Note technique — diffusion des charges dans le remblai

Oct 10, 2026 · @Jean-François

Diffuser dans le remblai les charges appliquées en surface relève le facteur de ruine de quelques pour cent à plus du double, selon la largeur de la charge, la hauteur de remblai et le modèle. VOUTE ne diffuse pas par défaut ; Boussinesq et Boussinesq tronqué à 30° sont deux options au choix de l'utilisateur, et la note conseille de comparer les deux.

Résumé

- **Le problème.** VOUTE projette par défaut les charges de surface sur l'extrados sans les étaler, comme en 1993. C'est sûr, mais sévère pour les charges étroites ; STRAINS fait de même et le juge « très conservateur » pour Osserain.
- **Les modèles.** Pentes fixes des normes (1 pour 2, 30°, 45°), Boussinesq (Choo et al., thèse d'Ahmad), Boussinesq tronqué entre deux plans inclinés (RING). La thèse d'Ahmad juge la règle 1 pour 2 non justifiée et retient Boussinesq.
- **L'implémentation.** Par défaut, aucune diffusion. L'option `--diffusion boussinesq` ou `--diffusion tronque` (Boussinesq tronqué à 30°), ou la ligne `DIFFUSION` des `.VMA`, diffuse les forces concentrées et exceptionnelles, convoi compris ; la note indique la part transmise au sol. Les pentes fixes et un autre angle de troncature restent disponibles pour des études spécifiques. 848 contrôles valident l'option.
- **Les résultats.** Sur la charge d'essai large d'Osserain : 1,31 sans diffusion, 1,35 tronqué, 1,42 Boussinesq (1,49 à 1,60 pour les pentes étudiées). Sous un essieu étroit sur une voûte de 10 m, Boussinesq multiplie le facteur par 1,4 à 3,5 selon le remblai, quand le tronqué reste entre +11 et +79 %.
- **La vigilance.** Le gain de Boussinesq complet vient en partie de la traîne envoyée vers les reins et au-delà des naissances (jusqu'à 24 % de la charge au sol), qu'un massif continu suppose et que la voûte, plus raide, ne justifie pas forcément. D'où le conseil de calculer aussi le modèle tronqué et de retenir le plus faible.

1. Le problème

Une charge de trafic ou d'essai est posée sur la chaussée, au-dessus du remblai qui couvre la voûte. Elle atteint l'extrados après avoir traversé 0,3 à plusieurs mètres de remblai, qui l'étale. La façon de modéliser cet étalement change la charge que voit chaque voussoir, donc le mécanisme et le facteur de ruine.

La règle de 1993. VOUTE (version de 1993, et VOUTE Python par défaut) projette la charge sur l'extrados dans sa direction, sur la même largeur qu'en surface :

- forces réparties et exceptionnelles : le segment chargé est projeté tel quel, avec son intensité ;
- forces concentrées : appliquées au point d'extrados situé sous elles ;
- remblai : poids compté par colonnes verticales, poussée horizontale K·γ·h ; il porte les charges sans les étaler.

Cette hypothèse est sûre mais sévère pour les charges étroites : un essieu arrive sur la voûte aussi concentré qu'en surface, alors qu'à 1 m de profondeur il s'est étalé sur plus de 1 m.

Le constat d'Osserain. STRAINS (INSA Rennes, 2023), qui ne diffuse pas non plus, trouve pour le pont d'Osserain une charge de ruine plus élevée sans remblai qu'avec. Le bureau d'études juge ce résultat contre-intuitif et l'attribue en partie à l'absence de diffusion, « hypothèse très conservatrice » qui « ne rend sans doute pas compte de la réalité du chargement ». Le guide SETRA de 1982 reconnaissait déjà le rôle répartiteur du remplissage, en long et en travers, sans donner d'angle (gain de 10 % pour 0,30 m de remblai à la clé, d'après Agrawal, 1972).

Cette note fait le point sur les modèles de diffusion, compare leurs effets, et décrit l'option de diffusion de VOUTE Python.

2. Les modèles de diffusion

Trois familles coexistent : la pente fixe des normes, la solution élastique de Boussinesq, et le remblai traité comme un sol à part entière. Aucune ne fait consensus pour les voûtes.

Modèle	Principe	Où on le trouve
Pente 1 pour 2 (26,6° sur la verticale)	Étalement uniforme, une demi-profondeur de chaque côté	Pratique britannique d'évaluation des voûtes (BD 21, Highways Agency, Network Rail, London Underground)
Pente 30°	Idem, 0,58 × profondeur de chaque côté	PD 6694-1 (ouvrages enterrés, Royaume-Uni)
Pente 1 pour 1 (45°)	Idem, une profondeur de chaque côté	EN 1991-2, 4.3.6 (chaussée et dalles) ; IRC 112 (Inde) pour les remblais

Modèle	Principe	Où on le trouve
Boussinesq	Massif élastique semi-infini : contrainte en cloche, maximale sous la charge, avec des queues étalées	Choo et al. (1991) ; thèse d'Ahmad (2017)
Boussinesq tronqué	Boussinesq limité à deux plans inclinés partant des bords de la charge	Logiciel RING (Gilbert)
Remblai comme sol	Diffusion plus butée du remblai (Mohr-Coulomb)	RING (modèle de sol), éléments finis ou discrets

Pente fixe. Une charge q sur une largeur b arrive à la profondeur h uniformément répartie sur b + 2h·tan θ :

$$q(h) = q \, \frac{b}{b + 2 h \tan\theta}$$

Boussinesq, charge en bande. En un point vu sous l'angle α depuis les bords de la bande (δ : inclinaison sur la verticale de la droite qui joint le point au bord x_2 de la bande, comptée positivement vers les x croissants), la contrainte verticale vaut :

