CETE Méditerranée

Club Ouvrages d'Art du 5 février 2009 à Berre l'Etang

Ouvrages en maçonnerie :

investigations préalables et recalculs

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Développement durable
Prévention des risques
Infrastructures, transports et mer

Présent pour l'avenir

Sommaire

1- Historique et documents de référence

2- Problématique des ouvrages en maçonnerie

3- Principe du calcul à rupture - Logiciel VOUTE

4-Exemple 1 : OA28 V4 - portance sous convois ITER

5- Exemple 2 : Voûtes de la Major sous chantier

1 Historique

Les premiers calculs de stabilité remontent au XVIIIème siècle. Avant, référence aux ponts déjà construits.

Deux écoles principales:

Calcul statique par bloc ou calcul à la rupture (Coulomb, Mery, Salençon ,Delbecq)

Calcul prenant en compte la déformabilité des matériaux (Navier)

Mery (1840) caractérise les lignes de poussées extrémales en spécifiant que la courbe de pression ne doit pas s'approcher trop de l'extrados ni de l'intrados de la voûte. La méthode de calcul du programme voûte établie par J.M. Delbecq dérive de celle de Méry.

1 Les documents de référence

Les ponts en maçonnerie constitution et stabilité de juin 1982 du SETRA

- Historique et constitution
- évaluation de la stabilité
- Guide pour l'utilisation du programme voûte
  - Notice du programme voûte
  - Analyse de la stabilité des voûtes en maçonnerie et en béton non armé par le calcul à la rupture (J.M. Delbecq)
  - Grandes voûtes P.Séjourné (ICPC) 1913
- Tome 5
- Tome 6

2 La problématique des ouvrages en maçonneries

- voûte = maçonneries de blocs => : matériau hétérogènes sans résistance à la traction

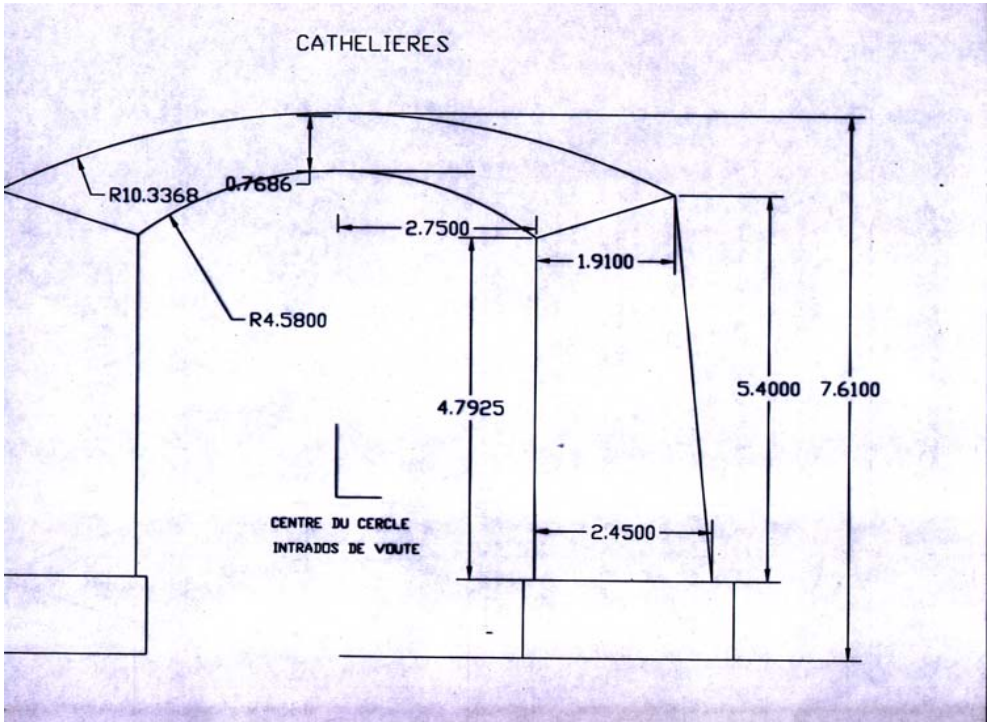
=> calcul élastique avec programme à barres ou éléments finis impossible

Les données fondamentales

- Etat de l'ouvrage (et notamment des joints)
- Connaissance de sa géométrie
- Caractéristiques des matériaux
- Caractéristiques mécaniques du sol de fondation

