nom (Fichier > Enregistrer sous…).

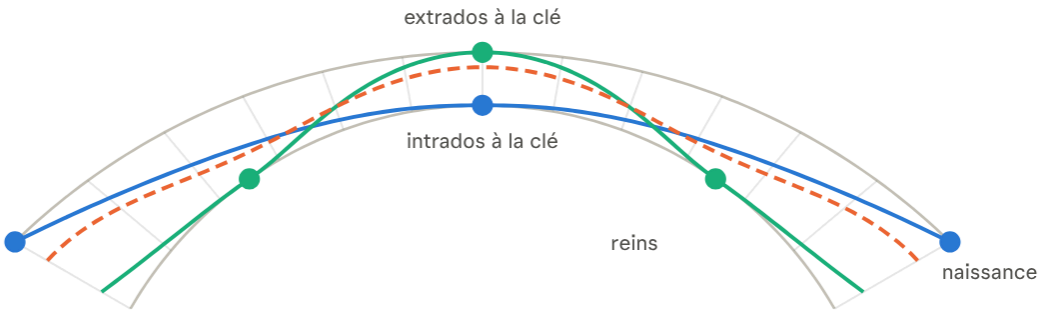
Comprendre les lignes de pression

Pour un même chargement, beaucoup de lignes de pression sont en équilibre. Chacune correspond à un choix de la poussée H, de sa cote Z à la clé et de l'effort V. Les lignes extrêmes bornent le domaine de stabilité :

- **HMIN :** la poussée la plus faible possible. La ligne remonte à l'extrados à la clé et descend à l'intrados aux reins. Elle décrit une voûte qui « s'ouvre », par exemple quand les naissances s'écartent.
- **HMAX :** la poussée la plus forte possible. La ligne passe à l'intrados à la clé et à l'extrados aux naissances. Elle décrit une voûte serrée entre ses appuis.
- **Ligne optimale :** celle qui éloigne le plus tous les joints de la rupture. Son coefficient est le coefficient de rupture de la voûte.

Entre poussée minimale et maximale, une infinité de lignes de pression

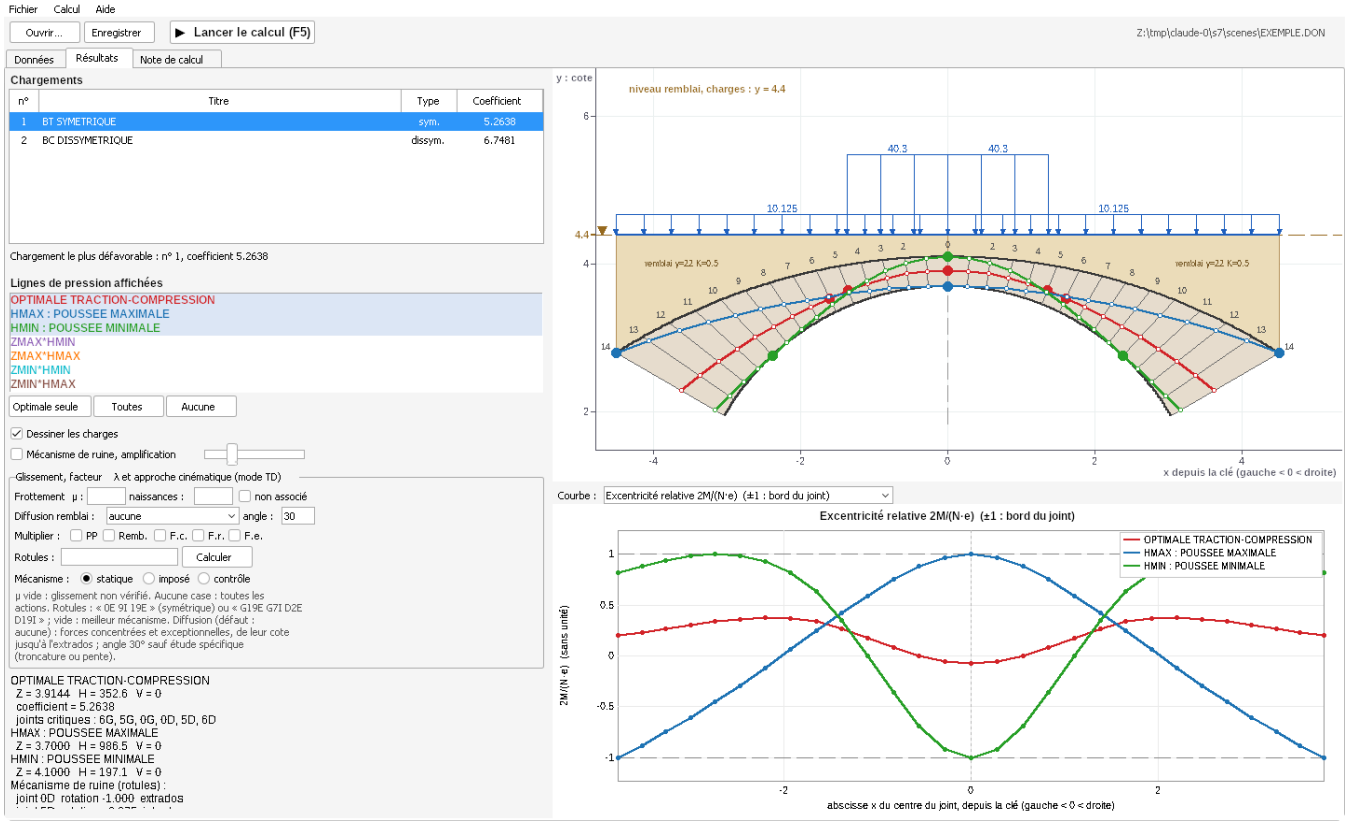
EXEMPLE.DON, chargement 1 : le programme retient la ligne qui éloigne le plus les joints de la rupture



HMAX, poussée maximale (H = 986 kN) : intrados à la clé, extrados aux naissances
HMIN, poussée minimale (H = 197 kN) : extrados à la clé, intrados aux reins
ligne optimale (H = 353 kN) : la plus centrée, coefficient de rupture 5,26

lignes du domaine de stabilité · poussée minimale, maximale et ligne optimale

Dans la note, l'excentricité relative de chaque joint vaut +1 si la ligne touche l'intrados et −1 si elle touche l'extrados. Un joint à ±1 est une rotule. Avec quatre rotules alternées, la voûte devient un mécanisme. L'interface trace les mêmes lignes, et la courbe d'excentricité montre où chacune touche les faces :



Lecture de la capture : la ligne HMAX (bleue) a une excentricité de +1 à la clé et de −1 aux naissances, la ligne HMIN (verte) le contraire. La ligne optimale (rouge) reste entre −0,1 et +0,4 : elle est limitée par la résistance de la maçonnerie, pas par les bords des joints.

Les autres lignes caractéristiques de la note sont les lignes à cote imposée du domaine de traction (ZMAX*HMIN, ZMAX*HMAX, ZMIN*HMIN, ZMIN*HMAX) et, si le coefficient dépasse 1, les lignes extrêmes du domaine de compression (ZMAX*, ZMIN*, HMAX*, HMIN*), qui respectent aussi la résistance de la maçonnerie. Elles se sélectionnent dans la liste « Lignes de pression affichées » ; une bulle d'aide rappelle la définition de chacune.

Coefficients de sécurité

VOUTE Python donne pour chaque chargement quatre coefficients, qui répondent à quatre questions différentes. Ils ne sont pas ordonnés entre eux : aucun ne remplace les autres. La note technique « Coefficients de sécurité » (`notices\Note_technique_coefficients_securite.pdf`) les détaille, avec des exemples.

Coefficient	Question	Définition	Limites et repères
FM, coefficient de rupture	De combien la résistance des matériaux peut-elle baisser ?	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 encore avec σ / FM	Mesure la marge vis-à-vis de l'écrasement, pas celle 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	De combien le trafic peut-il augmenter ?	Facteur sur les seules actions variables (cadre « Actions variables (multipliées par λ) » de l'onglet Chargements, `--variable`, ligne `VARIABLE`), les autres, permanentes, fixées à leur valeur pondérée ; résistance finie	Dépend du choix des actions variables ; « non demandé » si aucune n'est cochée (défaut), égal à FM si toutes le sont. λ < 1 : ruine sous le chargement

Coefficient	Question	Définition	Limites et repères
λ∞, facteur à résistance infinie	Même question, sans écrasement	λ pour une maçonnerie infiniment résistante, glissement vérifié comme pour λ	λ ⩽ λ∞, l'écart est dû à l'écrasement ; infini si les actions variables seules ont une ligne de pression dans la maçonnerie
FS géo, coefficient géométrique d'Heyman	La forme est-elle adaptée aux charges ?	Épaisseur réelle / épaisseur minimale d'un ouvrage concentrique qui contient encore une ligne de pression ; charges inchangées, résistance infinie, ni traction ni glissement	⩾ 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

Dans la note. FS_GEO a son bloc après le domaine de stabilité : valeur, épaisseur minimale à la clé et aux naissances, ligne optimale géométrique (la ligne de pression la mieux centrée) et joints limitants, où elle touche la voûte réduite. Sous FM, une phrase rappelle qu'il est aussi le facteur sur les résistances et donne les résistances nécessaires σ / FM ; λ∞ suit λ. La note se termine par le tableau « COEFFICIENTS DE SECURITE » et la signification de chaque coefficient.

Dans l'interface. La page Résultats a une colonne par coefficient ; une bulle d'aide sur chaque en-tête donne sa signification, et le bouton « Signification des coefficients… » (aussi Aide > Coefficients de sécurité) ouvre une fiche complète. La ligne « OPTIMALE GEOMETRIQUE » de la liste des lignes dessine aussi la voûte réduite en tirets et marque les joints limitants. Pour un ouvrage, la case « Ligne géométrique et ouvrage réduit (Heyman) » fait de même, et la courbe selon la position du convoi trace aussi FS géo.

Exemple, `TD10.DON` (voûte de 10 m du classeur Epure_Hinge, `--variable 3,4,5`). FM = 5,63 ; λ = 3,76 ; λ∞ = 7,36 ; FS géo = 2,31. Les joints limitants de la ligne géométrique, 0 E, 9 I et 19 E, sont les rotules du mécanisme de l'épure ; λ vaut la moitié de λ∞ : l'écrasement réduit de moitié la marge sur les charges variables.

Frottement. FS géo ignore le glissement (hypothèse d'Heyman), même quand le frottement est donné ; la note le rappelle. FM, λ et λ∞ le vérifient.

Fichiers et option. Les colonnes ajoutées des fichiers CSV viennent en fin de ligne : `lambda_inf;fs_geo;actions_variables` pour une voûte ; `fm;position_fm;lambda;lambda_inf;fs_geo;position_fs_geo;section_fs_geo;actions_variables` pour un ouvrage, dont la colonne `coefficient` garde son sens (λ avec

`VARIABLE`, FM sinon). La colonne `actions_variables` (version 1.2.1) vaut `aucune`, `toutes` ou la liste des actions variables (par exemple `f. reparties, f. exceptionnelles`). Un ouvrage écrit aussi `NOM_ligne_geo.csv`, la ligne optimale géométrique. L'option `--sans-heyman` supprime le calcul de FS géo.

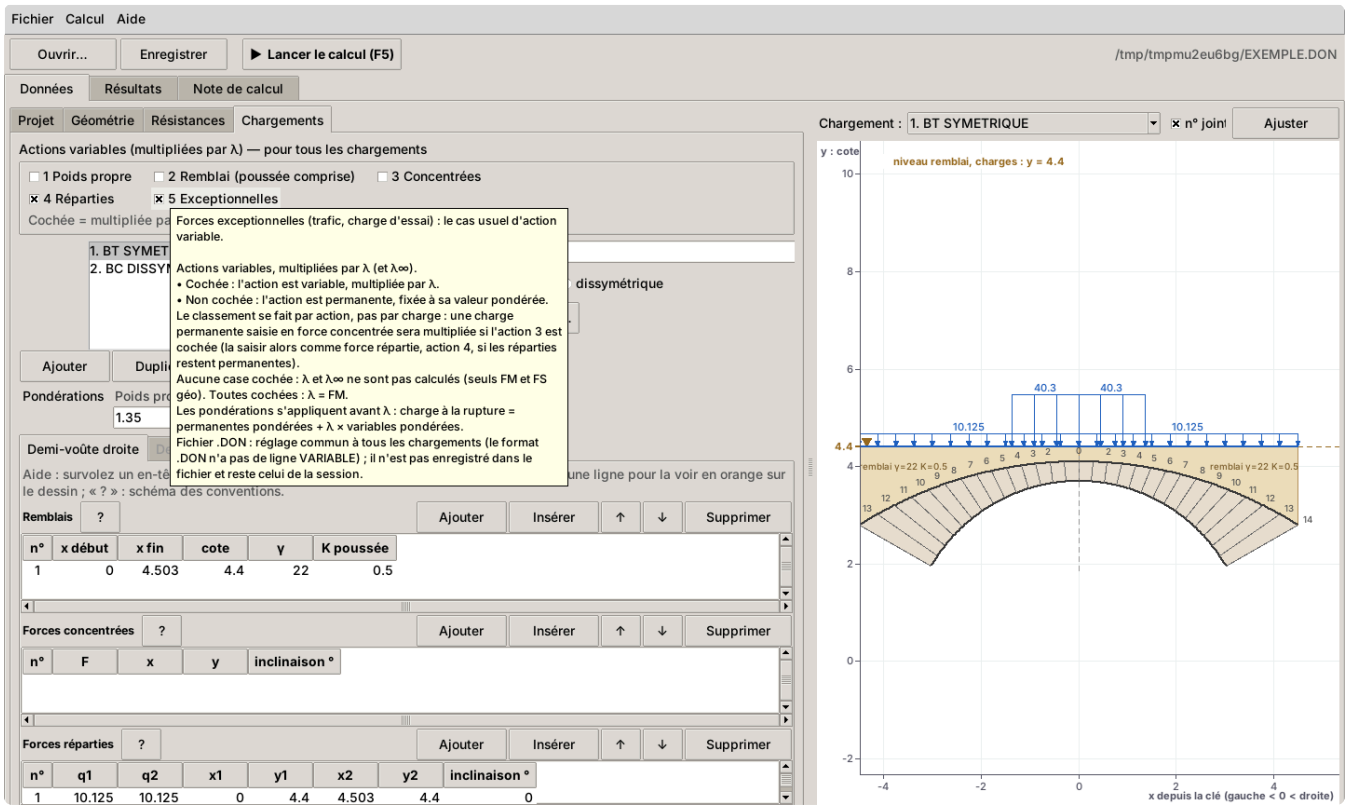
Déclarer les actions variables (λ)

λ et λ∞ ne sont calculés que pour les actions déclarées variables, dans le cadre « Actions variables (multipliées par λ) » de l'onglet Chargements. Une case cochée rend l'action variable : elle est multipliée par λ. Une case non cochée la laisse permanente : elle reste fixée à sa valeur pondérée. À la rupture, les charges valent donc permanentes pondérées + λ × variables pondérées.