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} \left(\alpha + \sin\alpha \cos(\alpha + 2\delta) \right)$$

Les composantes horizontale et de cisaillement, que VOUTE ne prend pas en compte, sont :

$$\sigma_x = \frac{q}{\pi} \left(\alpha - \sin\alpha \cos(\alpha + 2\delta) \right), \qquad \tau_{xz} = \frac{q}{\pi} \sin\alpha \, \sin(\alpha + 2\delta)$$

Boussinesq, force concentrée (Flamant). Une force linéique P donne, à la distance horizontale x et à la profondeur h :

$$\sigma_z = \frac{2 P}{\pi} \, \frac{h^3}{(x^2 + h^2)^2}$$

Boussinesq tronqué. Même contrainte, annulée hors de l'intervalle [x_1 − h·tan θ, x_2 + h·tan θ], puis remise à l'échelle pour conserver la résultante.

Pour une force concentrée P à la profondeur h, les modèles se distinguent ainsi :

Modèle	Largeur chargée	Pic de pression	Part dans ± h/2
Pente 1 pour 2	1,00 h	1,00 P/h	100 %
Pente 30°	1,15 h	0,87 P/h	87 %
Boussinesq	illimitée (82 % dans ± h)	0,64 P/h	55 %
Pente 45°	2,00 h	0,50 P/h	50 %

Boussinesq a un pic plus bas que les pentes de 26,6° et 30°, mais concentre plus de charge près de l'axe que la pente de 45°. Il étale le reste loin, avec des queues qui portent 18 % de la charge au-delà de ± h.

Limites de Boussinesq. La solution vaut pour un massif homogène, élastique et infini. La voûte, bien plus raide que le remblai, attire la charge sous elle, ce qui rapproche le résultat de la projection directe aux faibles hauteurs.

3. Ce que disent la thèse d'Ahmad et RING

La thèse de S. H. S. Ahmad (*Static Analysis of Masonry Arches*, Université de Salford, 2017) est la référence la plus complète sur la question. Elle ne fixe pas d'angle de diffusion : elle remplace la pente fixe par Boussinesq, qu'elle enrichit.

- **Règle 1 pour 2 critiquée.** La pente fixe des guides britanniques « n'a pas été justifiée par la recherche » (Harvey ; Callaway et al., 2011).
- **Boussinesq comme modèle de diffusion**, dans la ligne de Choo et al. (1991). La thèse ajoute les composantes horizontales des contraintes, qui s'écartent du point de charge et changent de sens de part et d'autre de la résultante, la courbure de l'extrados, et le frottement d'interface qui borne l'inclinaison de la pression transmise.
- **Hypothèses assumées (§ 4.1.13).** Demi-espace, sol homogène, élastique linéaire. Elles sont justifiées parce que le remblai entre la charge et la rotule 1 reste en compression confinée, à peu près élastique jusqu'aux charges de service des ouvrages anciens.
- **Voûte de décharge au-dessus de la rotule 1 (§ 4.1.14).** Quand la voûte cède sous la charge, le remblai fait « trappe » (Terzaghi) : la pression se redistribue, mais la résultante sur chaque voussoir ne change pas. Le poids du remblai a une composante horizontale au repos (K0).
- **Pressions connues et inconnues.** Connues : poids propre et surcharge diffusée. Inconnues : la réaction du remblai que la voûte repousse en se déformant, modélisée par une butée de Rankine généralisée avec frottement d'interface (Mohr-Coulomb non associé) ; la dilatance est laissée à des travaux futurs.

- **Validation.** Voûtes surbaissées 4:1 à un rouleau, remblai MOT Type 1, charge par poutre transversale au quart de portée, 12 cellules de pression, implémentation Matlab, φ de 40 à 55°. La conclusion se limite à une « ressemblance prometteuse » avec les charges de ruine mesurées ; le chapitre des recommandations est vide.

RING (Gilbert), tel que décrit par la thèse. La diffusion se fait « de la même manière que Choo et al. » : distribution de Boussinesq linéaire, limitée à deux plans inclinés partant du point d'application de la charge à un angle choisi. La butée est une pression horizontale proportionnelle à la pression verticale en place. Gilbert et al. (2010) obtiennent des capacités raisonnables avec une résistance du sol partiellement mobilisée.

Ce que VOUTE en retient. Boussinesq pour la surcharge (pressions connues), avec la variante tronquée de RING pour comparaison. Les composantes horizontales et la butée restent une étape distincte, non faite.

4. Schémas explicatifs

Les schémas portent sur une voûte type : portée 10 m, flèche 2,5 m, épaisseur 0,5 m, remblai de 0,5 m à la clé (2,7 m aux naissances), essieu de 100 kN/m sur 0,30 m au quart de portée. La résultante est la même partout ; seule la répartition change.