2 Les investigations préalables

- Inspection détaillée
- Levé topométrique
- Carottage: épaisseur du corps de voûte et des matériaux de remplissage
- Essais d'identification des matériaux, résistance à la compression
- Essais pressiométriques: caractéristiques mécaniques du sol de fondation



Une réelle difficulté : la connaissance de la géométrie des piédroits, et plus encore des semelles de fondations

3 Hypothèses du calcul voûte

- **Le calcul à la rupture permet de montrer que si le chargement est à l'extérieur du domaine « potentiellement supportable », la voûte est certainement instable. Il ne permet pas de conclure, inversement, que si le chargement est à l'intérieur du domaine, la voûte est stable.**

- **3 critères de résistance:**

– **Absence de résistance à la traction**

– **Résistance finie à la compression simple so**

– **Critère d'interface pierre mortier de type frottement sec de Coulomb (angle de frottement de 27°, tangente de 0.5), sans cohésion. (Ce calcul n'est pas fait par voûte.)**

3 Hypothèses du calcul voûte

- La voûte est définie par un extrados et un intrados. Elle est bi-encastrée.

  Transversalement, le programme considère une largeur unitaire.

  La voûte est découpée en voussoirs par des joints fictifs (le joint de clef est vertical).

  La voûte est constituée d'un matériau de résistance homogène.

  La voûte est soumise à son poids et à des charges appliquées sur l'extrados. (Pas de déplacement ni d'effet de température)

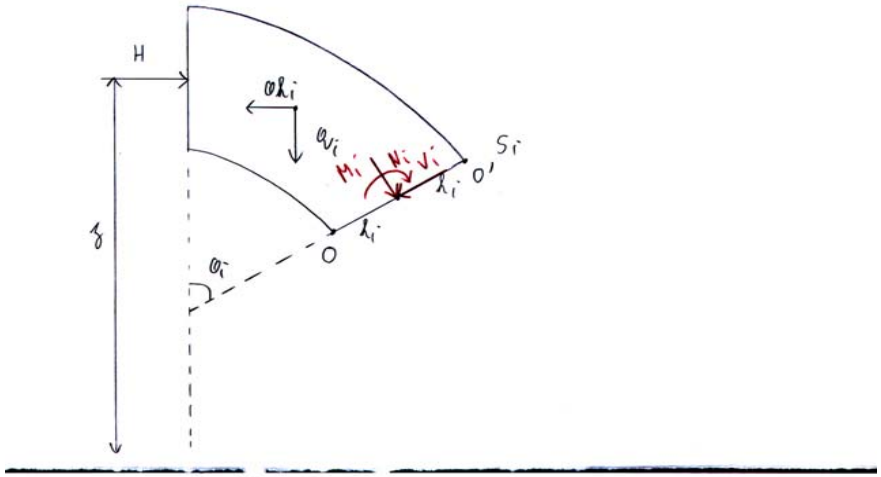
3 Principes de calculs

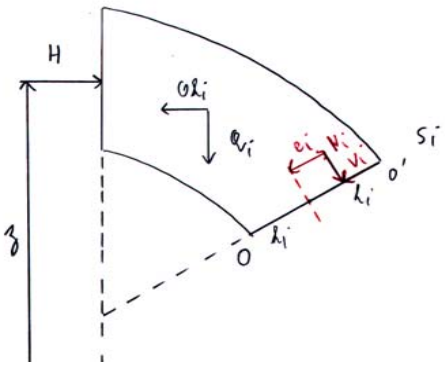
- **Le principe consiste à étudier l'équilibre des blocs définis entre joints.**

Sur chaque joint, on détermine un torseur M,N,V par rapport au milieu de chaque joint, qui assure l'équilibre du bloc et respecte le critère de résistance. Si la voûte est stable, ce torseur se trouve à l'intérieur d'un domaine convexe qui impose d'une part que l'effort normal soit positif, d'autre part que le point de passage de la résultante soit à l'intérieur du joint. => lignes des centres de pression

Le coefficient de rupture correspond au rapport entre la charge extrême pour lequel la voûte devient très certainement instable et le chargement réel. Ce coefficient doit être supérieur à 3 sous l'effet des charges pondérées à l'E.L.U.

