

Editorial

Pour GeoMod, l'année 2006 aura été placée sous le signe de la dynamique. Dans un premier temps, l'engagement d'un nouveau collaborateur, Aïssa Mellal (voir encadré au dos), nous a permis de renforcer les compétences de notre société dans ce domaine. De plus, l'utilisation de **Z_Soil 2007 β** , incluant l'analyse dynamique des structures, ainsi que le recours à d'autres logiciels (SeismoStruct) a étoffé les capacités de calcul et de modélisation de notre équipe.

Ainsi, à côté des mandats de contrôle et d'expertise de structures « habituels » - dont trois exemples sont présentés dans ce numéro, la vérification au séisme de deux ponts autoroutiers et d'un barrage poids-voûte nous ont été confiées en 2006.

Une nouvelle méthode d'analyse au séisme

La conception, le dimensionnement et la vérification des ouvrages au séisme a largement évolué au cours des dernières décennies. A une approche simplifiée, linéaire, basée sur la méthode des forces de remplacement, ont succédé des méthodes plus modernes qui prennent en compte de manière explicite le comportement élasto-plastique des structures. L'analyse dynamique complète dans le temps - universellement reconnue comme étant celle reproduisant au mieux le comportement d'un ouvrage sous sollicitation sismique - peut enfin être appliquée avec succès sur des maillages de grande envergure, en raison de l'évolution de la performance des logiciels de calcul par éléments finis, mais aussi de celle des machines sur lesquelles ils fonctionnent. Toutefois, elle reste délicate à mettre en œuvre, puisqu'elle dépend fortement d'un input sismique cohérent (série d'accélérogrammes), d'un choix correct de conditions aux limites et de lois constitutives adaptées en cas de présence de sols non saturés.

Une alternative intéressante est d'utiliser une méthode pseudo-statique, basée sur les déformations, usuellement appelée push-over. Cette approche, recommandée par les EuroCodes 8 et depuis 2004 au niveau helvétique par la SIA (« Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants », CT

2018), l'OFROU et l'OFEV, consiste à comparer la capacité de déformation propre de la structure avec un « déplacement cible » issu du push-over. Ce déplacement cible correspond d'ailleurs au déplacement maximal prédit sur la structure au cours d'un tremblement de terre d'intensité donnée, dépendant de la classe de l'ouvrage, de son sol de fondation et de son emplacement. L'avantage par rapport à la méthode basée sur les forces de remplacement réside dans la prise en compte explicite de la nonlinéarité des matériaux, et par conséquent la mobilisation des réserves cachées dans le coefficient de comportement q présent dans le calcul des forces de remplacement.

Cette méthode est particulièrement recommandée pour les ouvrages existants, ce d'autant plus que les nouvelles normes considèrent des intensités de séisme plus fortes suivant les zones. Ainsi, par exemple, un ouvrage dimensionné dans les années 1970 sur la base de la méthode des forces de remplacement pourrait ne plus être conforme avec les nouvelles normes. Dans ce cas le recours à la méthode basée sur les déformations est conseillé afin de mobiliser les réserves cachées pour la vérification de l'ouvrage, et éventuellement éviter le recours à des mesures d'assainissement coûteuses, comme le montre l'exemple de calcul d'un viaduc autoroutier décrit ci-dessous.



Analyse au séisme d'un viaduc à l'aide de la méthode basée sur les déformations

En collaboration avec GUMA

L'ouvrage à vérifier selon les normes en vigueur est un viaduc autoroutier de 512 m de long, dont les 5 piles mesurent entre 7 et 57 m de hauteur (Figures 1 et 2).

