



HAL
open science

**Instabilité non linéaire de grands réservoirs sous séisme.
De l'approche réglementaire vers le transitoire couplé
fluide-structure**

Nicolas Greffet

► **To cite this version:**

Nicolas Greffet. Instabilité non linéaire de grands réservoirs sous séisme. De l'approche réglementaire vers le transitoire couplé fluide-structure. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01814812

HAL Id: hal-01814812

<https://hal.science/hal-01814812>

Submitted on 13 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

Public Domain

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Instabilité non linéaire de grands réservoirs sous séisme

De l'approche réglementaire vers le transitoire couplé fluide-structure

Nicolas Greffet

*EDF, Direction Recherche & Développement
Département Analyses Mécaniques et Acoustique
Groupe Modélisation en Analyse Dynamique des Structures (AMA/T62)
1, avenue du Général de Gaulle F-92141 Clamart Cedex
01 47 65 40 66
nicolas.greffet@edf.fr*

RÉSUMÉ. Dans le cadre de la réévaluation sismique d'installations industrielles, il est nécessaire de mieux maîtriser, par le calcul, les marges de sécurité pour des séismes réglementaires de niveau majoré. L'objectif principal de cette étude est de qualifier une méthodologie de simulation sismique de réservoirs métalliques de grande taille, afin d'assurer la tenue pour un séisme réévalué.

Le problème se caractérise par de fortes non linéarités géométriques et comportementales, pouvant aboutir à une instabilité par flambage du réservoir. Différentes modélisations sont évaluées et nos résultats sont comparés à des études numériques extérieures et des données d'essais sur maquette de virole.

Enfin, l'approche réglementaire est confrontée à un calcul transitoire avec couplage fluide-structure et surface libre.

ABSTRACT. In order to demonstrate mechanical integrity of industrial buildings and equipments against increased seismic levels, we have to develop new numerical methods for an accurate computation of margins. Classical codes and regulations based methods are often too conservative and inappropriate: only new methods can accept all kinds of physically justified non linearities.

This paper presents a new qualified method for the numerical simulation of large metallic tanks under increased seismic loads. This problem deals with strong non linearities (geometric and elastoplastic effects) leading eventually to buckling instabilities.

We propose different approaches, ranging from push-over quasistatic based methods to non linear transient calculations, with fully coupled fluid-structure interaction.

MOTS-CLÉS : instabilité, interaction fluide-structure, séisme.

KEYWORDS: instability, fluid-structure interaction, earthquake.

1. Contexte, objectif et présentation de la structure étudiée

Dans le cadre de la réévaluation sismique d'installations industrielles, il est nécessaire de mieux maîtriser, par le calcul, les marges de sécurité pour des séismes réglementaires de niveau majoré.

Concernant les grands réservoirs métalliques d'eau, deux modes de ruine sont identifiés (par approche réglementaire : Eurocode 8 EN1998-4 ou par approche numérique) : instabilité de type flambage de la paroi mince ou rupture des ancrages.

L'objectif de ce travail, mené par la Division R&D d'EDF, est de développer et qualifier de nouvelles méthodologies de simulation numérique pour les baches sous séisme, pour identifier les conservatismes des méthodes réglementaires et vérifier leur domaine d'application. Plusieurs références récentes soulignent en effet que les méthodes réglementaires ne sont pas toujours adaptées à des réservoirs (Kyung *et al.*, 2004). Nous proposons donc une deuxième approche, transitoire non-linéaire.

Le composant dont nous allons étudier la tenue au séisme fait partie de la classe des réservoirs métalliques atmosphériques de grande taille, pour le stockage d'eau :

