VOUTE Python 1.2 — validation

VOUTE Python 1.2 (16/10/2026) reprend le programme SETRA VOUTE : VOUTE1 (IBM, 1983) et la version PC VOUTE 1.0 (1993), étendus aux ponts à plusieurs arches, avec une géométrie exacte. Sa validation repose sur quatre comparaisons :

1. **La version PC de 1993**, chargement par chargement, à partir de ses listings (`batteries/ref_pc`).
2. **Des valeurs de référence calculées en géométrie de 1993**, avec le même modèle mécanique (`batteries/references.csv`, `batteries/multi/references.csv`). VOUTE Python les retrouve à 0,001 % près quand la géométrie de 1993 n'intervient pas ; chaque autre écart est rattaché à une cause connue.
3. **Le programme Voute_jf** (J.-F. Douroux) : cas croisés, série de 16 ponts, classeurs convertis.
4. **Des contrôles propres au moteur** : certificat de chaque coefficient, simplexe comparé à HiGHS, dualité statique / cinématique, solutions analytiques.

Les batteries de tests de la distribution refont ces comparaisons : `interface\python\python.exe batteries\lance_tout.py`.

1. Ce que change la géométrie exacte

La version de 1993 calculait la géométrie avec des approximations. VOUTE Python calcule la géométrie et les charges exactement. Chaque écart avec la version de 1993, ou avec les références en géométrie de 1993, est rattaché à l'une des causes suivantes (colonne `causes` de `batteries/references.csv`).

Code	Version de 1993	VOUTE Python
`raccord`	Une courbe d'extrados définie depuis la fin de la précédente (types D, G, I, L) part du dernier point d'extrados calculé sur le sous-découpage. Un piédroit vertical peut sortir légèrement incliné.	La courbe part de la vraie fin de la précédente.
`epaisseur`	Un point défini par une épaisseur (types I à M) part du point du sous-découpage d'intrados le plus proche.	Il part du point d'intrados exact.
`ellipse`	Joints de l'ellipse placés par l'algorithme ELLIPI (longueurs à peu près égales).	Voussoirs de même longueur d'arc.
`cle`	Si l'extrados commence par un segment, son point de clé est pris sur la normale à l'intrados.	Joint de clé vertical.
`au_dela`	La partie d'une force répartie qui dépasse la fin d'un extrados terminé par un segment est reportée sur le dernier voussoir.	Elle ne charge pas la voûte : elle porte sur l'appui.
`piedroit`	Voir ci-dessous.	Voir ci-dessous.
—	Voussoir fictif à la clé ; aires, remblais et forces intégrés sur des polygones de 24 côtés par voussoir.	Pas de voussoir fictif ; intégrales exactes.

Le piédroit en fin de remblai. La version de 1993 ne charge une face d'extrados verticale que si $x0 \le x < xf$: un piédroit vertical situé exactement à l'abscisse de fin du remblai ne reçoit pas de poussée. VOUTE Python garde cette règle. Dans ALLIESYM, ALLIEDI1 et ALLIEDI2, le piédroit est vertical en $x = 5{,}44 = xf$. En 1993, le `raccord` l'inclinait légèrement (x de 5,42 à 5,44) et il recevait la poussée du remblai : −370,8 contre −95,8 sans poussée (chargement 1 d'ALLIESYM), soit plus de 35 % de la charge totale. La poussée stabilisant les reins, le coefficient de ces voûtes est à peu près divisé par deux. Pour retrouver la poussée, il suffit de prolonger le remblai au-delà du piédroit (xf un peu plus grand) : on retrouve −370,8.

Numérotation. Sans voussoir fictif, les joints vont de 0 (clé) à N : le joint k de la version de 1993 (k ≥ 2) est le joint k − 1 de VOUTE Python. Les zones de résistance des fichiers gardent la numérotation de 1993 et sont traduites à la lecture.