3 Principes de calculs





3 Détails de calculs

- **Chaque ligne de pression est caractérisée par:**

– **La poussée horizontale H à la clef,**

– **La poussée verticale V à la clef,**

– **La cote z du point de passage de la ligne de pression à la clef**

1) Stabilité en traction

– **La résultante des efforts sur le joint doit être une compression**

– **La résultante des efforts doit passer entre la ligne d'intrados et la ligne d'extrados On détermine Hmin(z,i) et Hmax(z,i)**

=> Domaine de stabilité en traction T :

$$\max_i(H_{min}(i,z)) < H < \min_i(H_{max}(i,z))$$

Et zi < z < ze

3 Détails de calculs

- **2) Critère de compression**

– **Pour chaque ligne de pression, on connaît sur chaque joint Si : Ni, Mi,Vi => le programme calcule le taux de compression f(i,z,H)**

– **Puis F(z,H)= $\max_i$(f(i,z,h)**

– **Par construction de T, F est infini sur la frontière. A l'intérieur, il existe un point correspondant au minimum de F(z,H)**

=> ce minimum caractérise la ligne de pression optimale pour laquelle la voûte est stable en traction et le taux de compression est le plus faible possible.

3) Effort tranchant

Sur chaque joint Si, il faut vérifier que Vi < Ni x tg(F)

(le programme ne le fait pas)

3 Résultats

- **Le programme voûte:**

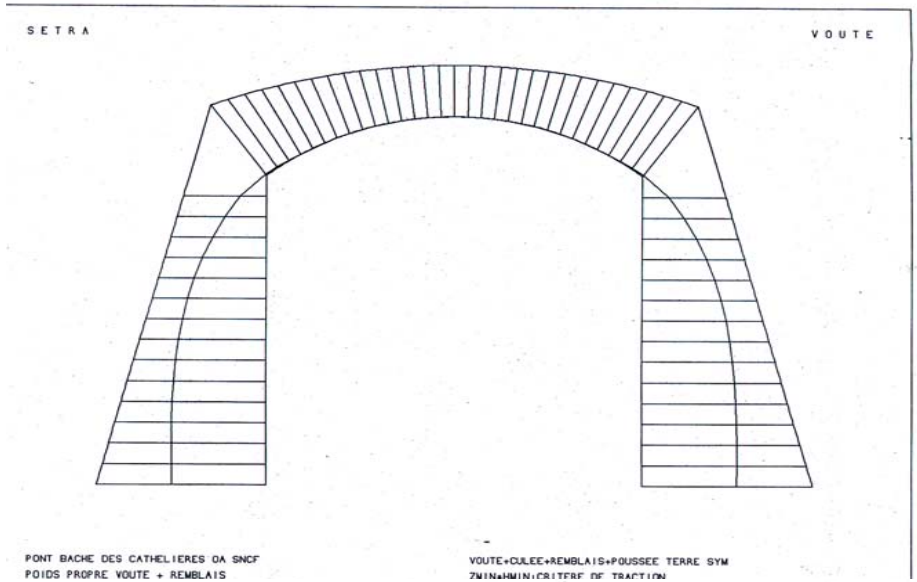
– **Fournit les lignes de pressions caractérisant le domaine de stabilité**

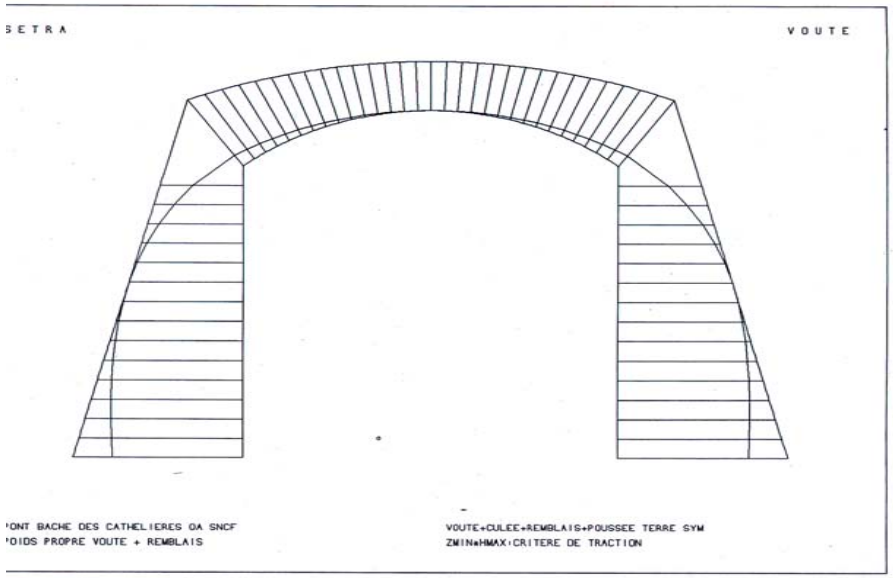
– **Fournit la ligne de pression optimale avec le coefficient de rupture admissible**