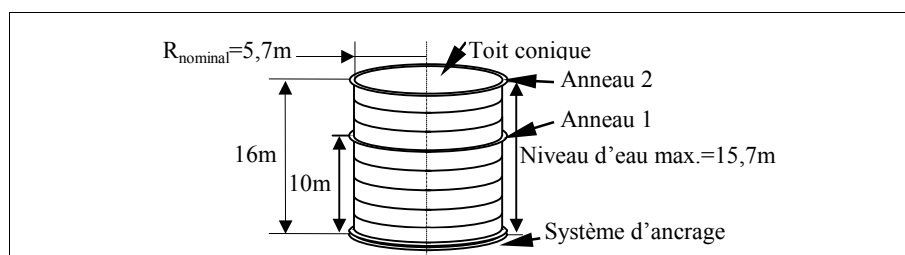


Figure 1. Géométrie d'une bache PTR

La bache est composée de viroles soudées, d'épaisseur variable, allant de 4 à 7 mm, et renforcée par deux anneaux. Le système d'ancrage se fait par assemblages boulonnés. Différentes lois élastoplastiques (écrouissage isotrope) sont prises en compte, traduisant la dispersion des caractéristiques (dépendance à l'épaisseur).

2. Approche réglementaire (Housner, 1963), (Veletsos, 1984), (Eurocode 8)

Nous proposons une approche quasistatique, en éléments finis avec le *Code_Aster*, basée sur la définition réglementaire du chargement de type push-over.

Le fluide est remplacé par un chargement imposé à la paroi (Wunderlich *et al.*, 2000). Le chargement sismique transitoire est modélisé de manière quasistatique monotone croissante : on néglige l'aspect cyclique réel. L'approche réglementaire

aboutit à la définition d'une superposition de plusieurs champs de pression spatialement variables imposés sur la paroi (termes convectifs et inertiels).

Pour commencer, nous ne tenons pas compte du décollement possible au niveau du fond, lors du calcul. La base est considérée comme étant complètement encastrée.

Etant donné le caractère monotone croissant du chargement, le comportement de l'acier constitutif des viroles peut être approché par une loi du type élastoplastique à écrouissage isotrope non-linéaire (calé sur des courbes de traction expérimentales).

2.1 Modèle éléments finis de référence

La structure étant d'une grande finesse, on choisit une discrétisation de type coques minces (une validation par comparaison avec des calculs en éléments massifs 3D a été faite). Par symétrie du problème, nous ne maillons qu'un demi réservoir.

Le logiciel *Code_Aster* dispose d'éléments de coques, soit à faces planes (DKT, DST, Q4γ...), soit dits « volumiques » (nommés *COQUE_3D*). De par leur richesse cinématique et leur capacité à produire des contraintes plus précises, on choisit ces derniers. Le maillage structuré comporte 110000 ddl.

2.2 Méthodologie de résolution du problème (Greffet, 2003)

Une analyse modale et une étude de flambage élastique d'Euler permettent de valider la discrétisation spatiale et les valeurs de coefficients multiplicateurs du chargement. Les résultats sont comparés à ceux de l'INSA de Lyon (ABAQUS). L'écart sur la charge critique du premier mode de flambage est de l'ordre d'1%.

Ensuite, nous introduisons le comportement élastoplastique, afin de calculer l'évolution quasistatique complète de la bache, au cours d'un calcul en grands déplacements (Green-Lagrange). Nous utilisons un algorithme incrémental par résidu en équilibre avec pilotage en effort. Les non linéarités matériaux sont traitées par méthode de type Newton, avec prédiction par la matrice tangente et correction par vérification de la loi d'écoulement. On choisit de réactualiser la matrice tangente à chaque pas et à chaque itération. Si le problème devient instable, (matrice tangente devenant singulière), la résolution avec pilotage en effort converge difficilement. On a donc ainsi un moyen simple de détection de l'instabilité : l'augmentation importante du nombre d'itérations à convergence pour le pas en cours. Pour accélérer la convergence ou calculer le post-critique, il faudrait alors faire appel à une technique de pilotage adaptée (longueur d'arc). Le solveur direct employé est de type multifrontal avec renumérotation par dissection emboîtée (bibliothèques METIS).

En suite, on évalue une technologie de renfort, par collage sur certaines viroles de couches de TFC (Tissu de Fibre de Carbone [0,90] : procédé Freyssinet).

La plasticité du TFC n'est pas modélisée : on n'atteint jamais la limite élastique.