2. Références en géométrie de 1993

Les valeurs de référence ont été calculées avec le même modèle mécanique que VOUTE Python (programmation linéaire, même critère de joint), sur la géométrie de 1993. Un fichier est dit « sans particularité de 1993 » quand aucune des causes du § 1 ne le concerne. Relevé sur le corpus d'essai :

Domaine	Corpus	Sans particularité de 1993	Autres écarts
Coefficient de rupture, voûtes seules	47 fichiers, 115 chargements	32 chargements : écart ≤ 0,0009 %	Géométrie exacte (liste ci-dessous) ; mêmes erreurs de données (120, 125…) et même stabilité en traction partout
Facteur λ sur les actions 3, 4, 5 et recherche de contrôle (`--variable 3,4,5 --controle`)	mêmes fichiers	27 chargements : λ et facteur de contrôle ≤ 0,0009 % ; mêmes mécanismes (renumérotés)	Géométrie exacte
Lignes caractéristiques	mêmes fichiers	symétriques : toutes les lignes égales ; dissymétriques : Hmax, Hmin et domaine de compression égaux	Lignes à cote imposée des dissymétriques : domaine plus large sans le voussoir fictif
Ouvrages (`.VMA` : ponts d'essai, conversions Voute_jf, série de 16 ponts)	23 ouvrages, 72 chargements	52 chargements : écart ≤ 0,0043 % ; même stabilité	Forces projetées sur les courbes exactes (références : polylignes) : quelques 10^{-4} le long du balayage du convoi. Comparaison faite avec le modèle d'appuis des versions précédentes, sans le poids des terres sur la face arrière des culées (§ 9)
Diffusion des charges (`--diffusion tronque`)	48 fichiers	26 chargements : écart ≤ 0,0009 % ; part transmise au sol identique	Profondeur prise sur les courbes exactes

Écarts de coefficient supérieurs à 0,5 % (voûtes seules) :

Fichier	Ch.	Géométrie de 1993	VOUTE Python	Écart	Causes
ALLIEDI1	1 / 2	3,8181 / 5,1429	1,4625 / 1,8147	−62 % / −65 %	raccord, piédroit
ALLIEDI2	1 / 2	5,5605 / 8,0675	2,2288 / 3,6570	−60 % / −55 %	raccord, piédroit
ALLIESYM	1 / 2	3,2104 / 4,7058	1,5299 / 2,2190	−52 % / −53 %	raccord, piédroit
COULOI3T	1	2,3284	2,5484	+9,5 %	raccord, ellipse
COULOI3M	3, 4, 5	36,92 ; 6,398 ; 5,686	37,18 ; 6,472 ; 5,789	+0,7 à +1,8 %	raccord, ellipse

Fichier	Ch.	Géométrie de 1993	VOUTE Python	Écart	Causes
BAGNEUX1	1, 2, 3, 5	5,426 ; 7,057 ; 18,98 ; 6,615	5,478 ; 7,254 ; 19,20 ; 6,491	−1,9 à +2,8 %	raccord, au-delà
BAGNEUX2	1, 2, 3, 5	9,231 ; 12,05 ; 18,98 ; 10,47	9,351 ; 12,26 ; 19,20 ; 10,58	+1,1 à +1,8 %	raccord
GEO_E_D	1 / 2	1,5465 / 1,9414	1,5702 / 1,9709	+1,5 %	raccord
BRIANDE (cartes 1983)	4	49,397	49,145	−0,5 %	raccord

Partout ailleurs l'écart est inférieur à 0,5 %, et en général à 0,1 %.

Lignes à cote imposée des chargements dissymétriques. Le joint 1 du voussoir fictif, à quelques dixièmes de millimètre du joint de clé, obligeait la ligne qui passe à l'extrados (ou à l'intrados) de la clé à y être presque horizontale. Sans ce joint, l'inclinaison est libre et le domaine des poussées à cote imposée est plus large : EXEMPLE, chargement 2, Zmax*Hmin 198,0 en géométrie de 1993 et 181,3 dans VOUTE Python.