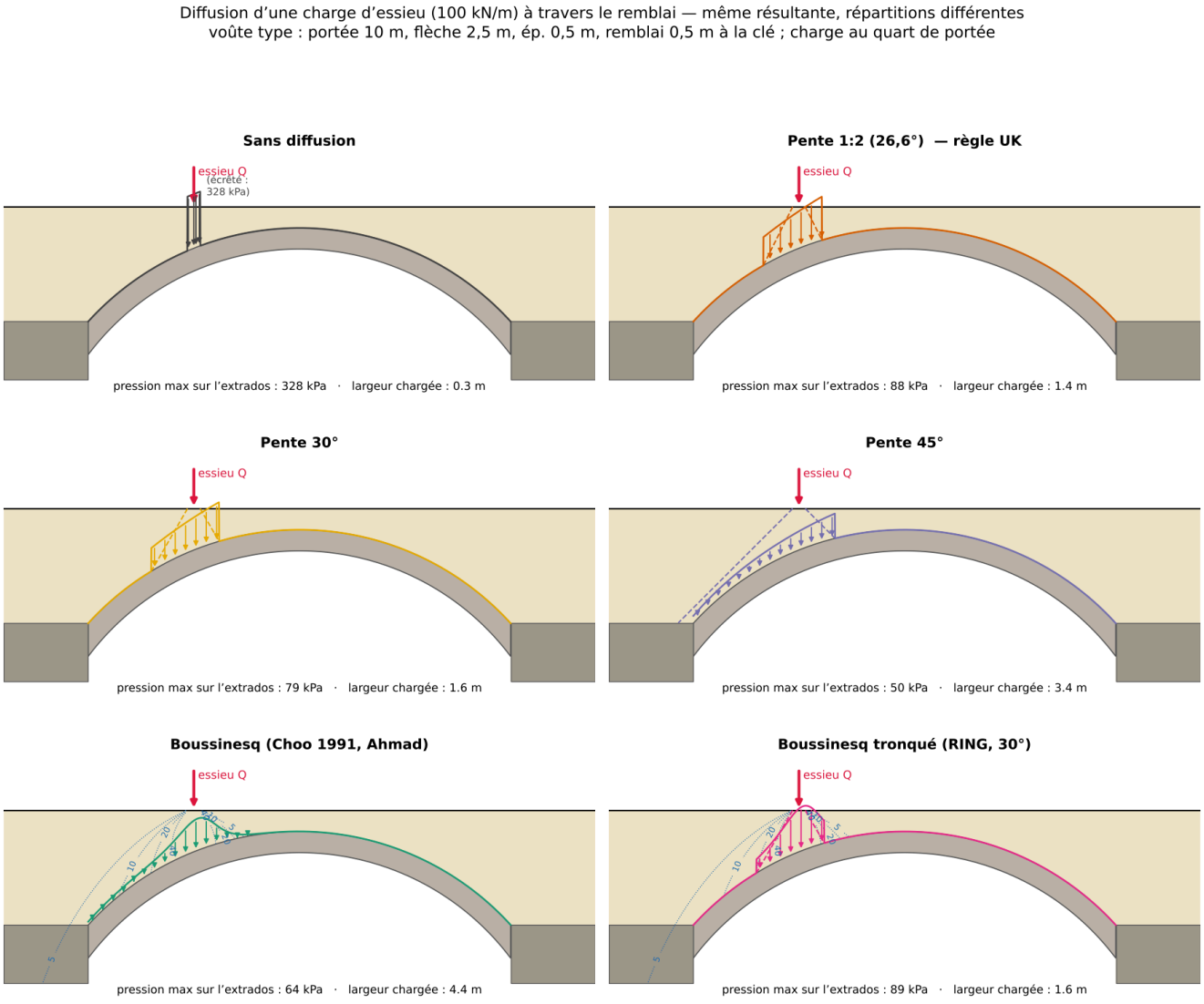
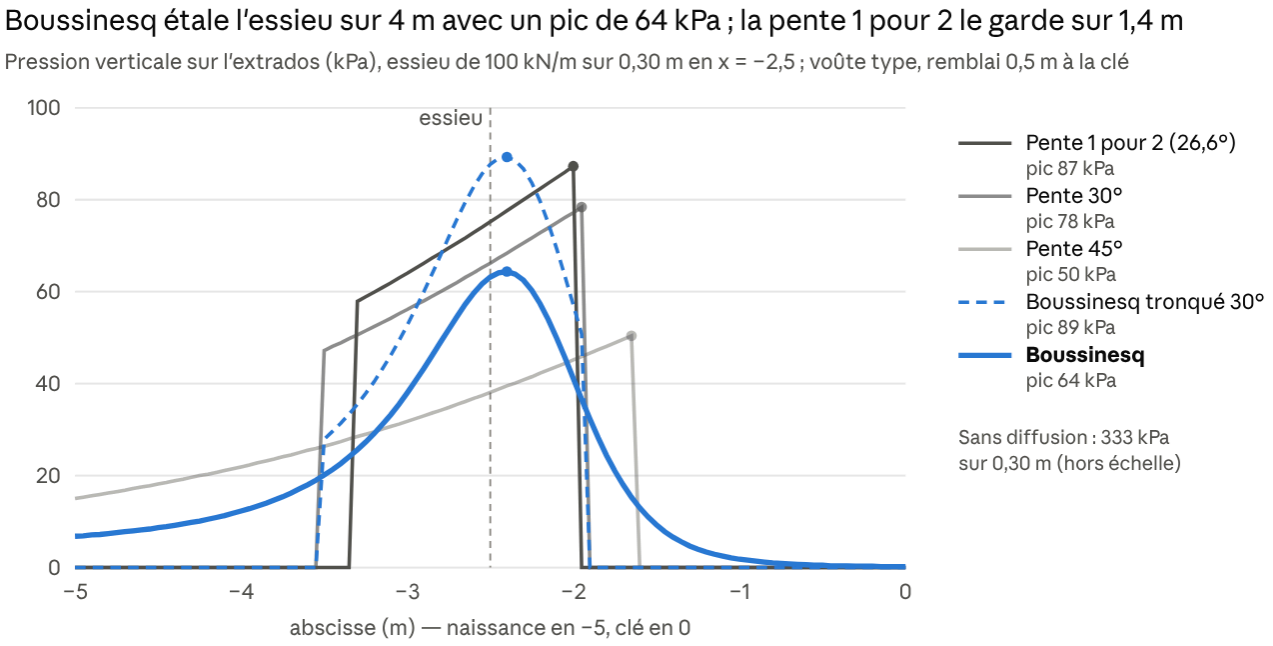


Figure 1 — Les six hypothèses. Les traits tiretés limitent les cônes de diffusion ; les courbes pointillées bleues sont les isobares de Boussinesq (kPa) ; les flèches donnent la pression reçue par l'extrados.