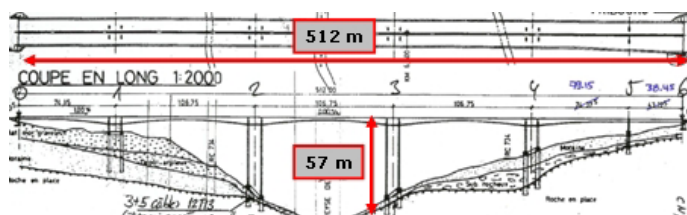


Figure 1. Coupe en long du viaduc autoroutier



Figure 2. Vue du viaduc autoroutier

Une première étude effectuée en 2004 (voir GeoMod Technical News n° 1) par la méthode des forces de remplacement faisait état de problèmes de sécurité au niveau de la résistance à l'effort tranchant de la pile la plus courte. Il a donc été décidé de recourir à la méthode basée sur les déformations afin de recalculer l'ouvrage.

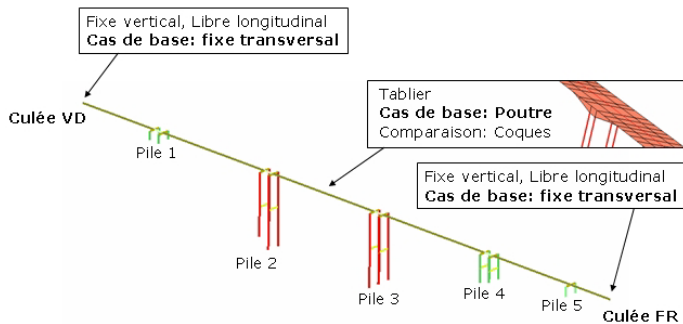


Figure 3. Modèle

Le modèle utilisé est illustré en Figure 3. Les piles du pont sont modélisées par des éléments de poutre non-linéaire, en introduisant les caractéristiques du béton et du ferrailage longitudinal selon les plans d'exécution de l'ouvrage. Le tablier est quant à lui introduit au moyen d'une poutre linéaire, d'aire et d'inertie équivalente au caisson moyen.

Les conditions d'appui du pont font l'objet d'une étude paramétrique particulière, où deux configurations sont comparées : (A) l'une en encastrant la pile à la hauteur du sommet du puits de fondation, et (B) l'autre – plus souple – en considérant le puits de fondation comme faisant partie intégrante du modèle, jusqu'à la roche en place (Figure 4).

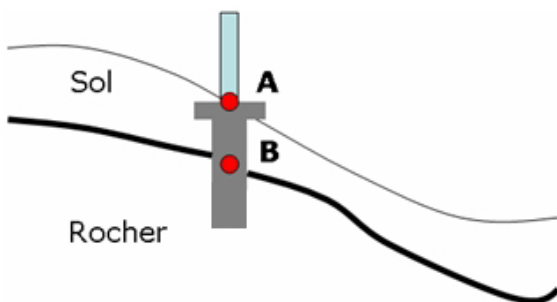


Figure 4. Niveau d'encastrement des deux modèles

Au niveau des culées, le pont est fixé verticalement et libre longitudinalement. Transversalement, deux hypothèses ont été considérées : appui fixe (cas de base) et déplacement libre.

La méthode de vérification basée sur les déformations revient à comparer l'action du séisme (soit le déplacement cible) avec la capacité de déformation de la structure.

Le déplacement cible est issu de l'analyse « push-over » (PO) en procédant de la manière suivante : on impose, dans chaque direction principale de l'ouvrage (transversale et longitudinale), deux distributions de forces proportionnelles à la masse du viaduc (l'une uniforme, l'autre modale). Les forces horizontales sont augmentées progressivement, et en traçant l'évolution de l'effort tranchant dans la direction considérée en fonction du déplacement maximal du tablier sur un système équivalent à 1 degré de liberté, on obtient une courbe appelée spectre de capacité (en rouge sur la Figure 5).

On cherche ensuite une correspondance entre ce spectre de capacité et un spectre de demande – spectre accélération-déplacement directement issu du spectre de réponse élastique (SIA 261) – pour obtenir le déplacement cible recherché (w_t).