Positions équivalentes du convoi. Sur un ouvrage symétrique ou à travées identiques, plusieurs positions du convoi donnent le même coefficient (à 10^{-9} près). VOUTE Python retient la première (TROIS : position −12, coefficient 1,1681).

3. Comparaison à la version PC de 1993

`batteries/run_tests.py` compare 110 coefficients à ceux de la version PC (listings dans `batteries/ref_pc`).

Jeu	Chargements	Coefficient VOUTE Python / version PC
EXEMPLE	1 sym., 1 dissym.	5,2638 / 5,264 ; 6,7481 / 6,722
TEST1	5 sym., 3 dissym.	sym. ≤ 0,012 % ; dissym. +1,0 à +1,8 %
TEST2	3 sym., 1 dissym.	sym. ≤ 0,01 % ; dissym. +0,4 %
TEST3, TEST3B	6 sym., 4 dissym.	sym. ≤ 0,03 % ; dissym. +0,03 à +0,12 %
ALLIESYM	2 sym.	1,5299 / 3,210 ; 2,2190 / 4,706 (piédroit sans poussée, § 1)
ALLIEDI1, ALLIEDI2	4 dissym.	−55 à −64 % (piédroit sans poussée)
ALLIEDI3	1 sym.	4,4830 / 4,399 (écart connu, voir ci-dessous)
COULOI3M	4 sym., 1 instable	−0,4 à +1,8 % (raccord, ellipse) ; instable comme la version PC
COULOI3T	1 dissym.	2,5484 / 2,247 (+13 % ; raccord, ellipse)
BAGNX	3 dissym.	+0,2 à +0,5 %
BAGNEUX1, 2	12 dissym.	−1,4 à +4,4 %
BAGNEUX3	4 dissym.	+2,9 à +18 % (optimiseur de la version PC)
BAGNEUX6, 8, 9	11 dissym.	instables, comme la version PC
BAGNEUX, 4, 5, 7, BRIANDE	—	refusés (erreur 120), comme la version PC
PLCINTR	—	refusé (erreur 125), comme la version PC

Jeu	Chargements	Coefficient VOUTE Python / version PC
15 jeux construits (`batteries/geo`)	14 sym., 15 dissym., 2 instables	sym. ≤ 0,08 % sauf GEO_B_B (−0,15 %, ellipse) et GEO_E_D (+1,6 %, raccord) ; dissym. ≥ PC (+0,15 à +7,9 %)
5 jeux 1983 (cartes)	12 sym., 1 instable	≤ 0,06 %, sauf BRIANDE ch. 4 (−0,5 %, raccord)

Pour les chargements dissymétriques, la version PC ne trouve pas toujours la ligne optimale. Évaluée dans le modèle de VOUTE, la ligne optimale imprimée par la version PC redonne à peu près son coefficient : les deux programmes calculent le même problème mécanique et l'écart vient de l'optimiseur de 1993. Le coefficient de VOUTE Python est donc normalement supérieur ou égal à celui de la version PC.

Deux écarts connus restent : ALLIEDI3 (point d'extrados du joint 11 placé par la version PC hors du cercle d'extrados) et GEO_DISS chargement 1 (chargement symétrique sur une géométrie dissymétrique, mal traité par la version PC).

4. Batteries de tests

Toutes les batteries passent : `interface\python\python.exe batteries\lance_tout.py` (5 à 20 minutes selon le poste).