- **Sans diffusion**, l'essieu arrive sur 0,30 m à 333 kPa.
- **Les pentes fixes** donnent un rectangle déformé : uniforme sur un plan horizontal, il s'allonge sur l'extrados incliné et la pression croît vers la clé, où le remblai est le plus mince.
- **Boussinesq** donne une cloche centrée sous la charge, avec une longue traîne vers la naissance, où le remblai est épais.
- **Boussinesq tronqué** coupe cette traîne aux plans à 30° ; la normalisation reporte la part coupée au centre, d'où un pic de 89 kPa, plus haut que la pente 1 pour 2.



Le graphique superpose les cinq profils. Boussinesq a le pic le plus bas des modèles à 26,6° et 30°, et la plus grande largeur chargée ; la pente 45° étale davantage près de la charge, mais s'arrête net.

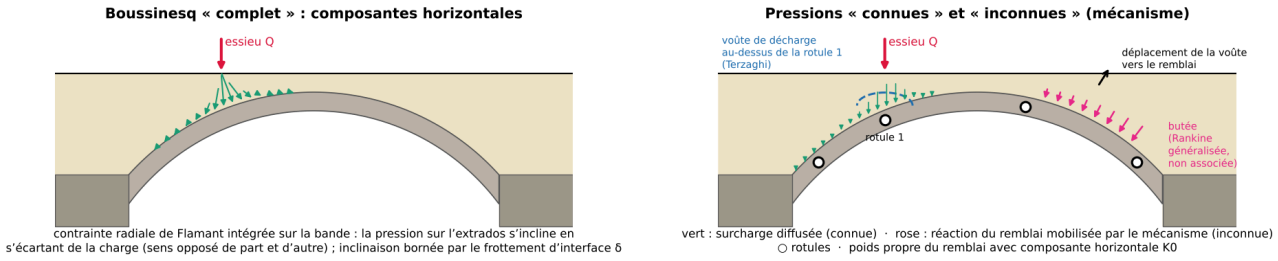


Figure 2 — Le modèle complet d'Ahmad, qualitatif. À gauche, la contrainte radiale de Flamant intégrée sur la largeur de l'essieu : la pression sur l'extrados s'incline en s'écartant de la charge, dans un sens de chaque côté. À droite, les deux familles de pressions : la surcharge diffusée (vert, connue) et la butée du remblai que la voûte repousse en se déformant (rose, inconnue), avec la voûte de décharge au-dessus de la rotule 1. VOUTE ne prend en compte que la composante verticale de la surcharge diffusée.

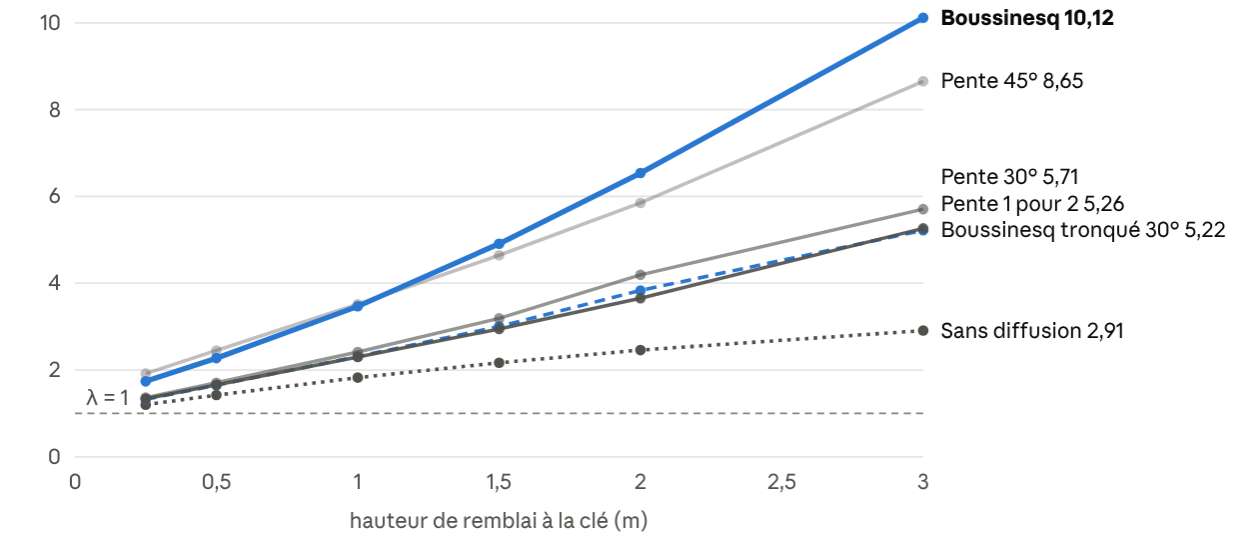
5. Comparaison des hypothèses sur la voûte type

L'écart entre modèles croît avec la hauteur de remblai et dépend fortement de la largeur de la charge. Sous un essieu étroit, Boussinesq est le plus favorable de tous ; sous une charge large, il redevient plus prudent que les pentes fixes.