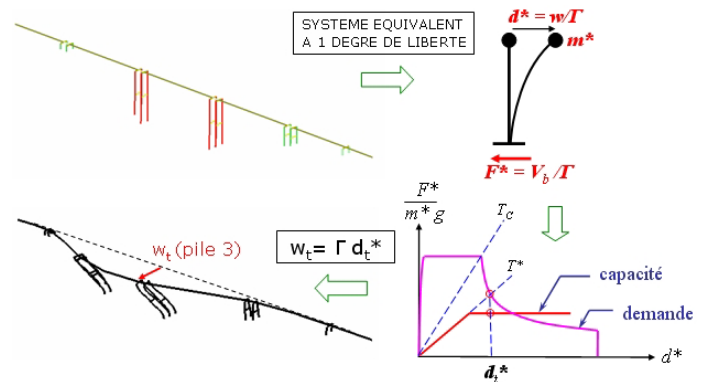


Figure 5. Obtention du déplacement cible

La capacité de déformation de chaque élément structural à vérifier est issue d'un calcul de résistance de la section (diagramme moment-courbure), et peut être bornée par la résistance de la section à l'effort tranchant. Le calcul du facteur de conformité α_{eff} est alors possible (Figure 6).

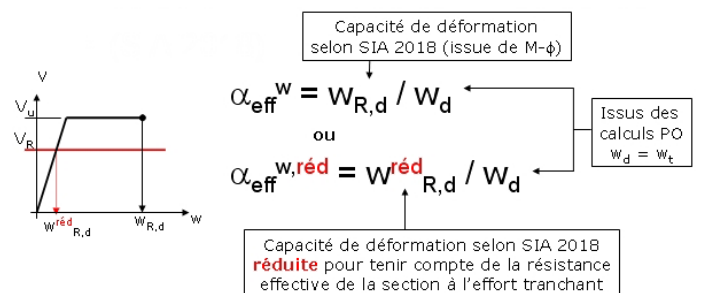


Figure 6. Calcul du facteur de conformité

Les Figures 7 et 8 illustrent ce facteur de conformité α_{eff} pour le séisme déterminant (ici longitudinal) sur les 5 piles, selon les deux systèmes d'appuis considérés.

Le gain de sécurité dû à l'utilisation de la méthode basée sur les déformations y est mis en évidence, même s'il ne permet pas d'exclure tout risque de rupture non ductile à l'effort tranchant dans la pile 1.

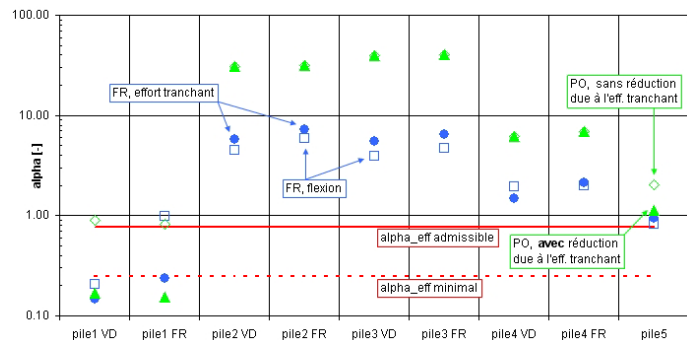


Figure 7. Facteurs de conformité pour le niveau d'encast. A. En bleu, forces de remplacement, en vert « push-over »

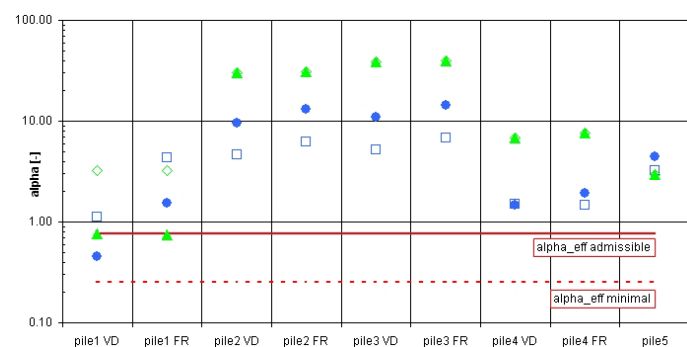


Figure 8. Facteurs de conformité pour le niveau d'encast. B. En bleu, forces de remplacement, en vert « push-over »

Calcul des déformations d'une conduite sous une bande d'arrêt d'urgence autoroutière

En collaboration avec nibuXS, Ecublens

Le but de ce mandat est de reproduire par modélisation des essais de chargement sur une bande d'arrêt d'urgence autoroutière, au sein de laquelle des conduites en PE ont été enterrées (Figure 9), puis de prédire le comportement du système en fonction de la température de l'enrobé bitumineux.