Case	Action	Remarque
1 Poids propre	Poids de la maçonnerie (voûte ; pour un ouvrage, arches, piles et culées)	Rarement variable
2 Remblai (poussée comprise)	Poids et poussée du remblai ; pour un ouvrage, aussi les terres à l'arrière des culées	Rarement variable
3 Concentrées	Forces concentrées	Selon ce qu'elles représentent
4 Réparties	Forces réparties	En général permanentes (chaussée, superstructure)
5 Exceptionnelles	Forces exceptionnelles	Le cas usuel : trafic, charge d'essai
Convoi	Charges du convoi balayé (ouvrage .VMA)	Grisée si le chargement n'a pas de convoi

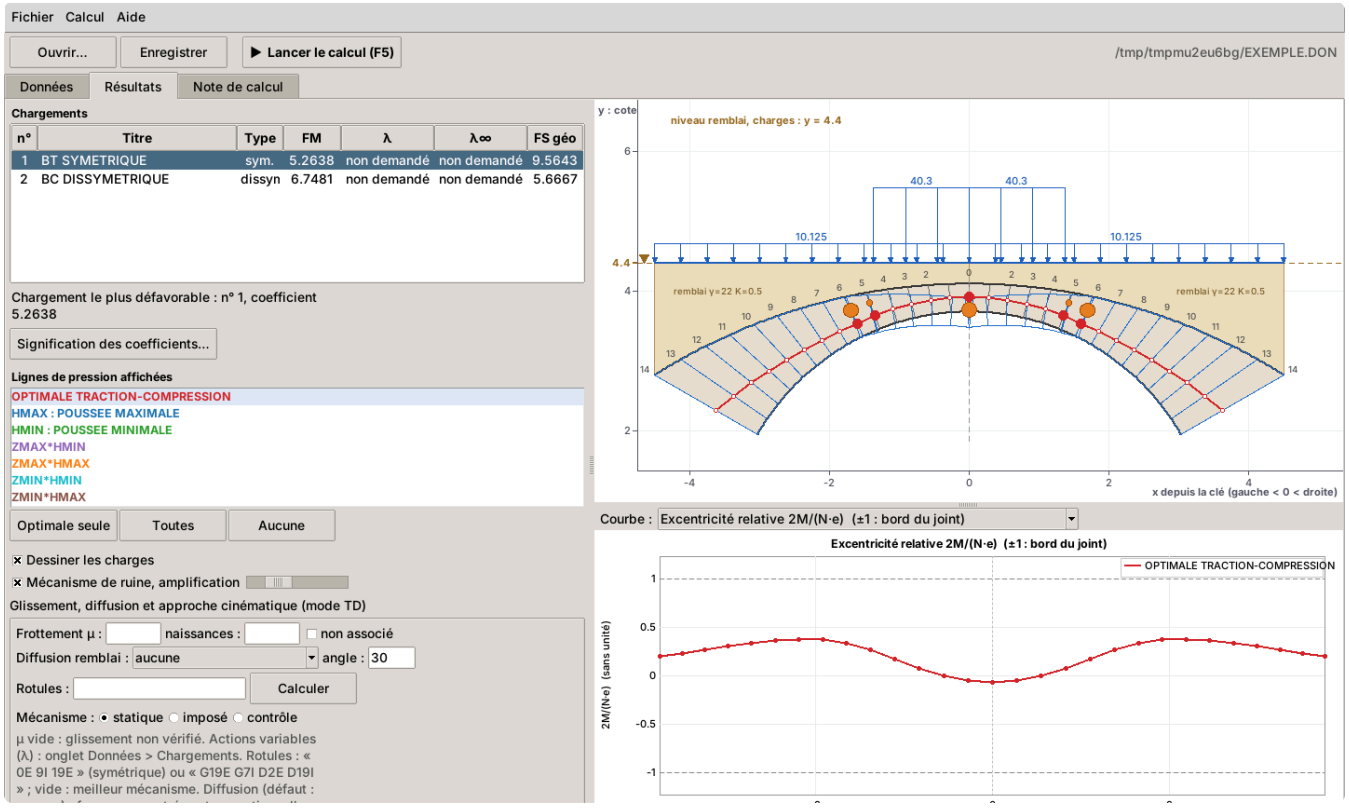
Le classement se fait par action, pas par charge. Toutes les forces d'une même action sont variables ou toutes permanentes. Une charge permanente saisie en force concentrée sera multipliée par λ si l'action 3 est cochée ; si les forces concentrées représentent du trafic, saisissez plutôt cette charge permanente en force répartie (action 4).

Voûte (.DON) : un réglage pour tous les chargements. Le cadre est en tête de l'onglet Chargements, avec la mention « pour tous les chargements ». Le format .DON de 1993 n'a pas de ligne VARIABLE : le réglage n'est pas enregistré dans le fichier et reste celui de la session (il équivaut à l'option `--variable` de la ligne de commande).



Ouvrage (.VMA) : un réglage par chargement. Le cadre est sous les pondérations du chargement. Il est enregistré dans la ligne `VARIABLE` du chargement (`VARIABLE 5 CONVOI` , par exemple) ; aucune case cochée, pas de ligne `VARIABLE` .

Par défaut, aucune case n'est cochée, comme dans les versions précédentes : FM et FS géo sont calculés, λ et λ∞ non. Les colonnes λ et λ∞ de la page Résultats affichent alors « non demandé » (une bulle explique pourquoi), la note de calcul la ligne « Actions variables : aucune - LAMBDA et LAMBDA_INF non calcules » et `_resume.csv` la valeur `aucune` . Toutes les cases cochées : λ multiplie toutes les charges, il est égal à FM (« = FM » dans le tableau) et λ∞ n'est pas calculé.

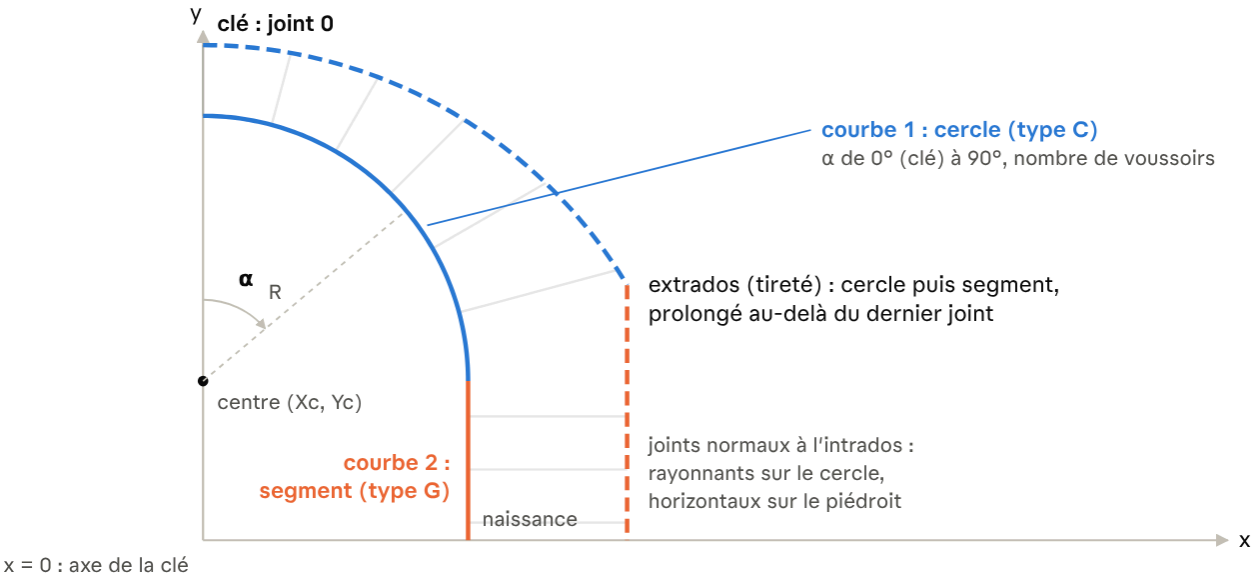


Une bulle d'aide sur chaque case rappelle ces règles. Avant la version 1.2.1, ces cases s'appelaient « Multiplier » : sur la page Résultats pour une voûte, sous les pondérations (toutes cochées par défaut) pour un ouvrage.

Décrire une voûte : la géométrie

On décrit la demi-voûte droite de la clé vers la naissance, par une suite de courbes d'intrados puis une suite de courbes d'extrados, dans un repère dont l'axe des y passe par la clé. Le programme découpe l'intrados en voussoirs de même longueur d'arc sur chaque courbe, puis trace les joints jusqu'à l'extrados. Si la voûte est dissymétrique, la demi-voûte gauche se décrit de la même façon, x compté vers la gauche.

La demi-voûte droite se décrit de la clé vers la naissance



Demi-voûte gauche (géométrie dissymétrique) : même description, avec x compté positivement vers la gauche à partir de la clé.

description de la géométrie · intrados cercle + piédroit

Code	Type	Courbe	Paramètres P1 à P6
1	C	Cercle	Xc, Yc, R, α0, αf
2	B	Ellipse X = Xc + A sin α, Y = Yc + B cos α	Xc, Yc, A, B, α0, αf
3	A	Parabole Y = Y0 − K X²	Y0, K, X1, X2
4	H	Segment entre 2 points	X0, Y0, Xf, Yf
5	D	Cercle tangent à la courbe précédente	Xf, Yf
6	E	Cercle à tangente horizontale à la clé	Y0, Xf, Yf
7	F	Cercle par 3 points	X1, Y1, X2, Y2, X3, Y3
8	G	Segment jusqu'à un point	Xf, Yf
9	I	Extrados : cercle tangent, 1 épaisseur	Xf, Ef
10	J	Extrados : cercle à tangente horizontale, 2 épaisseurs	E0, Xf, Ef
11	K	Extrados : cercle par 3 épaisseurs	X1, E1, X2, E2, X3, E3
12	L	Extrados : segment jusqu'à 1 épaisseur	Xf, Ef
13	M	Extrados : segment entre 2 épaisseurs	X0, E0, Xf, Ef

Dans l'onglet Géométrie, les en-têtes P1 à P6 prennent le nom des paramètres du type choisi, et le menu Aide > Types de courbes résume ce tableau.

Règles à connaître :

- Les angles α sont en degrés, comptés depuis la verticale, de 0 (clé) à 90 au plus.
- Chaque courbe commence là où finit la précédente. Une courbe définie depuis la fin de la précédente (D, G, I, L) part de sa vraie fin : c'est un des points où VOUTE Python diffère de la version de 1993.
- Les épaisseurs (types I à M) se mesurent depuis le point d'intrados d'abscisse X, selon la direction des joints.
- Nature des joints d'une courbe d'intrados : 0 normaux à l'intrados, 1 horizontaux, 2 verticaux. Le joint de clé est toujours vertical.
- Nombre de voussoirs : sur la première courbe d'intrados, il compte le voussoir fictif de 1993, qui n'existe plus ; la courbe a donc un voussoir de moins que le nombre saisi. Les courbes suivantes ont exactement le nombre saisi. Les joints sont numérotés de 0 (clé) à N (naissance).
- L'extrados doit dépasser le dernier joint (sinon erreur 101), et à la retombée il doit rester au-dessus de l'intrados (sinon erreur 120).

Résistances, chargements et aide à la saisie

L'interface reprend le fichier `.DON` page par page. Le dessin à droite des données est refait à chaque modification par le moteur de calcul lui-même : c'est la géométrie exacte du calcul, et une erreur de données (numéro de la version 1993) s'affiche en rouge sous le dessin.

Page	Contenu
Données — Projet	Titres, numéro, date, poids volumique de la maçonnerie, coefficient de réduction d'épaisseur.
Données — Géométrie	Courbes d'intrados et d'extrados de chaque demi-voûte : type, voussoirs, nature des joints, paramètres P1 à P6.
Données — Résistances	Zones de joints : σ de la maçonnerie, joints de début et de fin, contre-voûte.
Données — Chargements	Liste des chargements, pondérations, type symétrique ou dissymétrique, remblais, forces concentrées, réparties et exceptionnelles.

Page	Contenu
Résultats	Coefficient par chargement, lignes de pression dans la voûte, mécanisme de ruine, courbes le long de la voûte (excentricité, coefficient par joint, N, T, M, T/N), réglages du glissement, de la diffusion et du mode TD.
Note de calcul	Note complète, ouvrable dans l'éditeur de texte.

Résistances. Une zone donne la résistance σ de la maçonnerie des joints j1 à j2, et éventuellement la résistance σb et l'épaisseur eb d'une contre-voûte côté intrados. Les zones gardent la numérotation des fichiers de 1993, où la clé est le joint 1 : le joint n du dessin est le joint n + 1 des zones, et la zone « 1 à 200 » couvre toute la voûte. Le coefficient de réduction d'épaisseur (onglet Projet) ne réduit que la section résistante des joints ; les charges restent appliquées à la géométrie réelle.

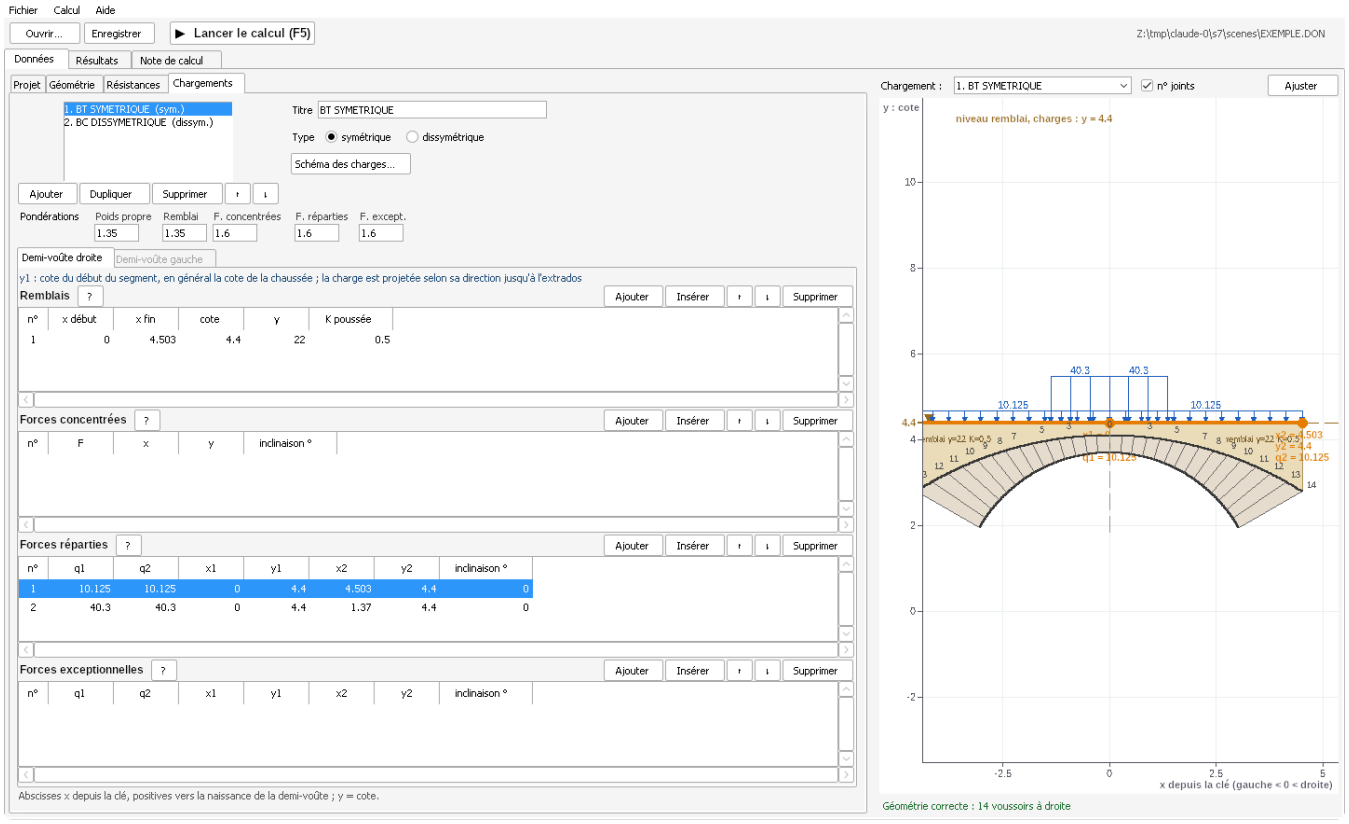
Chargements. Chaque chargement a cinq pondérations (poids propre, remblai, forces concentrées, réparties, exceptionnelles) et un type : symétrique (la demi-voûte gauche reçoit les mêmes charges que la droite) ou dissymétrique (chaque demi-voûte a ses charges).