On présente ici des calculs avec ou sans défaut géométrique initial (construit d'après l'allure du mode d'Euler), et avec ou sans renfort. La relation de comportement pour les viroles est soit une loi élastoplastique minimale (pénalisante) RCC-M, soit une loi moyenne expérimentale, le TFC étant élastique orthotrope :

| | | EDF | INSA |
|---------------------------------|---|----------|----------|
| Avec défaut/Sans renfort | Charge critique élastoplastique (loi moyenne) | 1,00*SDD | 1,03*SDD |
| Sans défaut/Sans renfort | Charge critique élastoplastique (loi moyenne) | 1,15*SDD | 1,17*SDD |
| Sans défaut/Sans renfort | Charge crit. élastoplast. (loi mini. RCC-M) | 0,61*SDD | 0,62*SDD |
| Sans défaut/Avec renfort | Charge crit. élastoplast. (loi mini. RCC-M) | 1,10*SDD | 1,20*SDD |

La plasticité fait globalement diminuer d'un facteur 2 à 3 la charge ultime supportée par la bache, comparée au résultat de l'approche élastique d'Euler. Enfin, l'écart avec des résultats (code ABAQUS) de l'INSA de Lyon est toujours faible, ce qui valide notre méthodologie non linéaire.

2.3 Validation complémentaire : simulation d'essais Freyssinet

Des résultats d'essais sur maquette de virole au 1/5^{ème}, associés à d'autres simulations numériques, permettent de compléter la validation de notre approche.

Le chargement, extrapolé du chargement réglementaire, est la superposition d'une pression interne induite par le fluide pressurisé dans la virole, d'un effort de tirage et d'un moment exercés sur le capot au moyen de vérins. La modélisation et les paramètres matériaux sont tirés de travaux réalisés par Freyssinet (calculs ABAQUS). On présente ici des résultats pour différents défauts géométriques initiaux et différentes modélisations des ancrages (avec ou sans soulèvement) :

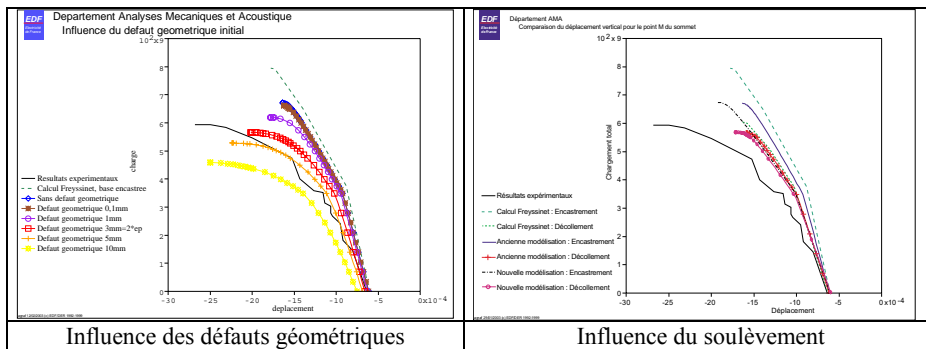


Figure 2. Charge totale (kN.m), en fonction du déplacement vertical du capot

3. Analyse transitoire avec interaction fluide-structure

Le domaine fluide est modélisé en acoustique linéaire (barotrope, compressible, non visqueux et avec surface libre). Le problème couplé fluide-structure est résolu dans le *Code_Aster* par une formulation symétrique (u,p,ϕ) (Morand *et al.*, 1992), en écriture lagrangienne réactualisée. Le chargement est du type accélérogramme imposé en base de bête (l'accélération maximale vaut 1,1 g). La paroi reste élastoplastique.

Le calcul transitoire est mené, sur base physique, par intégration directe en temps avec un schéma implicite, de Newmark, d'accélération moyenne modifiée, introduisant un amortissement numérique des hautes fréquences.