Batterie	Contrôles	Résultat
`run_tests.py`	45 fichiers : 117 contrôles de non-régression, 111 comparaisons aux références en géométrie de 1993, 110 comparaisons à la version PC, 96 mécanismes, 952 lignes caractéristiques admissibles	tous passent ; 60 écarts dus à la géométrie exacte, listés avec leur cause ; 2 écarts connus de la version PC
`test_interface.py`	relecture et réécriture des 40 `.DON` par le module de l'interface, calcul identique ; 37 723 centres de pression	tous passent
`test_td.py`	4 classeurs Epure_Hinge (TD CHEMER), 77 contrôles de dualité, cas du TD, messages d'erreur : 86 contrôles	tous passent
`test_glissement.py`	Osserain (φ = 24°), BAGNEUX1 (μ = 0,6), TD10 (μ = 0,2), associé et non associé : 168 contrôles	tous passent
`test_multi.py`	34 `.DON` recalculés comme ouvrages d'une arche, équilibre des appuis (faces brisées, sommiers inclinés et blocs en tête compris), symétrie, translation, appuis rigides, ligne VARIABLE, mécanisme : 790 contrôles	tous passent
`test_diffusion.py`	sans effet, voûte = ouvrage d'une arche (6 modèles), résultante, Osserain, ligne DIFFUSION, convoi : 854 contrôles	tous passent
`test_repartie.py`	force répartie inclinée : efforts de la version PC, face cachée, résultante, voûte = ouvrage d'une arche : 24 contrôles	tous passent
`test_coefficients.py`	coefficients de sécurité : FS géo de 12 pleins cintres contre Voute_jf, Milankovitch, valeurs figées de FM, λ, λ∞ et FS géo (68 chargements de voûtes, 18 d'ouvrages), FS géo ≥ 1 ⇔ stabilité, λ ≤ λ∞, FM facteur sur les résistances : 455 contrôles	tous passent

5. Comparaison à Voute_jf

Les cas croisés avec Voute_jf (109 comparaisons) et le convertisseur des classeurs (67 comparaisons) demandent les sources de Voute_jf : ils sont faits dans le paquet de développement et ne sont pas livrés ici. Aucune anomalie de VOUTE n'y apparaît. Les valeurs enregistrées dans les classeurs de référence sont celles de Voute_jf V26, alors que le moteur disponible est la V30 : les comparaisons « moteur Voute_jf / classeur Excel » (2 dans la batterie, 4 dans le convertisseur) s'écartent pour cette seule raison.

Comparaison	VOUTE Python	Voute_jf V30
Voûtes à même géométrie (52 comparaisons)	écart maximal $8{,}5\cdot10^{-6}$	—
Extrados non concentrique (cas F), σ infinie / 600	1,17345799 / 0,742474445	1,17345799 / 0,742474445
Charge inclinée à la cote de la chaussée (cas G)	6,6388233	6,6388233
Ponts à même géométrie (29 comparaisons)	écart maximal $3{,}1\cdot10^{-7}$	—
Exemple de voûte du classeur Voute_jf, 20 / 40 / 80 voussoirs (écart attendu : tracé des joints)	10,099 / 9,257 / 9,244	10,073 / 9,231 / 9,219
Position des rotules (15 comparaisons)	écart maximal $6\cdot10^{-4}$ m (arrondi de la note)	—

Série de 16 ponts (1 à 7 travées, sommiers inclinés). Les classeurs Voute_jf V30 de la série (plein cintre PC, arcs au 1/4 S4 et au 1/6 S6, Osserain simplifié) sont convertis par le convertisseur de la version 1.2 : les sommiers inclinés sont posés directement sur les piles et les culées, dont la tête au-dessus de la plus basse naissance forme un seul bloc, à la densité de l'appui, comme dans Voute_jf. La version 1.1 posait chaque arche sur un joint horizontal porté par un voussoir de 1 mm (coin sous le sommier, ligne `TETE MONOLITHE`) : le joint de naissance était décalé de 1 mm, et la tête de pile d'Osserain prenait la densité des arches au lieu de celle de la pile. Chargement 1 : facteur λ d'une charge de 1 t/m sur la demi-travée gauche ; chargement 3 : essieu de 10 t balayé sur tout le pont (facteur minimal).