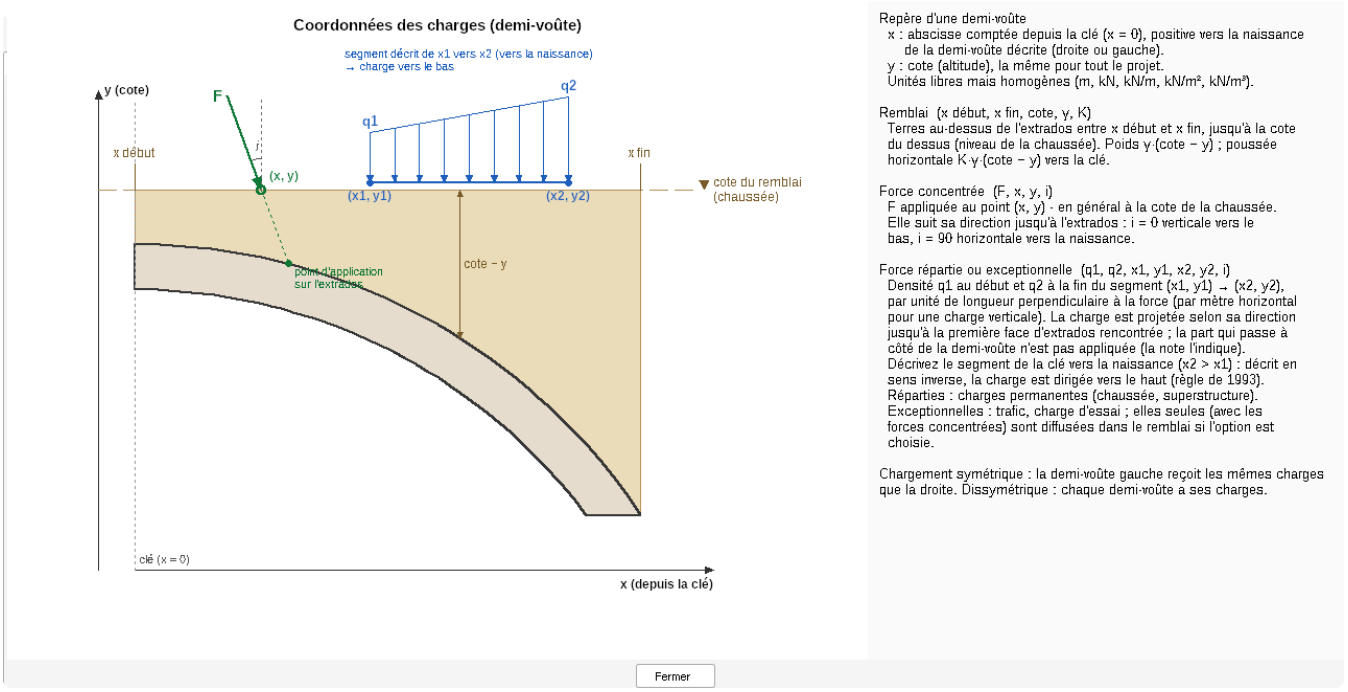
Charge	Valeurs	Ce que fait le programme
Remblai	x début, x fin, cote, γ, K	Poids γ·(cote − y) sur la projection horizontale de l'extrados ; poussée K·γ·(cote − y) sur sa projection verticale, vers la clé
Force concentrée	F, x, y, inclinaison i	Appliquée au point où sa ligne d'action rencontre l'extrados ; i = 0 verticale vers le bas, i = 90 horizontale vers la naissance
Force répartie	q1, q2, x1, y1, x2, y2, i	Densité par unité de longueur perpendiculaire à la force ; chaque rayon suit sa direction jusqu'à la première face d'extrados rencontrée. Charges permanentes (chaussée, superstructure)
Force exceptionnelle	idem	Trafic, charge d'essai ; seules diffusées dans le remblai avec les forces concentrées, si l'option est choisie

Aide à la saisie

L'interface explique chaque valeur à l'endroit où on la saisit, sans avoir à ouvrir la notice.

- **Bulles d'aide :** survoler un champ, un en-tête de colonne, une cellule, une case à cocher ou un bouton affiche la signification de la valeur, son unité et sa convention, dans toutes les pages, y compris les Résultats (colonnes, lignes de pression, réglages du cadre « Glissement, diffusion et approche cinématique »). La bulle « n° joints » rappelle que le dessin numérote la clé 0, et les zones de résistance la clé 1.
- **Zone d'aide des chargements :** au-dessus des tableaux de charges, une ligne rappelle la colonne survolée ou en cours de modification, par exemple pour y1 : « cote du début du segment, en général la cote de la chaussée ».
- **Schéma des charges :** le bouton « Schéma des charges… », le bouton « ? » de chaque tableau et le menu Aide ouvrent un schéma coté des conventions.
- **Ligne sélectionnée sur le dessin :** la ligne choisie dans un tableau de charges est surlignée en orange sur le dessin, avec ses coordonnées ; on vérifie ainsi qu'une charge est au bon endroit et à la bonne cote.
- **Valeurs proposées :** le bouton Ajouter d'un tableau de charges propose une ligne cohérente avec la voûte (remblai de la clé à la naissance, force au milieu de la demi-voûte…) qu'il suffit d'ajuster.
- **Axes et niveaux :** les dessins ont des axes gradués (x depuis la clé, ou X abscisse globale pour un ouvrage ; y = cote). Le niveau du remblai et celui des charges sont tracés en pointillé et rappelés en haut à gauche du dessin.
- **Tableaux et dessins :** double-clic pour modifier une cellule, Tab pour passer à la suivante, Ctrl+V pour coller des lignes copiées d'un tableur ; molette pour zoomer, glisser pour déplacer, double-clic pour recadrer ; export SVG par le menu Fichier.





Les fichiers `.DON` écrits par l'interface ont la présentation de la version PC (une valeur par ligne) : les 40 fichiers de test relus et réécrits donnent des résultats identiques. À la réouverture d'un `.DON`, les résultats du dernier calcul sont rechargés s'ils sont plus récents que les données.

Règles de 1993 conservées et messages d'erreur

VOUTE Python garde les règles de la version de 1993 qui fixent le sens des données, pour qu'un fichier `.DON` décrive toujours la même voûte. Trois d'entre elles surprennent souvent.

Piédroit vertical en fin de remblai. Une face verticale de l'extrados ne reçoit la poussée d'un remblai que si son abscisse x vérifie x début ⩽ x < x fin. Un piédroit vertical placé exactement en x = x fin ne reçoit donc pas de poussée. Dans la version de 1993, le raccord des courbes d'extrados inclinait légèrement ces piédroits, qui recevaient la poussée ; avec la géométrie exacte, ils sont verticaux et ne la reçoivent plus. La poussée des terres stabilise les reins : sans elle, le coefficient est à peu près divisé par deux.

Fichier	Chargement	Version PC de 1993	VOUTE Python 1.2
ALLIESYM	1 / 2	3,21 / 4,71	1,53 / 2,22
ALLIEDI1	1 / 2	3,77 / 5,10	1,46 / 1,81
ALLIEDI2	1 / 2	5,53 / 8,04	2,23 / 3,66

Sur ALLIESYM, la poussée horizontale du remblai sur la demi-voûte passe de 370,8 à 95,8. Pour qu'un piédroit vertical reçoive la poussée, faire finir le remblai un peu au-delà (x fin plus grand que l'abscisse du piédroit) : on retrouve alors 370,8. La note de calcul donne, pour chaque chargement, les efforts du remblai par voussoir : on y vérifie que les derniers voussoirs reçoivent bien une force horizontale.

Sens des forces réparties. Une force répartie agit du côté droit du segment orienté du début vers la fin : un segment décrit de droite à gauche donne une charge dirigée vers le haut, qui ne charge pas la voûte (la note le signale). Chaque rayon de la charge suit sa direction jusqu'à la première face d'extrados rencontrée ; la part qui passe à côté de la demi-voûte n'est pas appliquée, et la note l'indique (« forces réparties hors de la demi-voûte »).

Chargement symétrique sur géométrie dissymétrique. VOUTE Python applique les actions symétrisées à la géométrie de gauche. La version PC de 1993 donne dans ce cas un coefficient faux : pour comparer avec elle, décrire le chargement en dissymétrique.

Les messages d'erreur portent les numéros de la version 1993 (annexe 1 du manuel de référence du SETRA, dans `notices\SETRA_1993`), complétés pour les ouvrages.

Numéro	Signification	Que faire
101	Un joint n'intercepte pas l'extrados	Prolonger l'extrados au-delà du dernier joint
120	À la retombée, l'extrados est plus bas que l'intrados	Revoir la dernière courbe d'extrados
125	Une charge répartie ne rencontre pas la voûte	Vérifier ses abscisses et son sens de description
128	Cote de remblai sous l'extrados	Vérifier la cote du remblai
300 à 310	Ouvrages : arches qui se chevauchent, appui trop étroit, fondation trop haute, faces ou bloc d'appui incohérents…	Voir « Ouvrages à plusieurs arches »

Une erreur arrête le calcul : l'interface affiche le message, la ligne de commande l'écrit et rend un code de retour non nul (1 option incorrecte, 2 géométrie, 3 lecture, 4 chargement). Un message « ERREUR INTERNE DE VOUTE Python (a signaler) » signale un défaut du programme : garder le fichier de données et le message complet.

Note de calcul, fichiers CSV et ligne de commande

Le calcul (F5 dans l'interface) écrit à côté du fichier `NOM.DON` la note `NOM_note.txt` et des fichiers CSV pour un tableur (séparateur `;`, point décimal).

La note reprend la géométrie (courbes données, courbes traitées, découpage), puis, pour chaque chargement :

- les efforts par voussoir, type d'action par type d'action, puis pondérés ;
- le domaine de stabilité en traction (lignes ZMAX*HMIN, ZMAX*HMAX, ZMIN*HMIN, ZMIN*HMAX, HMIN, HMAX, et le domaine discret en symétrique) ;
- le coefficient de rupture, la ligne optimale et le mécanisme de ruine ;
- si le coefficient dépasse 1, le domaine de compression (ZMAX*, ZMIN*, HMAX*, HMIN*).

Chaque ligne est détaillée joint par joint : N, T, M, inclinaison T/N, excentricité, taux de compression, coefficient. Viennent ensuite le glissement maximal, les réactions d'appui et les joints faibles. Un résumé final donne le coefficient de chaque chargement. Les grandeurs suivent les conventions de la version 1993 : excentricité +1 à l'intrados, V à la clé dans le sens de la version PC.

Fichier	Contenu
`NOM_resume.csv`	Une ligne par chargement : stabilité en traction, coefficient, ligne optimale, facteurs λ, puis λ∞ et coefficient géométrique d'Heyman (colonnes lambda_inf et fs_geo)
`NOM_joints.csv`	Géométrie des joints et résistances
`NOM_efforts.csv`	Efforts par voussoir, par type d'action, puis pondérés
`NOM_lignes.csv`	Efforts sur chaque joint pour chaque ligne caractéristique et pour la ligne optimale géométrique
`NOM_contour.csv`	Contour réel de chaque voussoir, pour le dessin
`NOM_mecanisme*.csv`	Mécanisme de ruine (statique, imposé, de contrôle)

En ligne de commande, `voute.bat` lance le calcul. Ouvrir une invite de commandes dans le dossier de VOUTE Python, puis par exemple :

```
voute.bat exemples\voutes\EXEMPLE.DON -o EXEMPLE_note.txt --csv EXEMPLE
voute.bat EXEMPLE.DON --ligne 2 3.91 272 20
voute.bat exemples\ponts\TROIS.VMA -o note.txt --diffusion tronque
```

Option	Effet
`-o fichier`	Note de calcul (sinon à l'écran)
`--csv préfixe`	Fichiers CSV
`--court`	Note abrégée (sans efforts par type d'action ni détail des lignes caractéristiques)
`--sans-heyman`	Sans le coefficient géométrique d'Heyman, calculé par défaut (voir « Coefficients de sécurité »)
`--format 1983`	Lit un jeu de cartes de 1983 (automatique si l'extension n'est ni `.DON` ni `.VMA`)
`--ligne c Z H V`	Coefficient de rupture de la ligne (Z, H, V) pour le chargement c
`--variable`, `--rotules`, `--controle`, `--frottement`, `--glissement`	Facteur λ, mode TD et glissement : voir la section suivante
`--diffusion modèle`	Diffusion dans le remblai : voir « Diffusion des charges dans le remblai »

`LISEZMOI.md` (aussi en PDF dans `notices`) décrit toutes les options, les formats `.DON` et `.VMA` ligne par ligne et le contenu de chaque fichier CSV. Un programme Python peut aussi appeler le calcul directement : `from voute.api import execute`.