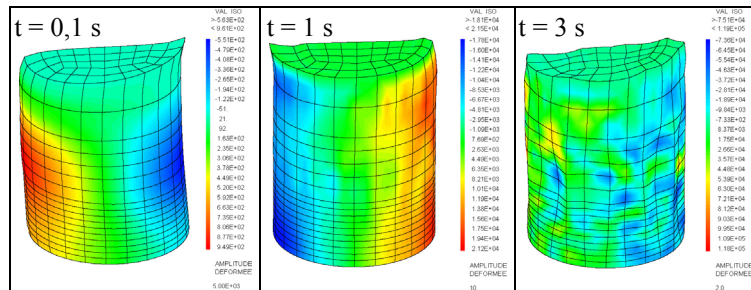


Figure 3. Isovaleurs de pression pariétale (hors pression hydrostatique) sur déformée amplifiée du domaine fluide

Pour $t > 0,5 \text{ s}$ (l'accélération maximale imposée dépasse 0,6 g), on voit que les méthodes de type push-over, reposant sur une invariance de l'allure du champ de pression sont rendues inadaptées, à cause des non-linéarités qui s'amplifient et des réflexions d'ondes multiples qui perturbent la solution linéaire initiale.

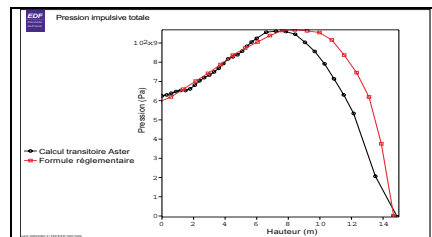


Figure 4. Comparaison de la pression (hors terme hydrostatique) le long d'une génératrice ($t = 0,2 \text{ s}$)

Quand la réponse reste linéaire, donc pour le début de l'accélérogramme, on retrouve assez bien l'allure de la pression impulsive réglementaire.

4. Conclusion et perspectives

La méthodologie, mise au point par EDF/R&D (Greffet, 2003), de simulation numérique de la réponse non-linéaire sismique de réservoirs métalliques atmosphériques de grande taille, sous sollicitation de type réglementaire (push-over) a pu être qualifiée par comparaison avec les travaux numériques de l'INSA de Lyon, pour la bêche PTR, et les essais sur virole et leur modélisation numérique par Freyssinet. L'objectif de simulation fine, avec analyse du soulèvement, des effets d'un chargement de type réglementaire (EC8) par calcul élastoplastique en grands déplacements a permis d'évaluer les marges, et aussi de dimensionner des méthodes de renfort, vis-à-vis d'un niveau sismique réévalué.

Un critère de stabilité pour les régimes non-linéaires, basé sur l'analyse de l'opérateur tangent actualisé de résolution, a été développé dans le code.

Des premiers résultats par approche transitoire couplée fluide-structure ont été obtenus et vont permettre de définir les limites du domaine d'application des approches réglementaires, quand les non-linéarités deviennent importantes.

5. Bibliographie

- Greffet N., « Etude prototype de réservoirs métalliques au séisme - Analyse de stabilité non linéaire », *Actes du VI^e Colloque national AFPS*, 1-3 juillet 2003, vol. II, p. 225-232.
- Housner G.W., « The Dynamic Behavior of Water Tanks », *Bulletin of Seismological Society of America*, vol. 53(2), 1963, p. 381-387.
- Cho K.H., Kim M.K., Lim Y.M., Cho S.Y., « Seismic response of base-isolated liquid storage tanks considering fluid-structure-soil interaction in time domain », *Soil Dynamics and Earthquake Engrg.*, vol. 24, issue 11, 2004, p. 839-852.
- Morand H.J.-P., Ohayon R., *Interactions fluides-structures*, Paris, Editions Masson, 1992.
- RCC-M, *Règles de Conception et de Construction des Matériels Mécaniques des îlots nucléaires REP*, AFCEN, 1993.
- Veletsos A.S., « Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks, in Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems », *ASCE*, 1984, p. 255-370 443-460.
- Wunderlich W., Seiler C., « Nonlinear treatment of liquid-filled storage tanks under earthquake excitation by a quasistatic approach », *Computer & Structures*, vol. 78, 2000, p. 385-395.
- Documentation de référence de Code_Aster : www.code-aster.org, EDF/R&D