– **Fournit les réactions d'appuis (résultante des efforts sur le dernier joint)**

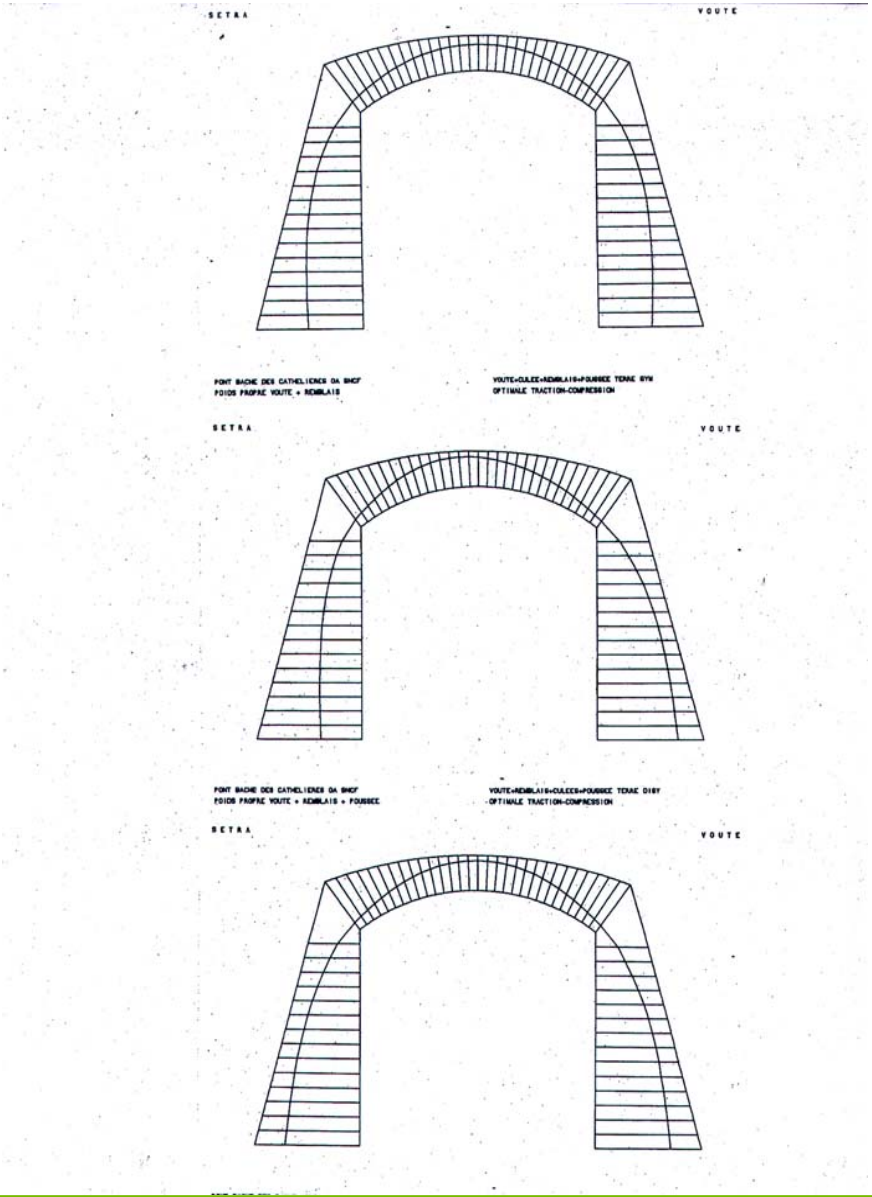
– **N'effectue pas la vérification d'effort tranchant**

3 Exemples de lignes de pression





3 Exemples de lignes de pression



4- Exemple : OA28 V4 sous ITER

Contexte :

- ✔ Diagnostic ouvrage OA28 sous convois ITER
- ✔ Ouvrage voûté en béton non armé

- ✔ Prise en compte des efforts horizontaux dus aux convois (efforts de motricité)
- ✔ Prise en compte des résultats d'investigations sur ouvrages

  - géométrie (épaisseur et hauteur des piédroits, ...)
  - caractéristiques matériaux
  - etc...