Voûte seule : mécanisme, facteur λ, mode TD et glissement

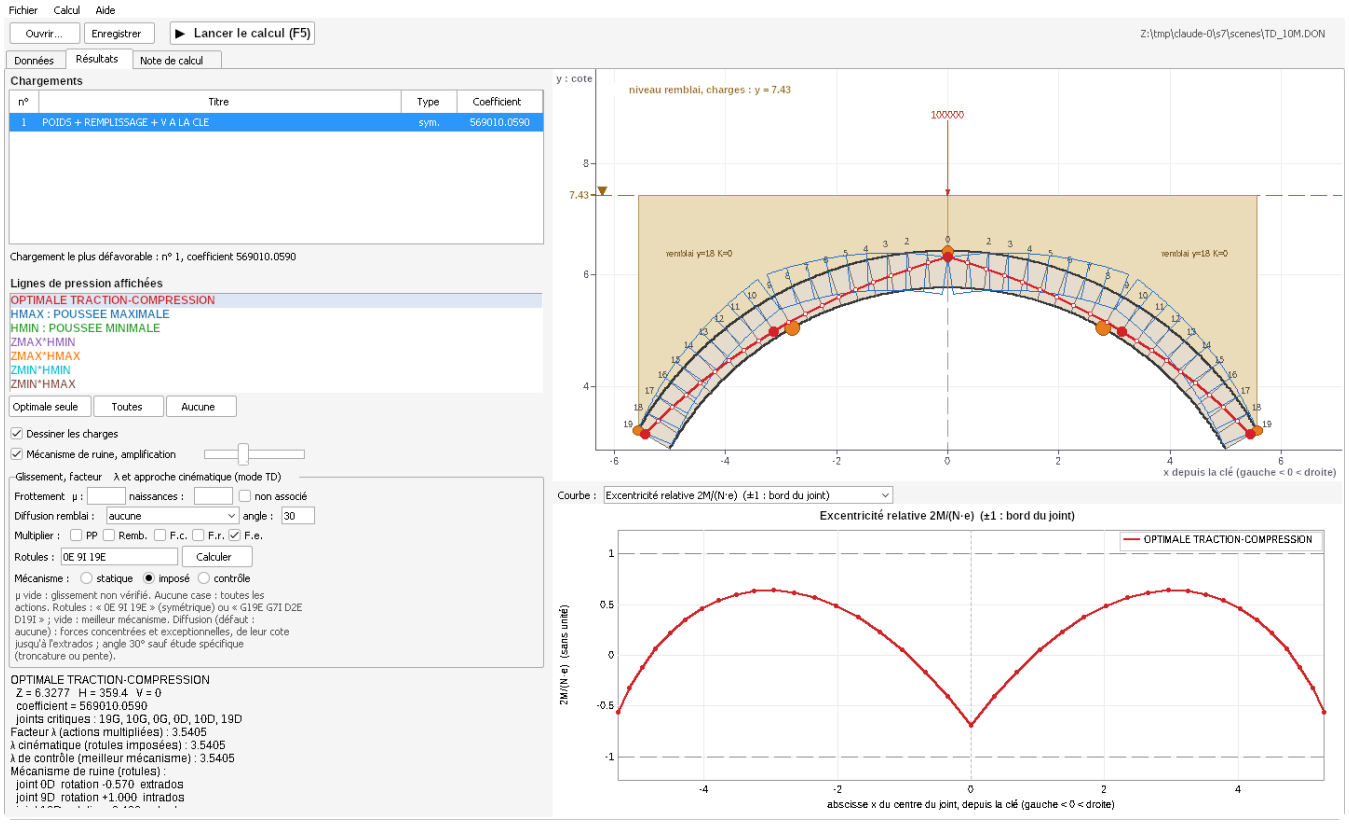
Le coefficient est calculé par programmation linéaire, comme pour les ouvrages. Par dualité, le calcul donne aussi le **mécanisme de ruine** : les joints qui s'ouvrent, leur rotation et la face qui reste comprimée. La case « Mécanisme de ruine, amplification » de la page Résultats dessine la déformée et les rotules ; la note donne le même tableau, avec le centre de rotation de chaque joint.

Le cadre « Glissement, diffusion et approche cinématique » de la page Résultats ajoute trois calculs, lancés par le bouton Calculer (ou F5) ; les actions variables du facteur λ se cochent en tête de l'onglet Chargements (voir « Déclarer les actions variables ») :

Réglage	Effet
Frottement μ, naissances, non associé	Vérifie le glissement des joints : effort tangent au plus μ × effort normal. Vide : glissement non vérifié.
Rotules	Mode TD : facteur d'un mécanisme de blocs rigides imposé, et recherche du meilleur mécanisme.

Les rotules s'écrivent par numéro de joint, celui du dessin et de la note (clé = 0), suivi de la face : `I` pour l'intrados, `E` pour l'extrados.

- Voûte et chargement symétriques : trois rotules sur la demi-voûte droite, par exemple `0E 9I 19E` (clé à l'extrados, joint 9 à l'intrados, naissance à l'extrados). C'est le mécanisme à cinq rotules du TD, l'autre moitié étant symétrique.
- Chargement dissymétrique : quatre rotules, précédées de `G` ou `D`, par exemple `G19E G7I D2E D19I`. Le joint de clé 0 est commun aux deux moitiés.
- Il n'y a pas de voussoir fictif : une rotule « 10I » dans la numérotation de 1993 s'écrit « 9I ».



Le texte des résultats donne trois valeurs :

- **Facteur λ (actions variables)** : la vraie valeur de ruine (théorème statique, avec la résistance de la maçonnerie).

- **λ cinématique (rotules imposées)** : la valeur du mécanisme choisi, toujours supérieure ou égale (borne supérieure). Si les faces choisies sont incompatibles, la note le dit.
- **λ de contrôle (meilleur mécanisme)** : le plus petit facteur sur tous les mécanismes à quatre rotules. Il est égal au facteur statique pour une maçonnerie infiniment résistante : c'est l'égalité des deux théorèmes.

Le sélecteur « Mécanisme : statique, imposé, contrôle » choisit le mécanisme dessiné.

Exemple du TD (voûte de 10 m). Le classeur Epure_Hinge donne λ = 3,538 pour la rotule intermédiaire à x = 2,80 m. VOUTE Python donne 3,5405 pour le même mécanisme (`0E 9I 19E`) ; la recherche de contrôle trouve ce même mécanisme. L'écart de 0,06 % vient de l'intégration du remplissage par le classeur.

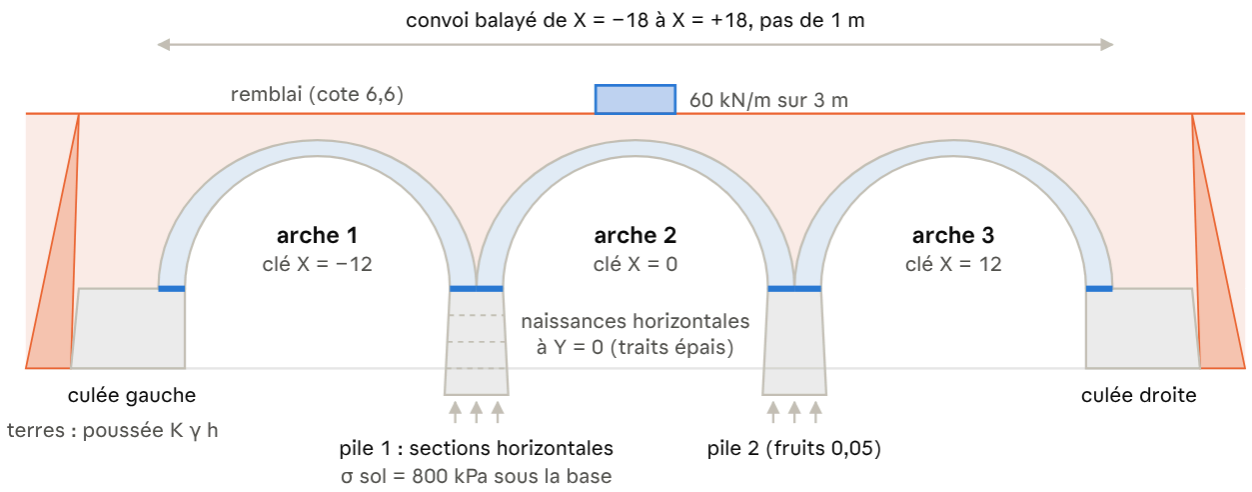
Convention de charge. Le classeur applique V entier à la demi-voûte étudiée : la voûte porte donc 2V. Pour comparer, mettre V sur chaque demi-voûte (force exceptionnelle à la clé). L'outil `outils\epure_hinge.py` convertit directement un classeur en `.DON` .

Glissement. Associé (par défaut), un joint qui glisse s'ouvre aussi : c'est l'hypothèse de l'analyse limite classique. Non associé, le glissement est pur, plus réaliste ; le programme itère alors sur l'effort normal, et le résultat est égal ou plus faible. La note indique le nombre d'itérations et liste les joints qui glissent. Dans les tableaux des lignes, les colonnes TAUX et COEF. RUPTURE donnent le critère de compression seul : le glissement se lit dans la colonne INCLINAISON (T/N), sur la ligne GLISSEMENT et dans le mécanisme de ruine (GLISSEMENTS).

En ligne de commande : `--variable 5` , `--rotules "0E 9I 19E"` , `--controle` , `--frottement 0.6` et `--glissement non_associe` .

Ouvrages à plusieurs arches

Un fichier `.VMA` décrit un pont complet : culée gauche, arches de gauche à droite séparées par des piles, culée droite. F5 dans l'interface (ou `voute.bat OUVRAGE.VMA`) calcule le coefficient de rupture de l'ouvrage entier. Ce calcul prend en compte les ruptures sur plusieurs travées : pile qui bascule ou sol qui cède sous la poussée d'une arche chargée, arches voisines à leur poussée maximale.



modèle d'un ouvrage · exemple TROIS.VMA

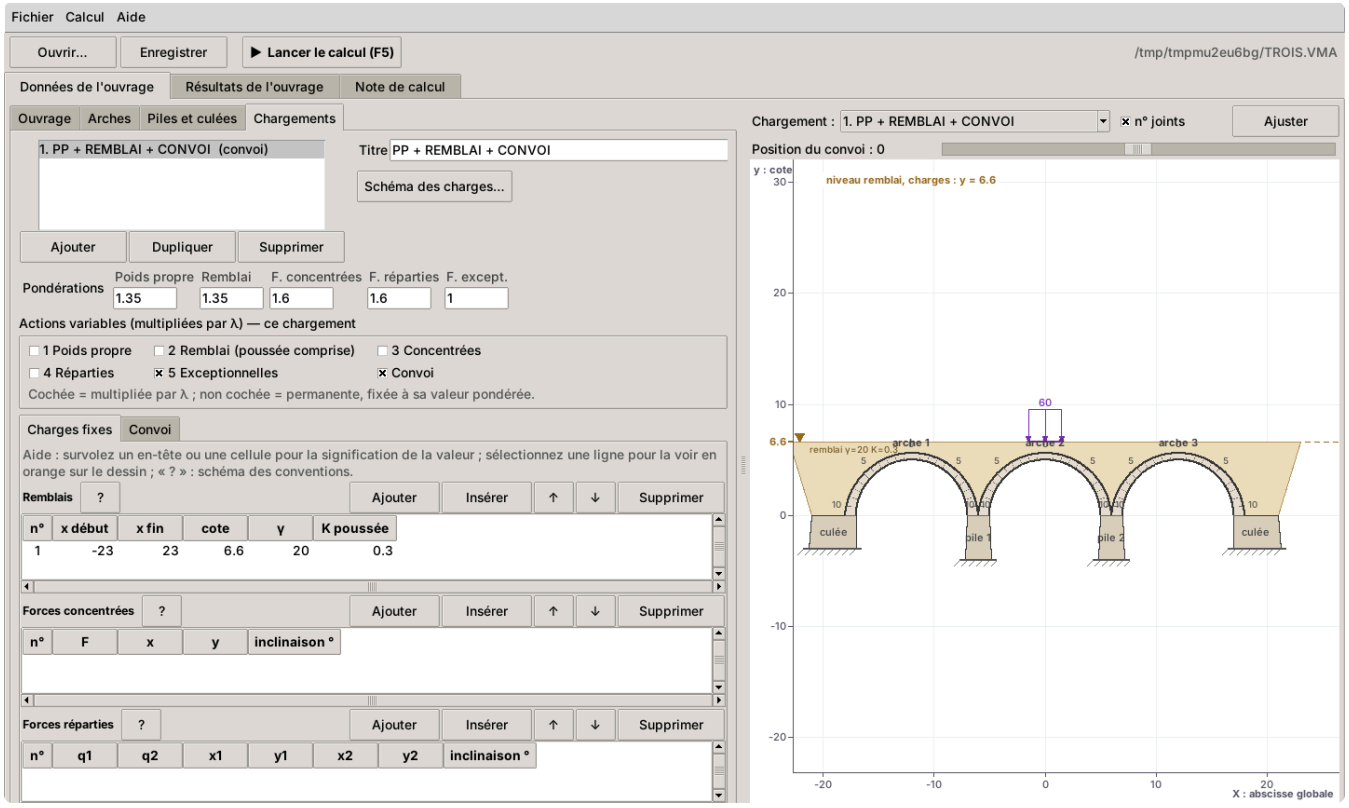
Chaque élément du schéma correspond à un bloc du fichier `.VMA`. Les arches s'appuient sur les piles et les culées par des joints de naissance horizontaux. Les piles et culées sont découpées en sections horizontales, vérifiées comme des joints, jusqu'à la fondation où l'on vérifie le sol. Le remblai et le convoi chargent les arches ; les terres poussent les culées vers l'ouvrage.

Élément	Données
Ouvrage	Titre, poids volumique de la maçonnerie, frottement des joints et des fondations, diffusion dans le remblai (facultatifs)
Arche	Abscisse X de la clé ; courbes d'intrados et d'extrados (types A à M, comme dans un `.DON`), demi-arche gauche si dissymétrique ; zones de résistance ; réduction d'épaisseur
Pile	Cote de fondation, fruits ou sommets des faces gauche et droite, bloc en tête, résistance de la maçonnerie, résistance du sol (ou fondation rigide), nombre de sections, densité, tête monolithe ; ou pile rigide
Culée	Idem, plus largeur en tête (depuis l'intrados de naissance), fruits ou sommets des faces avant et arrière, terres à l'arrière (cote, poids volumique, K : poussée et poids des terres) ; ou culée rigide

Élément	Données
Chargement	Pondérations ; remblais, forces concentrées, réparties et exceptionnelles en abscisses globales ; convoi balayé (début, fin, pas) avec ses charges en abscisses relatives ; actions variables (ligne VARIABLE)

Règles :

- **Repère :** X le long de l'ouvrage, Y vertical, mêmes cotes pour toutes les arches. Les arches sont numérotées de 1 à n, les appuis de 0 (culée gauche) à n (culée droite), les joints de chaque arche de 0 (clé) à N.
- **Naissances :** une arche posée sur une pile ou une culée se termine par son joint de naissance, horizontal ou incliné (sommier), à la même cote que l'arche voisine ou non ; la tête de l'appui au-dessus de la plus basse naissance forme un seul bloc (voir « Piles, culées et têtes d'appuis »).
- **Forces :** elles agissent dans leur direction (sans la règle du « côté droit » des `.DON`), sur la première surface rencontrée : extrados d'une arche ou tête d'un appui. Les charges qui tombent sur un appui rigide vont au sol.
- **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.
- **Remplissage :** la maçonnerie au-dessus des piles (tympans) se représente par un remblai de poids volumique approprié, avec K = 0, ou par un bloc en tête quand elle est solidaire de l'appui (le bloc prend alors avec lui les voussoirs qu'il recouvre).



Résultats, dans la note et la page « Résultats de l'ouvrage » :

- coefficient de rupture et position la plus défavorable du convoi ;
- Z, H, V à la clé de chaque arche ;
- sections critiques, avec les sections où le glissement est atteint, et mécanisme de ruine ;
- efforts et coefficient aux fondations ;
- rapport T/N maximal par élément ;
- tableau de toutes les sections, et coefficient selon la position du convoi.