Calculs VOUTE sur la voûte type de la figure 1 (maçonnerie 22 kN/m³, 5 MPa ; remblai 20 kN/m³, K = 0,3), facteur λ sur la seule charge appliquée au quart de portée, poids propre et remblai fixes.

Sous un essieu, Boussinesq multiplie λ par 1,4 à 3,5 ; tronqué et pente 1 pour 2 restent proches

Facteur λ sur l'essieu (100 kN/m sur 0,30 m au quart de portée), voûte type, selon la hauteur de remblai à la clé



VOUTE, option --diffusion, facteur sur l'essieu seul (--variable 5) · voûte type, 6 hauteurs de remblai × 6 modèles

Hauteur de remblai. Sans diffusion, λ passe de 1,20 à 2,91 quand le remblai à la clé passe de 0,25 à 3 m (effet du poids du remblai seul). Les modèles forment deux groupes :

- **pente 1 pour 2, pente 30° et Boussinesq tronqué** restent groupés, de +11 à +96 % sur le calcul sans diffusion ;
- **Boussinesq et pente 45°** s'en détachent dès 0,25 m de remblai, jusqu'à +250 % pour Boussinesq à 3 m. La part de l'essieu qui part au sol au-delà des naissances atteint 9 % (0,25 m) à 24 % (3 m) avec Boussinesq.

Largeur de la charge. Gain sur le calcul sans diffusion, même résultante (100 kN/m) répartie sur une largeur b :

Remblai à la clé	b	λ sans diffusion	Tronqué 30°	Boussinesq	Pente 1 pour 2	Pente 30°	Pente 45°
0,5 m	0,3 m	1,42	+16 %	+60 %	+16 %	+20 %	+72 %
0,5 m	1 m	1,59	+14 %	+48 %	+19 %	+24 %	+71 %
0,5 m	2 m	1,86	+16 %	+39 %	+27 %	+39 %	+70 %
0,5 m	4 m	2,80	+11 %	+28 %	+35 %	+39 %	+64 %
1,5 m	0,3 m	2,17	+38 %	+127 %	+36 %	+47 %	+114 %

Remblai à la clé	b	λ sans diffusion	Tronqué 30°	Boussinesq	Pente 1 pour 2	Pente 30°	Pente 45°
1,5 m	1 m	2,39	+42 %	+109 %	+43 %	+63 %	+115 %
1,5 m	2 m	2,74	+38 %	+94 %	+57 %	+66 %	+119 %
1,5 m	4 m	3,85	+27 %	+71 %	+57 %	+66 %	+129 %

Ce qui explique ces écarts :

1. **Les pentes fixes** gardent la charge du côté où elle est appliquée, sur une largeur proportionnelle à la profondeur. Leur gain croît avec la largeur de la charge : une charge large déborde vers la clé et vers la naissance, où elle stabilise.
2. **Boussinesq** envoie une part de la charge loin de son point d'application : vers les reins, où le remblai est épais et où la contrainte du demi-espace reste forte, au-delà des naissances, et un peu sur l'autre demi-voûte. C'est très favorable au mécanisme dissymétrique d'une charge étroite. Pour une charge large, la cloche est plus concentrée que l'étalement uniforme d'une pente, d'où l'inversion.
3. **Le Boussinesq tronqué** coupe la traîne, ce qui le ramène au niveau de la pente 1 pour 2, et même en dessous pour une charge large.

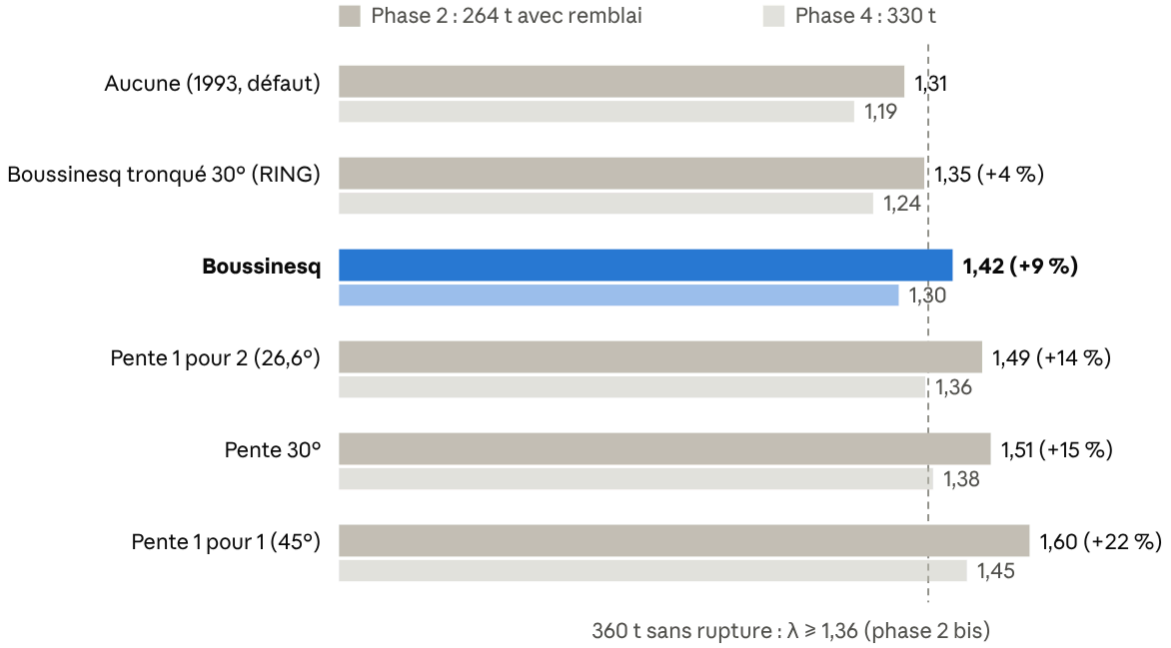
Point de vigilance. La traîne de Boussinesq vers les reins suppose un massif continu sous l'extrados. La voûte, plus raide que le remblai, attire en réalité la charge vers les zones peu profondes. Pour une charge étroite sous un remblai épais, le gain de Boussinesq complet est donc probablement surestimé ; c'est précisément ce que limite la troncature de RING.