Pont	λ Voute_jf V30	λ 1.1	λ 1.2	essieu Voute_jf V30	essieu 1.1	essieu 1.2
P1_PC	4,6602	4,6602	4,6602	1,1759	1,1759	1,1759
P1_S4	8,5386	8,5390	8,5386	1,9451	1,9449	1,9451
P1_S6	3,1959	3,1968	3,1959	0,9510	0,9512	0,9510
P2_PC	4,6602	4,6602	4,6602	1,1759	1,1759	1,1759
P2_S4	10,8558	10,8606	10,8558	1,9683	1,9679	1,9683
P2_S6	6,1954	6,1981	6,1954	0,9472	0,9473	0,9472
P3_PC	4,6602	4,6602	4,6602	1,1759	1,1759	1,1759
P3_S4	10,8558	10,8606	10,8558	1,9591	1,9587	1,9591
P3_S6	6,1954	6,1981	6,1954	0,9516	0,9518	0,9516
P5_PC	4,6602	4,6602	4,6602	1,1759	1,1759	1,1759
P5_S4	10,8558	10,8606	10,8558	1,9339	1,9335	1,9338
P5_S6	6,1954	6,1981	6,1954	0,9540	0,9542	0,9540
P7_PC	4,6602	4,6602	4,6602	1,1849	1,1849	1,1849
P7_S4	10,8558	10,8606	10,8558	1,9469	1,9465	1,9469
P7_S6	6,1954	6,1981	6,1954	0,9498	0,9500	0,9498

Pont	λ Voute_jf V30	λ 1.1	λ 1.2	essieu Voute_jf V30	essieu 1.1	essieu 1.2
Osserain simplifié	2,5708	2,5689	2,5708	6,6210	6,5882	6,6209

Écart maximal de la version 1.2 avec Voute_jf V30 : $1{,}4 \cdot 10^{-6}$ sur λ, $4{,}7 \cdot 10^{-5}$ sur l'essieu (version 1.1 : 0,08 % et 0,5 %). Cas test Voute_jf V27 G (trois arches surbaissées à sommiers inclinés) : 22,8313 et 18,2151 pour Voute_jf 22,8313 et 18,215.

6. Contrôles propres au moteur

Ces contrôles sont dans les tests unitaires du moteur (132 tests du paquet de développement, dossier `tests`).

Contrôle	Résultat
Certificat des plans coupants, chaque chargement	coefficient de l'état trouvé ≤ coefficient exact ≤ coefficient du dernier programme linéaire, écart relatif ≤ 10^{-9}
Simplexe (gradient projeté, factorisation QR mise à jour) contre HiGHS (scipy)	programmes aléatoires, dégénérés, non bornés, inadmissibles, et dernier programme de chaque chargement du corpus : même optimum
Mécanisme de ruine	cinématiquement admissible (puissance des inconnues hyperstatiques nulle), puissance des charges égale à 1, dualité forte ; mêmes rotules (renumérotées) que les références sur les fichiers sans particularité de 1993
Plein cintre sous poids propre (Milankovitch)	épaisseur critique t/R = 0,1075 de 20 à 200 voussoirs
Recherche de contrôle (mode TD)	version vectorisée identique à l'énumération directe ; dualité cinématique / statique à résistance infinie ; mécanisme imposé redonnant son facteur ; lignes caractéristiques admissibles
Voûte `.DON` calculée comme ouvrage d'une arche sur culées rigides	même coefficient à 10^{-6}, avec et sans diffusion (10^{-5} pour chaque modèle)
Ouvrages	équilibre de la tête des piles, invariance par translation, appuis rigides (coefficient de l'arche la plus faible), erreurs 300 à 310
Diffusion	sans effet avec `aucune` ; résultante conservée (voussoirs + sol) ; priorités option / ligne `DIFFUSION`
Force répartie inclinée	efforts de la version PC de 1993 sur la face exposée, face cachée sans effort, résultante et part hors de la demi-voûte exactes
Ligne de commande et interface	fichiers écrits, codes de sortie, messages d'erreur ; calcul dans le processus de l'interface (`voute.api`) identique à la ligne de commande
Coefficient géométrique d'Heyman	demi-cercle sous poids propre à t/R = 0,1075 : FS géo = 1,0003 (60 voussoirs) ; 12 pleins cintres avec ou sans charge ponctuelle : marge géométrique exacte de Voute_jf à 10^{-8} ; encadrement indépendant (une ligne tient dans l'épaisseur ep / (FS $(1 - 10^{-6})$), pas dans ep / (FS $(1 + 10^{-6})$)) sur toutes les voûtes de la batterie et deux ouvrages ; FS géo ≥ 1 si et seulement si la voûte est stable en traction (68 chargements)
Facteur à résistance infinie λ∞	égal au facteur statique à résistance infinie du mode TD (58 chargements, 10^{-9}) ; λ ≤ λ∞ ; voûte = ouvrage d'une arche (10^{-6})
Coefficient de rupture et résistances	FM recalculé avec toutes les résistances divisées par FM : 1 à 10^{-7}