Exemple commenté : le pont de trois arches

L'exemple `exemples\ponts\TROIS.VMA` (aussi dans le menu Fichier > Exemple : pont de trois arches) décrit le pont du schéma ci-dessus. Voici un extrait commenté ; la pile 2, l'arche 3 et la culée droite répètent les blocs précédents. Le texte qui suit un `#` est un commentaire.

```
TITRE PONT DE TROIS ARCHES
DENSITE 22                    # poids volumique de la maçonnerie (kN/m³)

CULEE GAUCHE
  FONDATION -3                # cote de la base
  LARGEUR 4                   # largeur en tête, depuis l'intrados de
naissance
```

```
  FRUIT 0 0.1                 # fruits avant et arrière
  RESISTANCE 5000             # σ de la maçonnerie (kPa)
  SOL 800                     # σ du sol (kPa)
  SECTIONS 10                 # nombre de sections vérifiées
  TERRES 6.6 20 0.3           # terres à l'arrière : cote, poids volumique, K
FIN

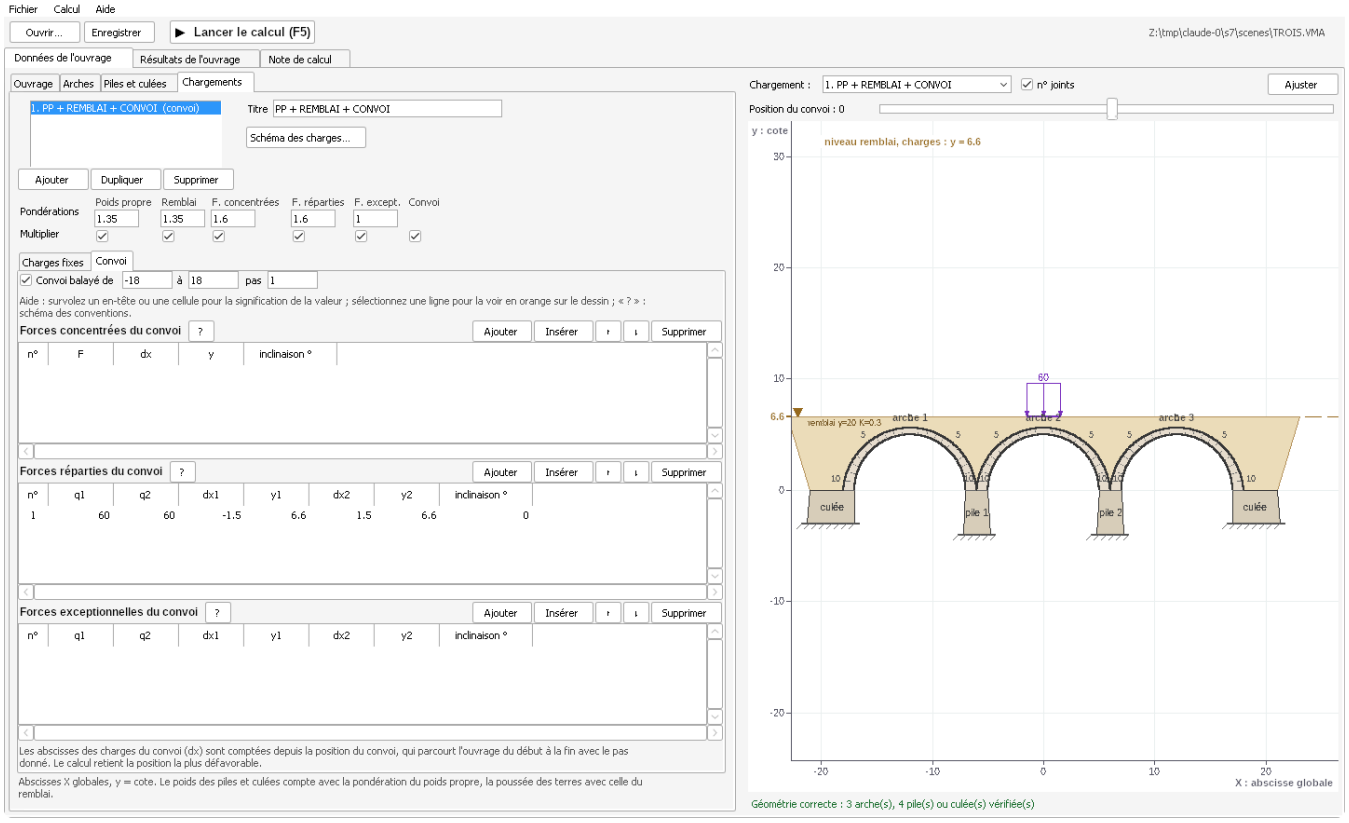
ARCHE   # 1
  CLE -12                     # abscisse de la clé
  INTRADOS C 12 0 0 0 5 0 90  # mêmes types de courbes que dans un .DON
  EXTRADOS J 0.6 5 1
  RESISTANCE 5000 1 200 0 0
FIN

PILE
  FONDATION -4
  FRUIT 0.05 0.05             # fruits des faces gauche et droite
  RESISTANCE 5000
  SOL 800
  SECTIONS 10
FIN

ARCHE   # 2
  CLE 0
  ...

CHARGEMENT PP + REMBLAI + CONVOI
  PONDERATIONS 1.35 1.35 1.6 1.6 1
  REMBLAI -23 23 6.6 20 0.3           # de X = -23 à 23, cote 6,6
  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
FIN
```

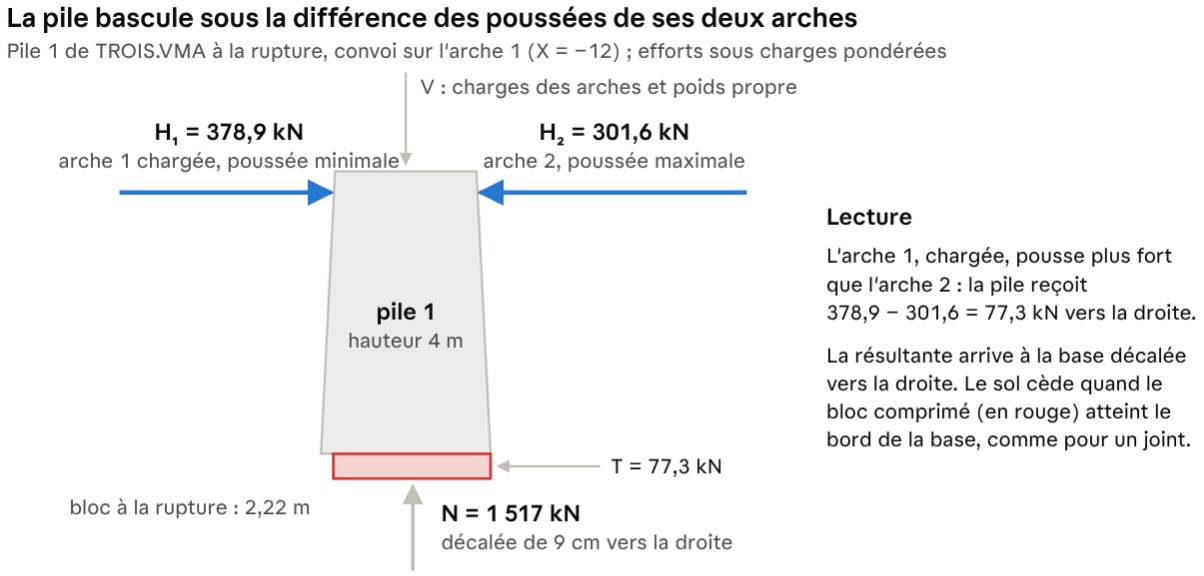
Dans l'interface, chaque bloc a son onglet. Le sous-onglet Convoi de l'onglet Chargements définit le balayage et les charges du convoi ; le curseur au-dessus de l'aperçu déplace le convoi sur l'ouvrage.



Résultat (F5) : coefficient de rupture 1,1681. Le convoi sur la clé de l'arche 1, de l'arche 2 ou de l'arche 3 (X = −12, 0 ou 12) donne le même coefficient ; VOUTE Python retient la première de ces positions, X = −12. La note donne alors :

Élément	Ce que donne la note	Interprétation
Arche 1 (chargée)	H = 378,9 kN ; rupture à l'extrados de la clé, à l'intrados des reins (joints 5)	Poussée minimale : l'arche s'affaisse sous le convoi
Arche 2	H = 301,6 kN ; rupture à l'intrados de la clé, à l'extrados des naissances (joints 11)	Poussée maximale : la pile qui bascule la comprime, sa clé se soulève
Piles 1 et 2	Base de la pile 1 : N = 1 517 kN, ex = +0,077 ; pile 2 : N = 1 361 kN, ex = +0,172 ; coefficient 1,17	Le sol de fondation cède : ce sont les sections qui gouvernent
Arche 3 et culées	Arche 3 : H = 250,9 kN ; culées : coefficients 1,83 et 1,74	Non critiques

Le mécanisme de ruine est un mécanisme sur deux travées : l'arche 1 chargée s'affaisse et pousse la pile 1, qui bascule sur sa face droite au niveau de la fondation et comprime l'arche 2. Le schéma suivant détaille l'équilibre de la pile.



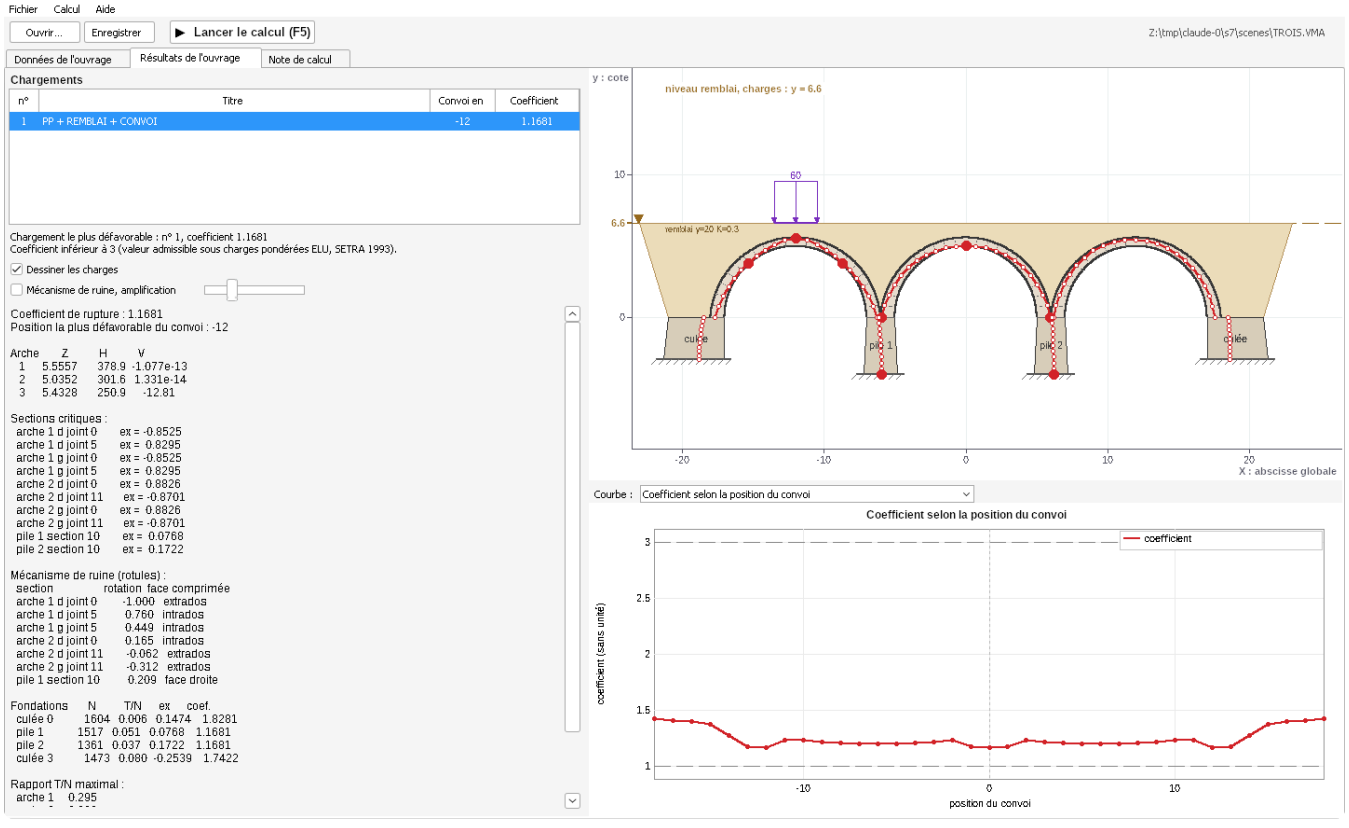
Base : b = 2,4 m, σ sol = 800 kPa ; N = 1 517 kN, excentricité relative ex = 2M / (N·b) = +0,077

CR = b (1 − |ex|) σ sol / N = 2,4 × 0,923 × 800 / 1 517 = 1,17 (appuis rigides : 1,69)

équilibre de la pile 1 · exemple TROIS.VMA

Sur appuis rigides (piles, culées et sol indéformables), l'ouvrage donnerait 1,69 : la souplesse des fondations des piles fait perdre ici 30 % de la marge. Pour renforcer cet ouvrage, il faut donc agir d'abord sur les fondations des piles, pas sur les voûtes.

La page Résultats de l'ouvrage trace aussi le coefficient selon la position du convoi :



La courbe est symétrique. Elle atteint son minimum, 1,17, quand le convoi est sur la clé d'une arche, vaut 1,20 à 1,21 entre deux clés et 1,42 sur une culée. Toutes les positions sont donc à examiner : l'arche centrale n'est pas la seule critique.

Domaine de stabilité d'un ouvrage (version 1.3)

Pour un ouvrage `.VMA`, VOUTE Python calcule la plage de poussée que chaque arche peut prendre et le déséquilibre de poussée que chaque pile peut porter, avec l'élément qui les limite. C'est l'équivalent, pour un ouvrage, des lignes caractéristiques d'une voûte seule.

Le domaine est l'ensemble des lignes de pression (Z, H, V à la clé de chaque arche) qui restent dans la maçonnerie de toutes les sections — joints des arches, sections des piles et des culées, fondations — sous les charges pondérées. Domaine de traction : pas de traction, résistance infinie. Domaine de compression : résistance de la maçonnerie et du sol, calculé si FM ≥ 1. Le glissement ($|T| \leqslant \mu N$) est vérifié quand le fichier donne un frottement.