4- Exemple : OA28 V4 sous ITER

Contexte (suite) :

- données géométriques et matériaux issues de plusieurs investigations :

✔ **Investigation du LERM :**

- carottages (épaisseur clé, piédroits, etc...)
- mesures de résistance mécanique à la compression du béton
- investigations radar (géométrie générale de la voûte, épaisseur clé par rapport à la surface de la chaussée, ...)

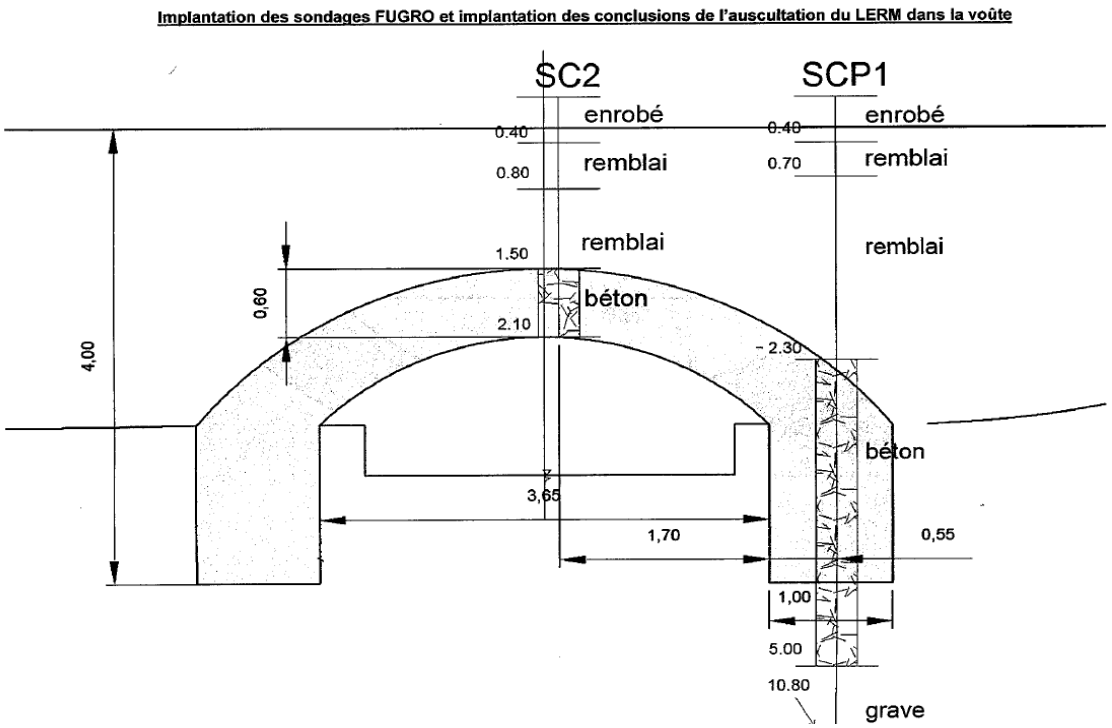
✔ **Investigation FUGRO :**

- sondages carottés depuis la surface de la chaussée
à travers la clé de voute :
-> épaisseur remblais, épaisseur de la voûte à la clé
au niveau d'un piédroit :
-> géométrie voûte, base fondations

4- Exemple : OA28 V4 sous ITER

Contexte (suite) :

- > hypothèses initiales sur la géométrie ouvrage pour les recalculs GETEC puis EGIS



Nombreuses incertitudes lors du contrôle des études en ce qui concerne les données prises en compte :

hauteur des piédroits, épaisseurs, hauteur des remblais, ...

4- Exemple : OA28 V4 sous ITER

Recalcul :

Recalcul CETE (avec géométrie corrigée) :

- ✔ hauteur de piédroit prolongée de -4,27m à -5,00m sous chaussée
- ✔ remblais porté de 1,20m à 1,50m et nouvelle diffusion charges convois