6. Application à Osserain

Sur le pont d'Osserain, la diffusion relève le facteur de la charge d'essai de la phase 2 (264 t) de 1,31 à 1,42 avec Boussinesq. La charge d'essai est large (68,7 kN/m sur 7,10 m) et le remblai mince : c'est le cas où Boussinesq est plus prudent que les pentes fixes.

Sur la charge d'essai large d'Osserain, Boussinesq relève λ de 9 %, les pentes de 14 à 22 %

Ouvrage complet, maçonnerie 5 MPa : facteur λ sur la seule charge d'essai (VOUTE 2026, OSS_VAR.VMA)



VOUTE, OSS_VAR.VMA (ouvrage complet, 5 MPa), option --diffusion

Calcul : modèle complet de l'ouvrage (`OSS_VAR.VMA` , trois arches, piles et culées rigides), charge d'essai multipliée, poids propre, remblai et chaussée fixes. Une étude indépendante en Python, faite avant l'implémentation, donnait les mêmes facteurs à 0,4 % près.

Modèle	λ phase 2	λ phase 4	Part de la charge d'essai sur la culée rigide
Aucune	1,309	1,192	—
Boussinesq tronqué 30°	1,355	1,236	3 %
Boussinesq	1,420	1,296	7 %
Pente 1 pour 2	1,489	1,357	6 %
Pente 30°	1,509	1,375	7 %
Pente 45°	1,598	1,453	14 %

- **Profondeur.** Le remblai sous la surface (cote 25,96) va de 0,46 m à la clé à 1,7 m près de la naissance C0 : la charge reste peu profonde sur presque toute sa largeur.
- **Déport vers la culée.** Une part de la charge diffusée tombe au-delà de la naissance, sur la culée rigide : une partie du gain vient de là, et dépend du modèle de la culée.

- **Chargements sans charge localisée** (poids propre, travaux) : inchangés, la chaussée n'étant pas diffusée.

L'essai DOLMEN. La restitution AFGC (G. Viossanges, janvier 2026) indique un chargement porté à 360 t (phase 2 bis) sans rupture, soit $\lambda \geqslant 1{,}36$ sur 264 t si la disposition et l'état du remblai sont ceux du modèle. C'est au-dessus du calcul sans diffusion (1,31), au niveau du Boussinesq tronqué (1,35), sous Boussinesq (1,42) : l'essai ne départage pas les modèles diffusants, mais confirme que l'hypothèse sans diffusion est sévère.

7. Autres cas

Les fichiers de test de VOUTE montrent les deux extrêmes : un effet négligeable, voire légèrement défavorable, quand la charge est déjà large et peu profonde, et un effet très fort quand une charge proche des naissances traverse un remblai épais.

Coefficient de rupture global (toutes actions multipliées), chargement le plus défavorable concerné :

Fichier	Situation	Aucune	Tronqué 30°	Boussinesq	Pente 1 pour 2	Pente 30°	Pente 45°	Part au sol (Boussinesq)
TEST2, ch. 2	charge large, 0,55 m de remblai	3,749	3,745	3,757	3,724	3,723	3,723	0,1 %
TEST2, ch. 3	idem, autre position	4,117	4,137	4,155	4,070	4,066	4,061	3 %
TD10	charge de clé sur 0,10 m, 1 m de remblai	5,631	6,000	7,084	5,987	6,043	6,382	8 %
COULOI3M, ch. 2	ouvrage de 4,4 m, charge sur toute la demi-portée, remblai épais aux naissances	3,524	4,411	5,709	4,906	4,951	5,767	29 %
COULOI3T	idem, dissymétrique	2,328	3,812	6,060	5,106	5,217	6,740	29 %

- **La diffusion n'est pas toujours favorable.** Sur TEST2, les pentes fixes abaissent le coefficient de 1 % : la charge étalée atteint une zone plus sensible du mécanisme. C'est rare et faible, mais la note de calcul doit le montrer.
- **Charge de clé (TD10).** Les pentes et le tronqué donnent +6 à +13 % ; Boussinesq +26 %, dont 8 % de la charge envoyée au-delà des naissances.

- **Petits ouvrages très remblayés (COULOI3).** Le coefficient est multiplié par 1,6 à 2,9 selon le modèle, et 17 à 35 % de la charge part au sol. Le gain dépend alors surtout de ce qui se passe au-delà des naissances, c'est-à-dire du modèle de la culée, que VOUTE tient pour rigide.

8. Implémentation dans VOUTE

La diffusion est un modèle de charge : elle s'insère avant le calcul, dans la répartition des charges sur les voussoirs. Le solveur, le mécanisme, le mode TD, le glissement et les lignes caractéristiques ne changent pas. Le code est dans le module `voute.diffusion`.