Contrôle	Résultat
Non-régression de la version 1.1	424 calculs de référence : toutes les lignes des notes et des fichiers CSV de la version 1.0 retrouvées ; seuls des blocs, des colonnes en fin de ligne et le fichier `_ligne_geo.csv` des ouvrages s'ajoutent
Non-régression de la version 1.2	424 calculs de référence : 390 identiques à la version 1.1 ; les 34 autres sont les ponts à culées chargées de terres sur leur face arrière, sans changement des coefficients de rupture ni des facteurs λ (§ 9)

7. Validation du modèle mécanique

Les contrôles suivants portent sur le modèle mécanique, indépendamment de la géométrie :

- contrôle croisé des chargements dissymétriques de la version PC (ligne optimale de la version PC évaluée dans le modèle, § 3) ;
- ouvrages à plusieurs arches : TROIS (1,168, fixé par le sol sous les piles ; 1,691 sur appuis rigides), DEUX_DISS, limites du modèle des piles et culées ;
- mode TD : classeurs Epure_Hinge, cas du TD (facteur de contrôle 7,3611 ; rotules clé extrados, joint 9 intrados, naissance extrados) ;
- glissement : Osserain contre STRAINS (INSA Rennes, 2023), BAGNEUX1, TD10 ;
- diffusion : Osserain contre l'étude indépendante de la note technique (`notices/Note_technique_diffusion_remblai.pdf`) ;
- Voute_jf : 109 cas croisés, série de 16 ponts de 1 à 7 travées, sommiers inclinés posés sur les appuis (§ 5 et § 9), convertisseur des classeurs ;
- piles et culées polygonales, bloc en tête, poids des terres : formules fermées et équivalences (§ 9).

8. Résultats de référence

Valeurs à retrouver après une installation ou une modification :

Calcul	Résultat
`EXEMPLE.DON`	5,2638 (BT symétrique) ; 6,7481 (BC dissymétrique)
`TD10.DON`	5,6306 ; mécanisme à 5 rotules : clé extrados, joint 11 intrados, naissance extrados
`TROIS.VMA` (3 pleins cintres, convoi sur 37 positions)	1,1681
`DEUX_DISS.VMA`	1,2034 ; 0,8242
`APPUIS_POLYGONAUX.VMA` (faces brisées, semelles, culée en L)	1,1700
`ARCS_SOMMIERS.VMA` / `ARCS_BLOCS.VMA` (sommiers inclinés, bloc en tête)	2,2296 / 2,1767
`serie_1_a_7_travees\P3_S4_pont.VMA` (λ ; essieu)	10,856 ; 1,9591
Osserain, 5 MPa, charge d'essai (`OSS_VAR.VMA`, λ phase 4 / phase 2)	1,1927 / 1,3089

Osserain avec diffusion (λ phase 4 / phase 2) :