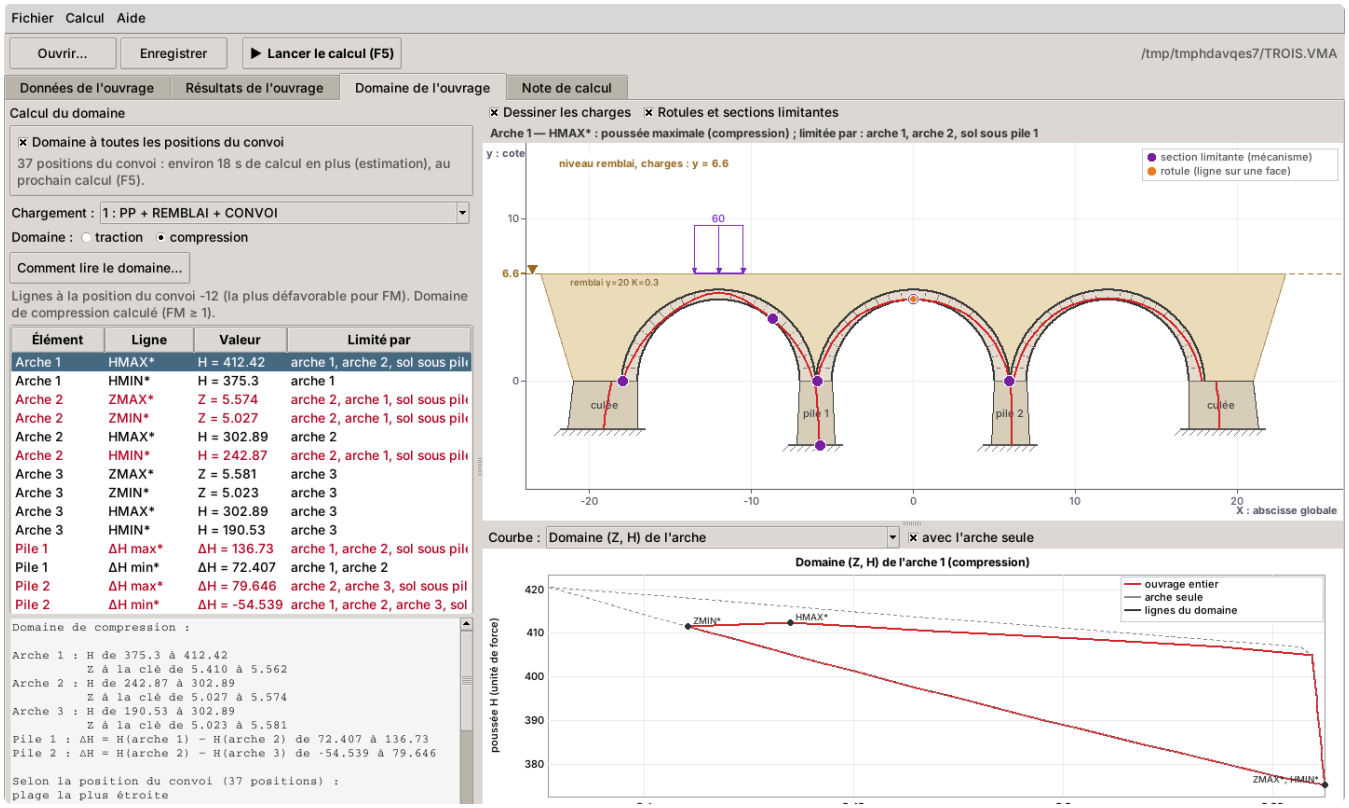
Élément	Lignes	Lecture
Arche, dans l'ouvrage (autres arches libres)	Traction : HMAX, HMIN, ZMAX·HMIN, ZMAX·HMAX, ZMIN·HMIN, ZMIN·HMAX ; compression : ZMAX*, ZMIN*, HMAX*, HMIN*	Plage de poussée (et de cote de passage à la clé) réellement possible, piles, culées et fondations comprises
Arche seule (appuis rigides)	HMAX, HMIN (traction)	Plage propre à l'arche, comme une voûte seule ; l'écart avec la ligne précédente est ce que retirent les appuis
Pile	ΔH max, ΔH min (traction et compression), ΔH = H(arche de gauche) − H(arche de droite)	Déséquilibre de poussée que la pile peut équilibrer (basculement, fondation, sol)

Limité par. Chaque ligne extrême est un programme linéaire ; ses multiplicateurs désignent les sections qui la bornent, c'est-à-dire son mécanisme : joints d'une arche, tête ou fût d'une pile, fondation (basculement), sol sous la fondation (résistance du sol), glissement. À l'extrême, l'état des autres arches n'est pas unique : il est recentré (plus grande marge de chaque arche) pour le dessin. Une voûte `.DON` calculée comme ouvrage d'une arche sur appuis rigides redonne exactement les lignes de sa note.

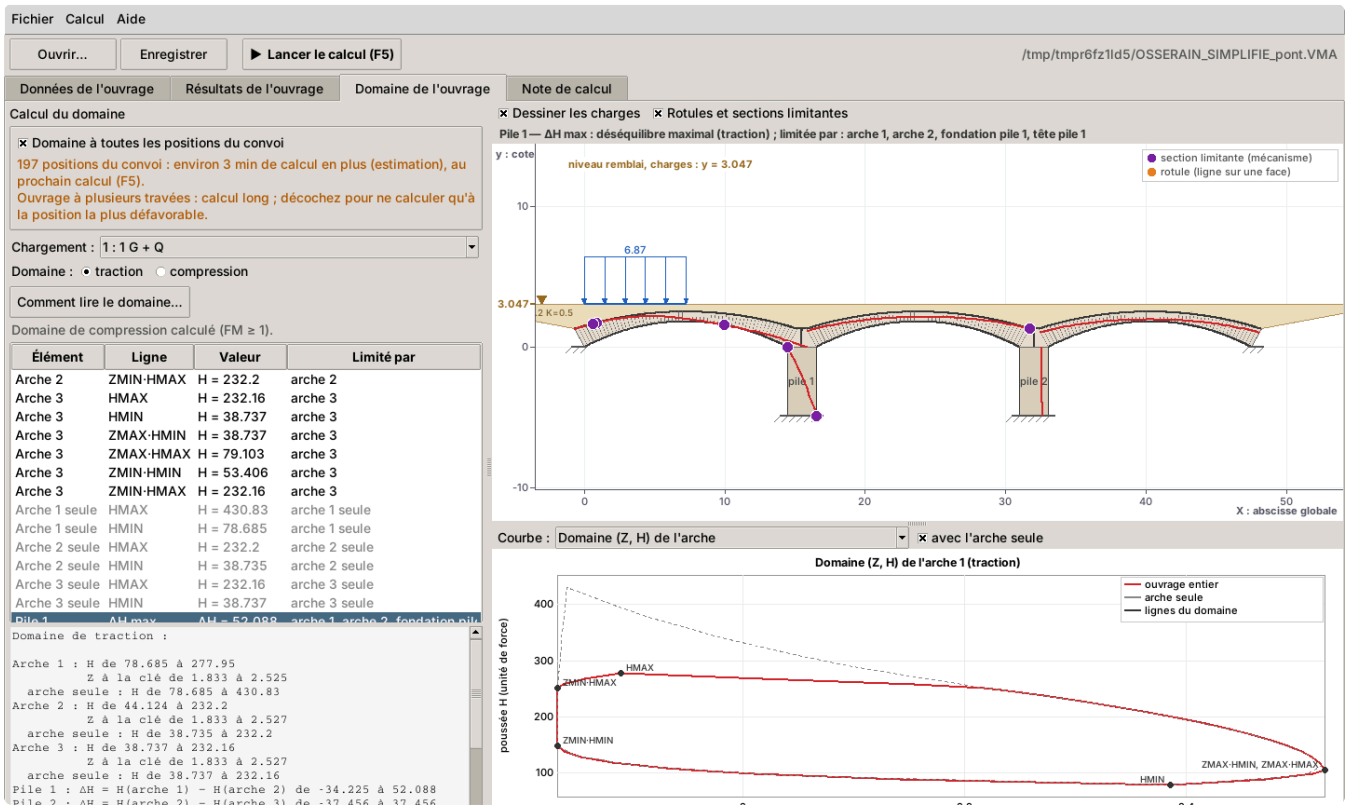
Exemple : TROIS, convoi en X = −12 (position la plus défavorable pour FM = 1,1681), en kN/m :

Élément	Traction	Compression	Limité par, en compression
Arche 1, H	356,7 à 439,2	375,3 à 412,4	HMAX* : arches 1 et 2, sol sous la pile 1
Arche 2, H	184,5 à 310,9	242,9 à 302,9	HMIN* : arches 1 et 2, sol sous la pile 1
Arche 3, H	184,5 à 310,9	190,5 à 302,9	arche 3
Pile 1, ΔH	+45,8 à +254,8	+72,4 à +136,7	ΔH max* : sol sous la pile 1
Pile 2, ΔH	−126,5 à +126,5	−54,5 à +79,6	ΔH max* : sol sous la pile 2

En traction, chaque arche garde la plage qu'elle aurait seule : sans résistance, les piles de TROIS ne limitent rien. Avec la résistance du sol (0,8 MPa), la pile 1 n'équilibre plus que +72 à +137 kN/m, et le sol sous la pile 1 borne la poussée maximale de l'arche 1.



Exemple : Osserain simplifié (série de 16 ponts, chargement 1, G + Q, en t/m) : les piles basculeraient bien avant que les arches n'atteignent leurs limites. Poussée maximale de l'arche 1 : 278,0 dans l'ouvrage, 430,8 pour l'arche seule ; déséquilibre de la pile 1 de −34,2 à +52,1. Aux extrêmes, les rotules sont aux fondations des piles, en tête de la pile 1 et dans les arches : un mécanisme sur plusieurs travées, que ni FM ni FS géo ne montrent.



La page « Domaine de l'ouvrage »

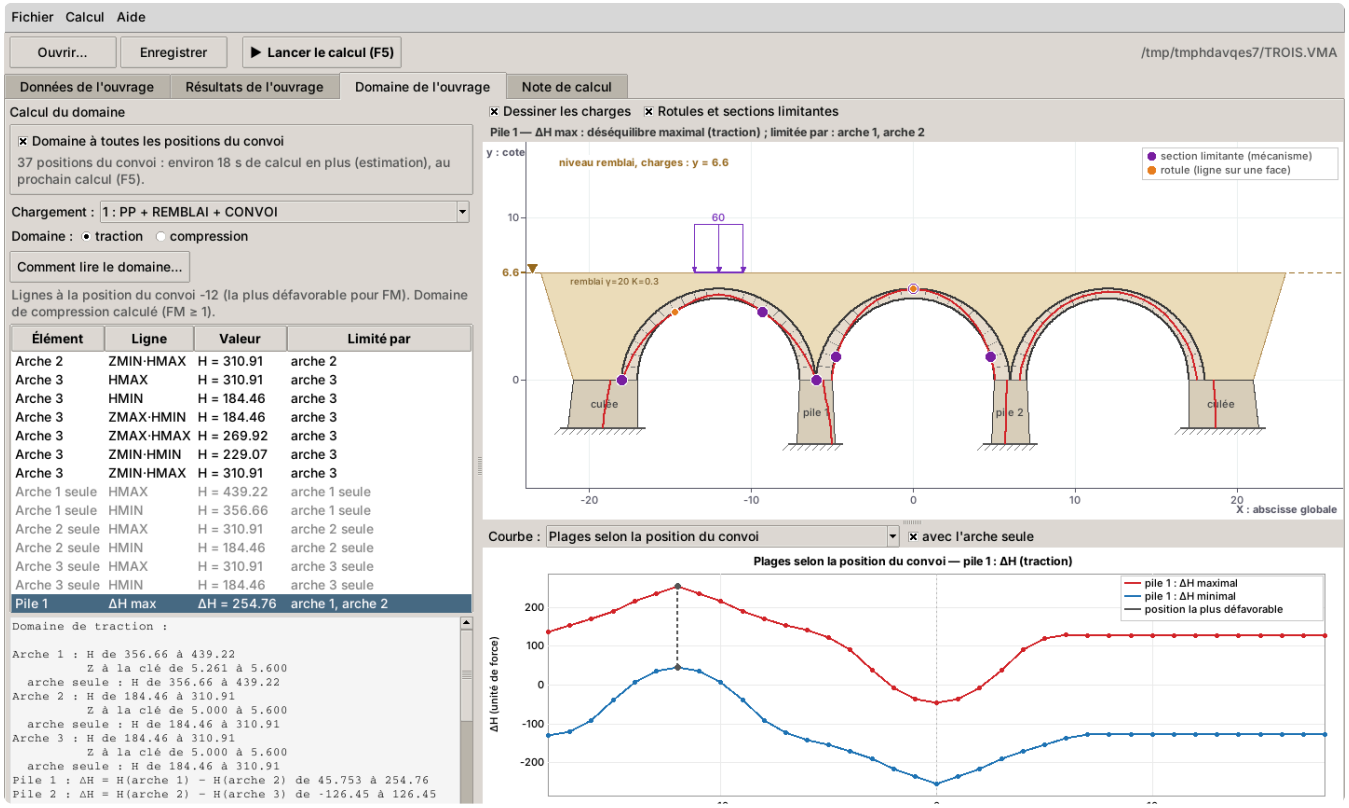
Après le calcul (F5), la page « Domaine de l'ouvrage », à côté de « Résultats de l'ouvrage », montre le domaine du chargement choisi :

- **Domaine** : traction ou compression (grisé si FM < 1) ;
- **liste des lignes** : élément, ligne, valeur (H, Z ou ΔH) et éléments qui la limitent, en rouge quand un appui intervient ; les lignes de l'arche seule sont en gris ;
- **dessin** : la ligne choisie dans tout l'ouvrage, avec ses sections limitantes (violet) et les autres rotules (orange), et les charges à la position du convoi ;
- **courbes** : « Domaine (Z, H) de l'arche », couples (cote de passage à la clé, poussée) admissibles, calculé à la demande, avec celui de l'arche seule en tirets et les lignes du domaine ; « Plages selon la position du convoi », poussées extrêmes de l'arche ou déséquilibre de la pile de la ligne choisie ;
- **texte** : plages de chaque arche et de chaque pile, position la plus étroite de chaque élément, sections limitantes de la ligne choisie.

Le bouton « Comment lire le domaine… » et le menu Aide > Domaine de stabilité d'un ouvrage ouvrent une fiche qui reprend ces définitions. La page de la voûte seule ne change pas.

Convoi. Les lignes sont calculées à la position du convoi la plus défavorable pour FM. La case « Domaine à toutes les positions du convoi », cochée par défaut, demande en plus au calcul suivant les plages à toutes les positions : la courbe des plages et la note donnent

pour chaque arche et chaque pile la position où sa plage est la plus étroite. La case affiche la durée estimée de ce calcul ; pour un ouvrage à plusieurs travées, au-delà d'une minute, le lancement demande confirmation (Non : position la plus défavorable seulement). Sur TROIS, les 37 positions prennent une dizaine de secondes ; sur Osserain simplifié, les 197 positions de l'essieu environ trois minutes.



Note et fichiers. La note se termine par le bloc « DOMAINE DE STABILITE DE L'OUVRAGE » : pour chaque chargement, les lignes de chaque arche (Z, excentricité à la clé, H, V, limite), de l'arche seule et de chaque pile, les sections limitantes de chaque ligne et, avec le convoi à toutes les positions, la position la plus étroite de chaque élément. Les fichiers `NOM_domaine.csv` (une ligne par ligne extrême), `NOM_domaine_lignes.csv` (efforts et centre de pression de chaque section pour chaque ligne, rotules, sections limitantes) et `NOM_domaine_convoi.csv` (plages à chaque position) s'ajoutent aux autres ; ceux-ci ne changent pas. En ligne de commande, le domaine est calculé par défaut pour un `.VMA` ; `--domaine-convoi` ajoute les plages à toutes les positions, `--sans-domaine` supprime le domaine.