Sans efforts horizontaux

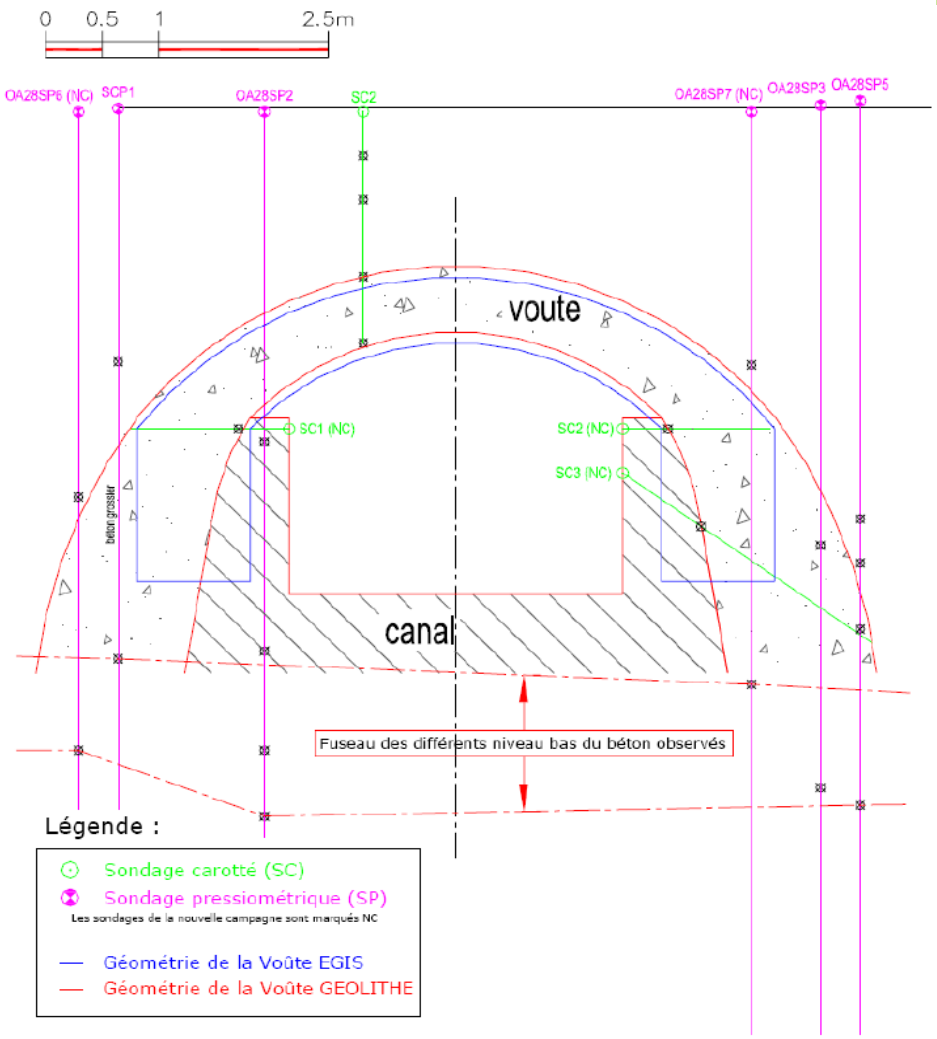
	Géométrie GETEC / EGIS			Géométrie corrigée CETE		
convois défavorable :	MAMMOET 530t symétrique Qextrados = 31,11 kN/m² ; inclin. = 0°			MAMMOET 530t symétrique Qextrados = 28,56 kN/m² ; inclin. = 0°		
coeff. rupture :	coeff de poussée :					
résist. béton :	k = 0,00	k = 0,25	k = 0,33	k = 0,00	k = 0,25	k = 0,33
17,0 Mpa	3,765	4,817	5,152	1,510	3,400	4,157
28,9 Mpa	3,939	5,054	5,294	1,600	3,600	4,384
50,0 Mpa	4,060	5,294	...	1,643	3,700	...

Avec efforts horizontaux

convois défavorable :	NICOLAS 530t dissymétrique Qextrados = 24,80 kN/m² ; inclin. = 14,45°			NICOLAS 530t dissymétrique Qextrados = 23,06 kN/m² ; inclin. = 14,45°		
coeff. rupture :	coeff de poussée :					
résist. béton :	k = 0,00	k = 0,25	k = 0,33	k = 0,00	k = 0,25	k = 0,33
17,0 Mpa	3,544	4,883	5,309	1,267	3,519	4,395
28,9 Mpa	3,652	5,035	5,472	1,326	3,666	4,544
50,0 Mpa	...	...	...	...	...	...

4- Exemple : OA28 V4 sous ITER

Recalcul (suite) :

Nouvelles investigations conseillées

- ✔ Nouvelles investigations GEOLITHE (déc. 2008) :
  - sondage carotté depuis la chaussée au niveau de la clé de voûte
  - sondages horizontaux dans les piédroits
  - sondages obliques plongeant en base de piédroit afin de lever l'incertitude sur la hauteur minimale des piédroits