Modèle	VOUTE Python	Référence en géométrie de 1993	Étude indépendante (note technique)
aucune	1,1927 / 1,3089	1,1923 / 1,3086	1,192 / 1,309
Boussinesq	1,2959 / 1,4208	1,2956 / 1,4204	1,291 / 1,415
Boussinesq tronqué 30°	1,2367 / 1,3551	1,2364 / 1,3547	—
pente 1 pour 2 (étude)	1,3577 / 1,4897	1,3569 / 1,4888	1,357 / 1,487
pente 30° (étude)	1,3758 / 1,5095	1,3750 / 1,5086	1,372 / 1,506
pente 45° (étude)	1,4542 / 1,5995	1,4532 / 1,5985	1,452 / 1,597

L'écart avec la référence en géométrie de 1993 (moins de 0,1 %) vient du `raccord` des courbes d'extrados d'Osserain.

9. Piles et culées polygonales (version 1.2)

La version 1.2 décrit les piles et les culées par des faces brisées (lignes `FACE`), accepte les sommiers inclinés et les naissances à des cotes différentes (la tête de l'appui au-dessus de la plus basse naissance forme un seul bloc), un bloc de maçonnerie en tête (lignes `BLOC`), et compte le poids des terres qui reposent sur la face arrière des culées. Les appuis à faces droites, à naissances horizontales à la même cote et sans bloc sont calculés comme avant, par le même code.

Contrôle	Résultat
Face d'un seul point (la fondation) à la place du fruit, sur chaque appui des ouvrages d'essai	calcul par polygone identique au calcul par trapèze : coefficients et efforts des sections à 10^{-12}
Poids et terres, formules fermées	culée en L (maçonnerie 445,5, terres sur le talon 288), pile à retraite sur semelle, face arrière à fruit (prisme et colonne de terres), face arrière verticale (pas de terres)
Sections	cotes des sommets et répartition des sections intermédiaires, largeur commune à une retraite, encorbellement porté par sa partie étroite, avertissement des talons longs
Naissances inclinées	tête de pile sous les sommiers, coins de culée à la cote de l'extrados du sommier ; ouvrage retourné et ouvrage décalé : mêmes coefficients
Bloc en tête	aire exacte (intégrale de l'extrados), joints internes et joint de contact, charges et remblai portés par le bloc ; retournement et translation
Équilibre des appuis (`test_multi.py`, ouvrages `PILES_SEMELLES`, `ARCS_SOMMIERS` et `ARCS_BLOCS` compris)	équilibre de chaque tronçon recalculé indépendamment, à partir des efforts des sections
Erreurs	304 à 310 (faces, bloc) et messages de lecture
Série de 16 ponts et cas test V27 G	Voute_jf V30 retrouvé à $1{,}4 \cdot 10^{-6}$ (λ) et $4{,}7 \cdot 10^{-5}$ (essieu), § 5

Poids des terres sur la face arrière des culées. Sur les 424 calculs de référence, 390 donnent exactement les mêmes notes et fichiers CSV que la version 1.1. Les 34 autres sont des ponts dont les culées en maçonnerie ont un fruit arrière et portent des terres (TROIS et ses 12 variantes de syntaxe, DEUX_DISS, les 15 ponts réguliers de la série, le pont du classeur Voute_jf) : la note ajoute une ligne sur les terres, et le poids des terres posées sur la face arrière change les efforts des culées. Aucun coefficient de rupture ni facteur λ des chargements ne change, car ils sont fixés par les arches ou les piles. Le coefficient de 184 positions du convoi augmente (jusqu'à 0,8 %, aucune ne diminue), et le coefficient géométrique d'Heyman des ponts en plein cintre passe de 3,18 à 3,28 (chargement 1) et de 3,34 à 3,90 (chargement 2) : la section limitante n'est plus dans la culée. La comparaison aux références du § 2 est faite avec le modèle des versions précédentes (sans ce poids).