Usages. Mouvements d'appuis : un écartement fait descendre la poussée vers HMIN, un rapprochement la fait monter vers HMAX ; le tassement ou le basculement d'une pile change les poussées des deux arches voisines à la fois, et la plage de ΔH dit combien elle peut en reprendre. Phases de travaux : décintrement d'une arche avant les autres, déchargement d'une travée, purge du remblai. Comparaison avec un calcul élastique (FLAMBI) : son état doit être dans le domaine, et sa position dans la plage dit si l'ouvrage est proche d'un mécanisme d'écartement.

Construire un ouvrage dans l'interface

Le menu Fichier propose Nouvel ouvrage à plusieurs arches et Exemple : pont de trois arches. Pour partir de voûtes existantes :

- **Convertir la voûte en ouvrage à plusieurs arches :** la voûte ouverte devient la première arche d'un ouvrage sur appuis rigides, avec ses chargements.
- **Importer une voûte (.DON) comme nouvelle arche** (aussi en bouton dans l'onglet Arches) : la voûte est ajoutée à droite, avec une pile d'au moins 2 m entre intrados et sans chevauchement des naissances. Ses chargements peuvent être ajoutés aux chargements de même rang, décalés et limités à l'emprise de l'arche. Si les naissances ne sont pas à la même cote, ou pas horizontales, la pile est quand même créée en maçonnerie : sa tête au-dessus de la plus basse naissance forme un seul bloc, et un message invite à la vérifier.
- **Erreur 307 :** deux arches voisines qui se chevauchent sont refusées, car la pile est plus étroite que la somme des épaisseurs aux naissances.

Pas à pas : d'une voûte isolée à un pont

1. **Ouvrir la voûte** `exemples\voutes\ALLIESYM.DON` et la calculer (F5) : coefficients 1,5299 et 2,2190 pour les deux chargements.
2. **Fichier > Convertir la voûte en ouvrage à plusieurs arches.** L'interface passe en mode ouvrage : une arche entre deux culées rigides, avec les mêmes chargements. F5 redonne 1,5299 et 2,2190 : sur appuis rigides, la conversion ne change pas le calcul.
3. **Onglet Arches > Importer une voûte (.DON)**, puis choisir une deuxième voûte (ici `ALLIESYM.DON` à nouveau). Elle est placée à droite et ses chargements peuvent être ajoutés. La pile est créée en maçonnerie : fondation 4 m sous la plus basse naissance, fruits 0,05.
4. **Onglet Piles et culées** : passer les culées en type « maçonnerie », puis donner leur largeur en tête, leurs fruits et les terres à l'arrière. Compléter pour chaque appui la cote de fondation, σ de la maçonnerie et σ du sol, avec 0 pour une fondation rigide.
5. **Enregistrer** en `.VMA` et relancer F5. L'écart avec le coefficient sur appuis rigides mesure l'effet des appuis. Si une fondation devient critique, elle apparaît dans le tableau Fondations de la note, avec son coefficient.

Après chaque étape, l'aperçu montre la géométrie. Une erreur de données (arches qui se chevauchent, faces ou bloc d'appui incohérents) est signalée par son numéro (300 à 310).

Classeurs Voute_jf

Fichier > Importer un classeur Voute_jf (.xlsm) traduit la voûte et le pont d'un classeur Voute_jf en `NOM_voute.DON` et `NOM_pont.VMA`, écrits à côté du classeur ; `outils\vjf2voute.py` fait la même chose en ligne de commande.

- Chaque combinaison active du classeur devient un chargement, avec ses pondérations gG, gP, gQ et gA.
- Pour la voûte, l'interface coche les actions variables (facteur λ des charges Q et A) dans l'onglet Chargements et règle le frottement tan φ dans la page Résultats.
- Les sommiers inclinés se posent directement sur la pile ou la culée : la tête de l'appui au-dessus de la plus basse naissance forme un seul bloc, à la densité de l'appui, comme la tête de pile et le bloc de transition du piédroit de Voute_jf. Les ouvrages convertis avant la version 1.2 (dernier voussoir en coin et ligne `TETE MONOLITHE`) restent valables.
- Un compte rendu liste les avertissements et rappelle les λ enregistrés dans le classeur, pour comparaison. Depuis la V30, Voute_jf trace lui aussi les joints normaux à l'intrados : sur la série de 16 ponts, les deux programmes donnent le même λ à $2{\cdot}10^{-6}$ près, et le même facteur de l'essieu à $5{\cdot}10^{-5}$ près. Avec l'option « Points de même rang » de Voute_jf, les résultats ne sont identiques que si les faces sont concentriques.

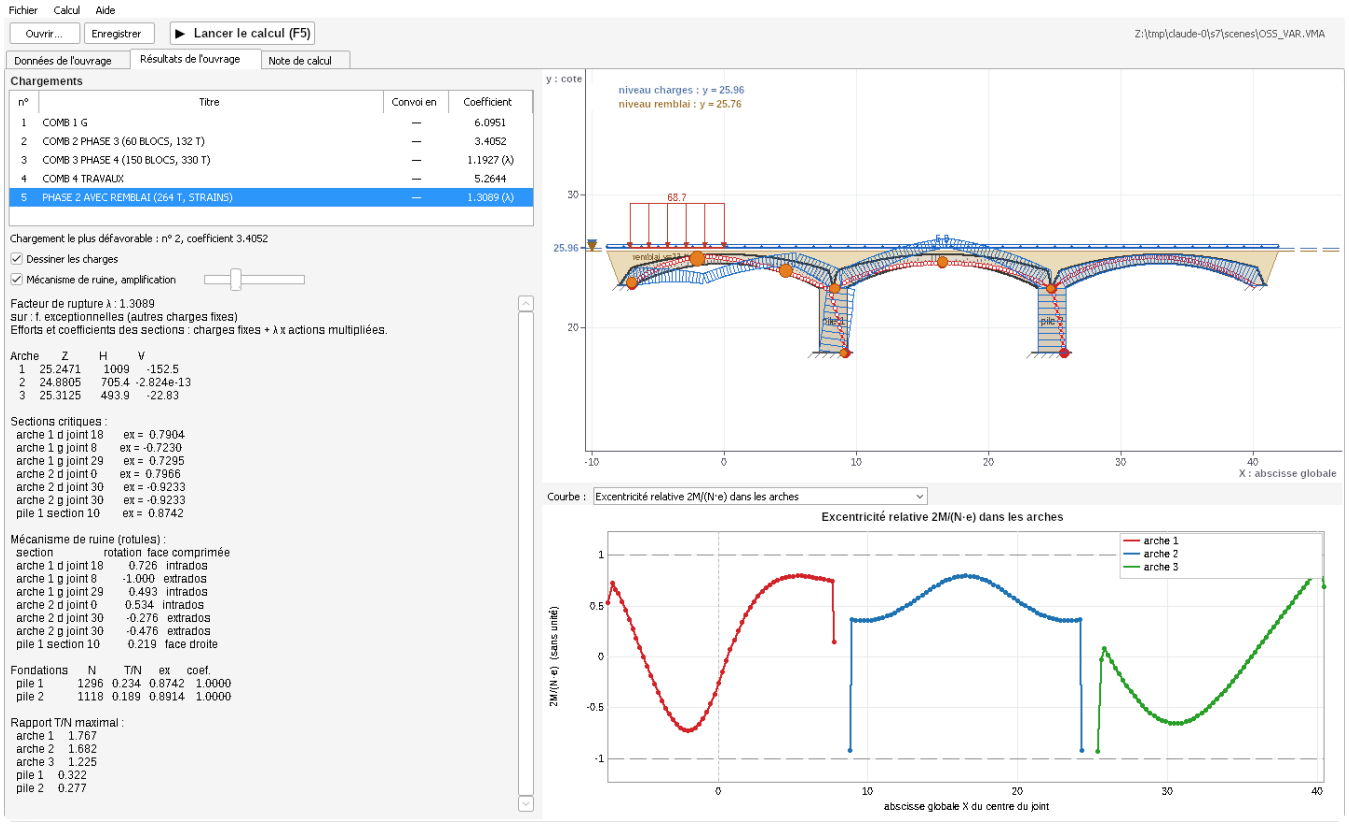
Ouvrages : facteur sur des actions choisies, mécanisme et glissement

Facteur sur des actions choisies. Le coefficient de rupture FM multiplie toutes les charges du chargement. Pour savoir de combien on peut augmenter une seule action — le convoi, une force exceptionnelle — les autres restant fixes, cochez-la dans le cadre « Actions variables (multipliées par λ) », sous les pondérations du chargement (voir « Déclarer les actions variables »). Le tableau donne alors aussi le facteur de rupture λ et le facteur à résistance infinie λ∞, dans leurs colonnes ; FM reste calculé sur toutes les charges (voir « Coefficients de sécurité »). Il se lit autrement que le coefficient :

- λ ⩾ 1 : l'ouvrage porte les charges permanentes plus λ fois les actions variables ;
- λ < 1 : il ne porte pas les actions telles qu'elles sont données (ligne marquée en rouge) ;
- les pondérations s'appliquent toujours, aux charges permanentes comme aux charges variables.
- FM est aussi calculé pour ces chargements ; avec un convoi, cela multiplie leur durée de calcul par 3 à 6.

Dans le fichier `.VMA`, la ligne correspondante est `VARIABLE 5` (forces exceptionnelles) ou `VARIABLE CONVOI`, placée dans le bloc du chargement. Codes : 1 poids propre, 2 remblai, 3 forces concentrées, 4 forces réparties, 5 forces exceptionnelles. Exemple, Osserain phase 2 : 264 t d'exceptionnel sur le remblai donnent λ = 1,31. L'ouvrage porte donc environ 345 t avant rupture, poids propre et remblai inchangés.

Mécanisme de ruine. Cochez « Mécanisme de ruine, amplification » dans la page Résultats de l'ouvrage. Le dessin montre la déformée de ruine et les rotules (points orange). Le curseur règle l'amplification ; seule la forme compte, pas l'amplitude.



Le texte des résultats liste les rotules : section, rotation relative (normalisée à 1) et face comprimée. Une rotule côté intrados s'ouvre à l'extrados, et inversement. Pour une pile, « face droite » signifie que la pile pivote sur son arête droite. Pour lire un mécanisme :

1. Repérez les rotules : une arche seule en demande quatre ; une arche avec ses appuis peut en mobiliser dans les piles.
2. Vérifiez que les faces alternent le long de l'arche (intrados, extrados, intrados…).
3. Comparez avec les sections critiques : ce sont les mêmes sections.

La note de calcul reprend ce tableau (MECANISME DE RUINE, avec le centre de rotation de chaque section). Le fichier `_mecanisme.csv` donne les sauts et vitesses de chaque section et de chaque corps, pour un tableur.

Glissement. Le frottement se règle dans l'onglet Ouvrage : « Frottement des joints », « des fondations » et la case « Glissement non associé ». La colonne « μ contact » de l'onglet Piles et culées donne le frottement des joints de naissance posés sur chaque appui (−1 : celui

des joints). Ce réglage compte parce que les joints de naissance des ouvrages sont horizontaux : ils reprennent toute la poussée en effort tangent, et une arche surbaissée glisse sur un joint horizontal dès que μ est inférieur au rapport poussée / charge verticale (environ 1,9 aux naissances d'Osserain). Donnez au contact un frottement représentatif du sommier réel, ou une valeur élevée pour ne pas le vérifier.

```
FROTTEMENT 0.445 100
GLISSEMENT NON ASSOCIE
CULEE GAUCHE RIGIDE CONTACT 0.364
```

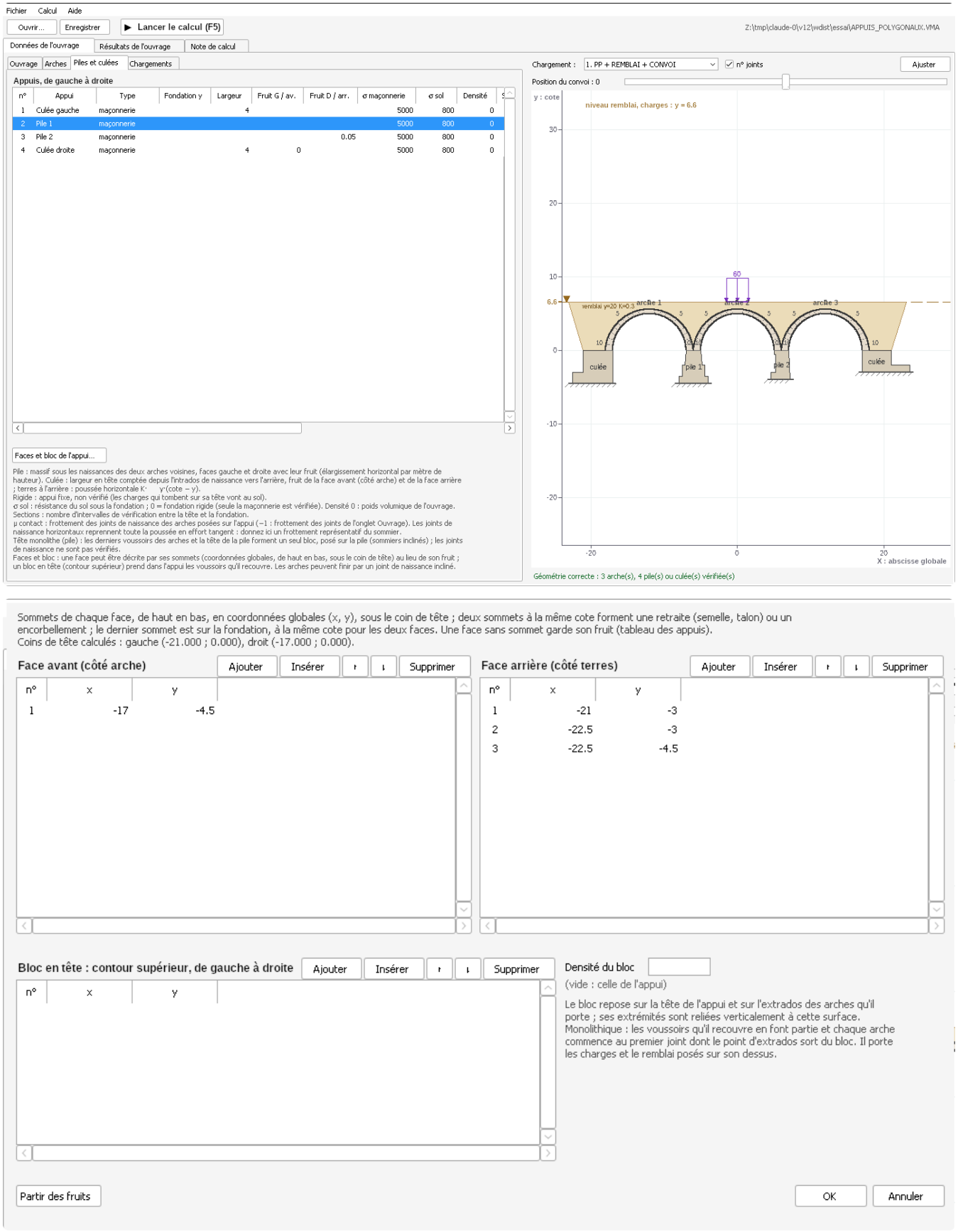
Exemple, Osserain à 5 MPa avec φ = 24° (hypothèses de STRAINS, INSA Rennes) et naissances non vérifiées : le facteur sur la charge d'essai reste 1,31, en associé comme en non associé. STRAINS concluait de même que le glissement n'intervient pas.