Modèle	Option de la ligne de commande (`.DON` et `.VMA`)	Ligne du fichier `.VMA`	Interface
Aucune (défaut)	rien, ou `--diffusion aucune`	rien, ou `DIFFUSION AUCUNE`	« aucune »
Boussinesq	`--diffusion boussinesq`	`DIFFUSION BOUSSINESQ`	« Boussinesq »
Boussinesq tronqué 30°	`--diffusion tronque`	`DIFFUSION BOUSSINESQ TRONQUE`	« Boussinesq tronqué », angle 30
Étude : autre angle de troncature	`--diffusion tronque,25`	`DIFFUSION BOUSSINESQ TRONQUE 25`	« Boussinesq tronqué », angle voulu
Étude : pente fixe	`--diffusion pente,26.57` ou `--diffusion 45`	`DIFFUSION PENTE 26.57` ou `DIFFUSION 45`	« pente fixe (étude) », angle voulu

Les deux premiers modèles sont les choix courants. L'autre angle de troncature et les pentes fixes servent aux études spécifiques (comparaison avec d'autres règles, sensibilité, § 5 à 7) ; la note de calcul les signale comme telles. L'angle vaut 30° par défaut.

Dans un `.VMA`, la ligne `DIFFUSION` se place au niveau de l'ouvrage (tous les chargements) ou dans un bloc `CHARGEMENT` (ce chargement seulement) ; l'option de la ligne de commande l'emporte sur les deux. Exemple :

```
DIFFUSION BOUSSINESQ
...
CHARGEMENT PHASE 2 AVEC REMBLAI
  DIFFUSION BOUSSINESQ TRONQUE
  VARIABLE 5
  EXCEPTIONNELLE 68.7 68.7 -7.1 25.96 0 25.96 0
FIN
```

Algorithme, pour chaque charge diffusée :

1. **Sélection.** Forces concentrées et exceptionnelles, convoi compris, verticales, définies au-dessus de l'ouvrage. Les forces réparties (chaussée, superstructure, en général uniformes sur tout l'ouvrage), le remblai et les charges inclinées ne sont pas diffusés.
2. **Profondeur.** La cote de la charge est la surface de diffusion. La profondeur h est prise au droit de chaque bande de 5 cm, entre cette surface et la surface supérieure de l'ouvrage (extrados, tête de pile).
3. **Distribution.** Chaque bande reçoit l'intégrale exacte de la contrainte verticale sur sa largeur : primitive de la bande de Boussinesq, de Flamant pour une force concentrée, annulée hors des plans de troncature pour le modèle tronqué ; recouvrement uniforme pour la pente fixe. Boussinesq s'étend à ± 10 h, où il reste moins de 0,02 % de la charge.
4. **Normalisation.** Comme h varie le long de la voûte, la somme des bandes est remise à la résultante de la charge.
5. **Projection.** Chaque bande devient une force répartie verticale, projetée sur l'extrados comme toute force répartie, dans la catégorie de la charge d'origine (pondérations et ligne `VARIABLE` inchangées).
6. **Hors de la voûte.** La part qui tombe sur une pile va à la pile ; au-delà des naissances d'une voûte seule, au-delà de l'ouvrage ou sur un appui rigide, elle va au sol. Une bande qui dépasse la clé d'une voûte seule passe sur l'autre demi-voûte.

Sorties. La note donne, pour chaque chargement, le modèle, le nombre et la résultante des charges diffusées, la profondeur au centre des charges et la part transmise au sol, par exemple :

```
   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 %
```

Le fichier des efforts par voussoir (`_efforts.csv`) contient les charges diffusées.

Interface. Liste « Diffusion remblai » et angle (30° par défaut) dans le cadre de la page Résultats (voûte seule) ; « Diffusion dans le remblai » et angle dans l'onglet Ouvrage (`.VMA`). La ligne `DIFFUSION` d'un chargement se saisit dans le fichier ; l'interface la relit et

la réécrit.

9. Validation

La batterie `batteries/test_diffusion.py` fait 848 contrôles (six modèles de diffusion) ; elle passe sous Linux et sous Windows. Les autres batteries de VOUTE passent sans changement.

Contrôle	Résultat
`--diffusion aucune` et `--diffusion 0`, 36 fichiers	résultats identiques au calcul sans option
Voûte seule et ouvrage d'une arche, 33 fichiers `.DON` × 6 modèles	même coefficient à 10^{-5} près (un écart expliqué ci-dessous)
Résultante, 120 chargements	efforts verticaux reçus par les voussoirs + part au sol = résultante des charges diffusées, à 0,2 % près
Osserain, 6 modèles	étude indépendante en Python retrouvée à 0,4 % près ; part sur la culée de 3 à 15 %
Ligne `DIFFUSION`	celle de l'ouvrage équivaut à l'option ; celle d'un chargement l'emporte ; l'option l'emporte sur les deux ; variantes d'étude relues par l'interface ; syntaxes invalides refusées
Convoi (TROIS.VMA)	diffusion à chaque position ; coefficient jamais inférieur au calcul sans diffusion

Écart expliqué. GEO_NAT1 a une force répartie (non diffusée) qui dépasse l'extrados : elle va de 0 à 6 m, l'extrados finit à 5,4 m par un segment. La voûte seule applique le dépassement au dernier voussoir, comme la version 1993 ; l'ouvrage le transmet à la culée rigide. Sans diffusion le mécanisme n'y est pas sensible ; avec diffusion il l'est (0,5 %).