Tête de pile monolithe. La colonne « Tête » de l'onglet Piles et culées (séparée ou monolithe, piles seulement) écrit la ligne `TETE MONOLITHE` dans le bloc PILE. Les joints de naissance des arches posées sur la pile ne sont alors plus vérifiés : les derniers voussoirs des deux arches et la tête forment un seul bloc, posé sur la section supérieure de la pile, qui reçoit la somme des deux poussées. Sans cette ligne, chaque arche doit faire passer sa poussée par sa moitié de la tête, et une rotule peut se former au droit de l'axe de la pile. À employer quand la tête de pile est pleine entre les sommiers ; sur Osserain, λ de la phase 2 passe de 1,31 à 2,09. Un bloc en tête (voir ci-dessous) généralise cette ligne : il prend dans l'appui tous les voussoirs qu'il recouvre, sur une pile comme sur une culée.

Piles, culées et têtes d'appuis

Une pile ou une culée n'est plus forcément un trapèze. Ses faces peuvent être brisées, les arches peuvent s'y poser par un joint de naissance incliné, un bloc de maçonnerie peut monter en tête, et les terres pèsent sur la face arrière des culées. Un appui à faces droites, à naissances horizontales à la même cote et sans bloc est calculé exactement comme avant.

Faces brisées. Dans l'onglet Piles et culées, sélectionnez un appui puis cliquez « Faces et bloc de l'appui… ». Chaque face se décrit par ses sommets, de haut en bas, en coordonnées globales (x, y), sous son coin de tête : le point d'intrados de la naissance, ou le coin arrière d'une culée (la fenêtre donne leurs coordonnées). 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. Une face sans sommets garde son fruit ; « Partir des fruits » remplit une face vide avec son coin de tête et son point de fondation, à compléter. La colonne « Faces et bloc » du tableau résume la forme de chaque appui ; les cases de fruit et de fondation se vident quand les sommets donnent la forme.



Dans le fichier `.VMA`, ce sont les lignes `FACE` (`GAUCHE` et `DROITE` pour une pile, `AVANT` et `ARRIERE` pour une culée) ; `FONDATION` devient facultative :

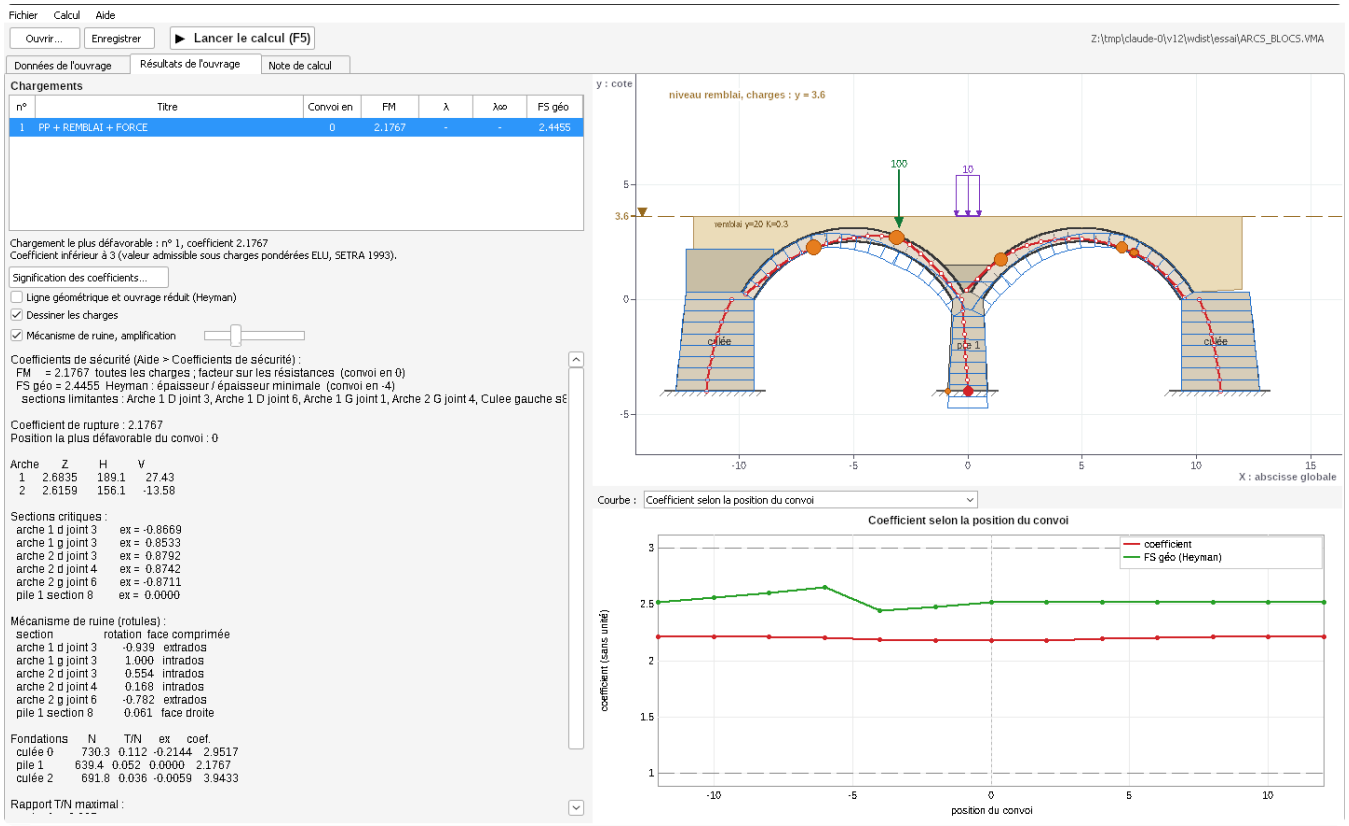
```
CULEE GAUCHE
  LARGEUR 4
  FACE AVANT -17 -4.5
  FACE ARRIERE -21 -3   -22.5 -3   -22.5 -4.5
  ...
PILE
  FACE GAUCHE -7.2 -2   -7.5 -2   -7.5 -3.5   -8 -3.5   -8 -4.5
  FACE DROITE -4.8 -2   -4.5 -2   -4.5 -3.5   -4 -3.5   -4 -4.5
  ...
```

Sections des appuis. VOUTE place une section horizontale à la cote de chaque sommet, 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, car la rupture de la console n'est pas vérifiée.

Naissances inclinées. Une arche surbaissée dont le joint de naissance est normal à l'intrados (sommier incliné) se pose directement sur la pile ou la culée, et deux naissances voisines peuvent être à des cotes différentes. La tête de l'appui suit les sommiers jusqu'à leurs points d'extrados ; son dessus va en ligne droite d'une naissance à l'autre (pile), ou horizontalement jusqu'à la face arrière (culée, dont la largeur est comptée depuis l'intrados de naissance, à la cote de l'extrados du sommier). Toute la partie au-dessus de la plus basse naissance d'intrados forme un seul bloc : il reçoit les sommiers, son poids et les charges posées sur son dessus, et les sections commencent sous lui. Exemple : `exemples\ponts\ARCS_SOMMIERS.VMA`, deux arcs de 120° à sommiers inclinés de 30°, coefficient 2,2296.

Bloc en tête. Un massif de maçonnerie posé sur la tête et sur les reins des arches (tête de pile qui monte entre les reins, massif de culée) se décrit par son contour supérieur, de gauche à droite : tableau « Bloc en tête » de la même fenêtre, lignes `BLOC` du fichier. Ses extrémités sont reliées verticalement à l'extrados ou à la tête. 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 (μ contact) ; les joints suivants sont internes (« interne » dans la note). Le bloc porte son poids (densité propre facultative), le remblai et les charges posées sur son dessus. La note donne, pour chaque appui de forme quelconque, ses coins de tête, ses faces, les cotes de ses sections et son bloc :

```
   Pile 1                    0.000     -0.670      0.670       -4.000        1.740
5000.0      800.0
     tete posee sur les sommiers : coins (-0.670, 0.000) et (0.670, 0.000),
premiere section a la cote 0.000
     face gauche  : (-0.670, 0.000) (-0.870, -4.000)
     face droite  : (0.670, 0.000) (0.870, -4.000)
     sections (9) aux cotes : 0.000 -0.500 -1.000 -1.500 -2.000 -2.500 -3.000
-3.500 -4.000
     bloc en tete, dessus : (-1.000, 1.500) (1.000, 1.500)
       aire 1.3660   densite 26.000   poids 3.5516E+01
       arche 1 D : voussoirs 7 a 9 pris dans le bloc, joint de contact 6
(joints 7 a 9 internes)
       arche 2 G : voussoirs 7 a 9 pris dans le bloc, joint de contact 6
(joints 7 a 9 internes)
```



Terres à l'arrière des culées. À la poussée horizontale K·γ·(cote − y), calculée sur un plan vertical, s'ajoute le poids des terres qui reposent sur la face arrière : entre la face 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). Sur la culée en L de `APPUIS_POLYGONAUX.VMA` (talon de 1,5 m à la cote −3, terres à la cote 6,6), les terres sur le talon pèsent 288 kN/m pour 445,5 kN/m de maçonnerie. Les versions précédentes négligeaient ce poids : les culées à fruit arrière chargées de terres donnent des résultats un peu différents, en général plus favorables.

Diffusion des charges dans le remblai

Par défaut, comme en 1993, une charge posée sur la chaussée est projetée sur l'extrados sans s'étaler dans le remblai. Deux modèles de diffusion sont proposés au choix, pour la voûte seule (`.DON`) comme pour les ouvrages (`.VMA`).

Choix	Ligne de commande	Fichier `.VMA`	Interface	Distribution sur l'extrados
Aucune (défaut)	rien, ou `--diffusion aucune`	rien, ou `DIFFUSION AUCUNE`	« aucune »	La charge garde sa largeur de surface
Boussinesq	`--diffusion boussinesq`	`DIFFUSION BOUSSINESQ`	« Boussinesq »	Cloche du massif élastique, largeur illimitée
Boussinesq tronqué 30°	`--diffusion tronque`	`DIFFUSION BOUSSINESQ TRONQUE`	« Boussinesq tronqué », angle 30	Même cloche, limitée aux plans inclinés à 30° partant des bords de la charge

Où le choisir. Voûte seule : liste « Diffusion remblai » et angle (30°) dans le cadre de la page Résultats, puis Calculer. Ouvrage : liste « Diffusion dans le remblai » et angle de l'onglet Ouvrage ; elle écrit la ligne `DIFFUSION` du fichier. Un chargement peut avoir sa propre ligne `DIFFUSION` dans son bloc `CHARGEMENT` (à saisir dans le fichier) ; l'option de la ligne de commande l'emporte sur toutes les lignes du fichier.

Ce qui est diffusé. Les forces concentrées et exceptionnelles verticales, convoi compris, définies au-dessus de l'ouvrage : leur cote est la surface de la chaussée. Les forces réparties (chaussée, superstructure), le remblai et les charges inclinées ne le sont pas. Une charge posée sur un tympan ou une dalle de répartition se définit à la cote de l'extrados, pour ne pas être diffusée. La profondeur de remblai sous chaque bande de 5 cm est mesurée sur l'extrados exact ; au-delà des naissances d'une voûte seule, jusqu'à la cote de l'extrados au joint de naissance.

Ce que donne la note. Pour chaque chargement : le modèle, le nombre et la résultante des charges diffusées, la profondeur de remblai au centre des charges, et la part de la charge transmise au sol (au-delà des naissances ou sur un appui rigide). Le fichier `_efforts.csv` contient les charges diffusées.

```
   Diffusion dans le remblai : Boussinesq
     1 charge(s) diffusee(s), resultante  4.8777E+02, profondeur au centre
des charges  0.727 a  0.727 m
     part transmise au sol (hors ouvrage ou appui rigide) :   7.2 %
```

Exemple, Osserain (charge d'essai de la phase 2) : λ = 1,31 sans diffusion, 1,42 avec Boussinesq, 1,36 avec Boussinesq tronqué.

Conseils.

- Calculer avec les deux modèles et comparer au calcul sans diffusion. Sous une charge étroite et un remblai épais, Boussinesq peut donner jusqu'à deux fois le facteur du modèle tronqué ; la note technique recommande alors de retenir le plus faible.
- Si la part transmise au sol dépasse 10 %, le gain dépend de la culée, tenue pour rigide : il faut le justifier à part.
- La diffusion peut, rarement, abaisser légèrement le coefficient : la comparaison au calcul sans diffusion le montre.

Études spécifiques. Deux variantes restent disponibles pour comparer avec d'autres règles ou tester la sensibilité ; elles ne sont pas recommandées pour une évaluation courante.

Variante	Ligne de commande	Fichier `.VMA`	Interface
Troncature à un autre angle	`--diffusion tronque,25`	`DIFFUSION BOUSSINESQ TRONQUE 25`	« Boussinesq tronqué » et l'angle voulu
Pente fixe (1 pour 2 : 26,57° ; 30° ; 45°)	`--diffusion pente,26.57` ou `--diffusion 45`	`DIFFUSION PENTE 26.57` ou `DIFFUSION 45`	« pente fixe (étude) » et l'angle voulu

L'angle vaut 30° par défaut ; la note de calcul signale une « étude spécifique » quand une variante est utilisée. Détails, schémas et comparaisons : note technique sur la diffusion, `notices\Note_technique_diffusion_remblai.pdf`.

Pour aller plus loin

Document (dossier `notices` et racine)	Contenu
`Reference_fichiers_et_options_VOUTE_Python.pdf` (`LISEZMOI.md`)	Formats `.DON` et `.VMA` ligne par ligne, toutes les options, contenu des fichiers CSV, organisation du code

Document (dossier `notices` et racine)	Contenu
`Validation_VOUTE_Python.pdf` (`VALIDATION.md`)	Comparaison à la version PC de 1993, aux références en géométrie de 1993 et à Voute_jf, batteries de tests, résultats de référence
`Notice_developpement_VOUTE_Python.pdf`	Organisation du moteur, méthodes de calcul, tests, modification du programme
`Note_technique_diffusion_remblai.pdf`	Modèles de diffusion, comparaisons sur Osserain
`Note_technique_coefficients_securite.pdf`	Coefficients de sécurité FM, λ, λ∞ et coefficient géométrique d'Heyman : signification, limites, lecture des résultats, exemples, validation
`SETRA_1993\`	Manuel de référence et exemple d'utilisation de la version PC du SETRA

Les batteries de tests de validation se relancent sur n'importe quel poste, en 5 à 20 minutes selon le poste, depuis une invite de commandes ouverte dans le dossier de VOUTE Python :

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

La dernière ligne doit être « TOUTES LES BATTERIES PASSENT ». C'est la vérification à faire après toute modification du programme.