Deux défauts trouvés et corrigés pendant la mise au point : une bande à cheval sur la clé d'une voûte seule perdait sa partie située de l'autre côté (elle est maintenant coupée en deux) ; une charge de `.VMA` décrite de droite à gauche n'était pas diffusée.

10. Limites, précautions et recommandations

Limites du modèle.

- Seule la composante verticale de la surcharge diffusée est prise en compte ; les composantes horizontales, le frottement d'interface, la butée et la voûte de décharge (modèle complet d'Ahmad) ne le sont pas.
- Boussinesq suppose un massif homogène, élastique et continu sous l'extrados ; la voûte, plus raide, attire la charge vers les zones peu profondes. La traîne vers les reins est donc probablement trop forte sous un remblai épais.
- Le calcul est plan, par mètre de largeur : la diffusion transversale (largeur efficace) reste à traiter dans la saisie des charges.

Précautions d'emploi.

- La diffusion ne traverse que le remblai : pas les tympans maçonnés ni une dalle de répartition, qui ont leurs propres règles. Une charge appliquée sur un tympan doit être définie à la cote de l'extrados ou en dessous.
- Sous une faible hauteur (moins de 0,3 à 0,5 m), la chaussée et la raideur de la voûte dominent ; le gain y est faible et Boussinesq le surévalue.
- Quand la note indique une part importante transmise au sol (plus de 10 %), le gain dépend du modèle de la culée, tenue pour rigide : il doit être justifié à part.
- La diffusion peut abaisser légèrement le coefficient (TEST2) : toujours donner le résultat sans diffusion à côté.

Recommandations.

Modèle	Dans VOUTE	Usage recommandé
Aucune	Défaut	Enveloppe sévère, compatible avec la version 1993 et les notes existantes ; référence pour juger le gain
Boussinesq	Option courante	Modèle de la thèse d'Ahmad et de Choo et al. Prudent pour une charge large et peu profonde (Osserain) ; très favorable pour une charge étroite sous un remblai épais
Boussinesq tronqué 30°	Option courante	Contrôle de Boussinesq : il borne la traîne, comme RING. Proche de la pente 1 pour 2 pour une charge étroite, plus sévère pour une charge large
Tronqué à un autre angle	Étude spécifique	Sensibilité à l'angle de troncature

Modèle	Dans VOUTE	Usage recommandé
Pentes fixes (1 pour 2, 30°, 45°)	Étude spécifique	Comparaison avec les règles britanniques (BD 21, PD 6694-1) ; non justifiées par la recherche ; 45° souvent la plus optimiste, à éviter pour une évaluation

Conduite conseillée quand l'utilisateur choisit de diffuser :

1. Garder le calcul sans diffusion (défaut) comme référence.
2. Calculer avec Boussinesq et avec Boussinesq tronqué à 30°, et retenir de préférence **le plus faible des deux**. Sur la voûte type sous un essieu comme sur la charge d'essai d'Osserain, c'est le tronqué (1,35 contre 1,42 à Osserain).
3. Si le résultat retenu dépend d'une part au sol supérieure à 10 %, justifier la culée ou revenir au calcul sans diffusion.
4. Indiquer dans la note les résultats obtenus et le modèle retenu.

11. Questions ouvertes et suites

- **Calage sur l'essai d'Osserain.** La disposition des 360 t et l'état du remblai pendant l'essai sont-ils connus ? Ils permettraient de vérifier si l'essai départage Boussinesq et Boussinesq tronqué.
- **Mode TD.** Faut-il une valeur par défaut différente pour le mode TD, où le classeur Epure_Hinge charge la clé sans diffusion ?
- **Largeur transversale.** Faut-il calculer la largeur efficace transversale, qui réduit la charge par mètre, ou la laisser à la saisie ?
- **Modèle complet d'Ahmad.** Étape suivante possible, plus lourde : composantes horizontales de la surcharge diffusée, frottement d'interface, butée du remblai et K0, avec φ et l'angle d'interface comme données. Elle rapprocherait VOUTE du modèle de sol de RING.
- **Interface.** Dessiner la distribution diffusée sur l'extrados, à côté de la charge de surface.
- **Modèle par défaut.** Faut-il que VOUTE puisse calculer en une fois les trois variantes (aucune, Boussinesq, tronqué) et les résumer dans la note ? Le défaut reste sans diffusion (décision du 10/10/2026).

Sources

- S. H. S. Ahmad, Static Analysis of Masonry Arches, thèse, Université de Salford, 2017 : texte intégral lu (§ 4.1.13, § 4.1.14, chapitre 4) ; critique de la règle 1 pour 2, Boussinesq, pressions connues et inconnues, description de RING, essais.
- Choo et al. (1991), Harvey, Callaway et al. (2011), Gilbert et al. (2010) : cités d'après la thèse d'Ahmad, non consultés directement.
- SETRA, Ponts en maçonnerie — guide pour l'utilisation du programme VOUTE (1982) : rôle répartiteur du remplissage, gain de 10 % pour 0,30 m à la clé.
- Midas, Live load dispersion on buried structures around the world : EN 1991-2 4.3.6, PD 6694-1, IRC 112.
- LimitState, modélisation du remplissage dans RING : modèles de sol et de contrefort.
- AFGC, restitution DOLMEN — Osserain (G. Viossanges, janvier 2026) : phases d'essai, chargement porté à 360 t sans rupture.
- STRAINS / INSA Rennes, calcul du pont d'Osserain (23/10/2023), dossier DOLMEN : absence de diffusion, jugée très conservatrice.
- Calculs VOUTE : `batteries/diffusion/OSS_VAR.VMA`, voûte type (portée 10 m), fichiers de test, `batteries/test_diffusion.py`.