Les bassins de déflexion montrent que deux situations doivent être envisagées pour la modélisation, selon que le béton de remplissage est plus ou moins bien collé avec le revêtement déjà en place. Il s'agit alors de définir deux conditions d'interface entre le béton et le revêtement bitumineux.

Dans un premier temps, le modèle tridimensionnel a été validé sur les bassins de déflexion obtenus lors de l'essai de chargement effectué en hiver (Figure 10, courbes en noir (mesure) et en bleu (modèle)).

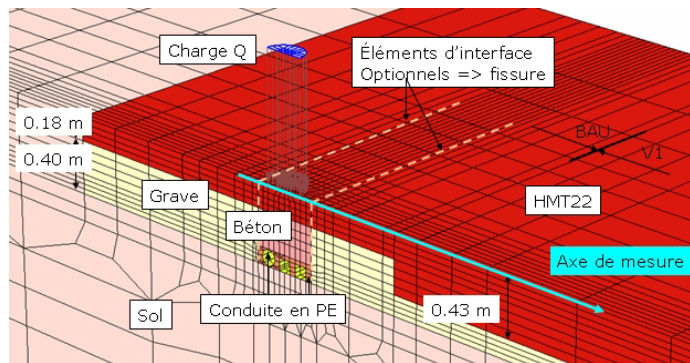


Figure 9. Maillage 3D.

Les bassins de déflexion ainsi que l'ovalisation, les contraintes et les déformations dans le voisinage des conduites en PE ont été ensuite fournis pour une température plus élevée de l'enrobé (Figure 10, courbe rouge, prédiction du comportement du système en été).

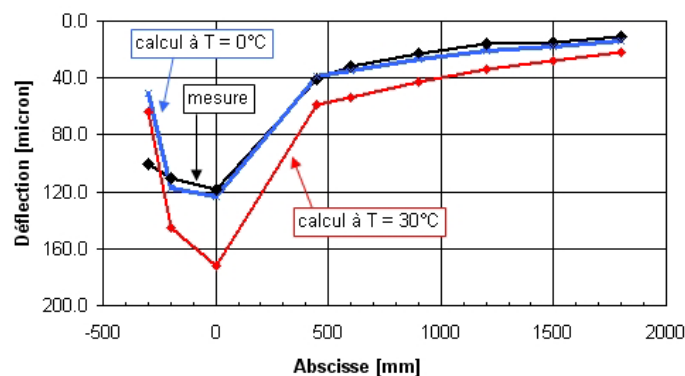


Figure 10. Tassements prédits et mesurés transversalement

Elargissement d'un tunnel existant

En collaboration avec Emch+Berger Lausanne et Karakas&Français, Lausanne

Dans le cadre du projet de construction d'un métro souterrain urbain, la modélisation de l'élargissement d'un tunnel existant entre deux stations a été entreprise, afin d'évaluer les tassements au niveau de la surface du terrain, le tunnel à élargir se trouvant sous une gare ferroviaire importante.

Une première étude paramétrique en 2D a été effectuée afin de quantifier l'influence des paramètres suivants: la taille de la maille, la présence ou non d'éléments de contact à l'interface sol-structure, et la prise en compte de plaques de répartition à l'extrémité des nouveaux cintres.

La modélisation proprement dite a ensuite été menée en 3D, avec introduction explicite du soutènement provisoire et de l'avancée par étapes de 1 m (Figure 11). La conclusion de l'étude a validé l'approche choisie par les ingénieurs projeteurs, les tassements en surface au voisinage des voies ne dépassant pas les valeurs admissibles imposées par les normes en vigueur (Figure 12).

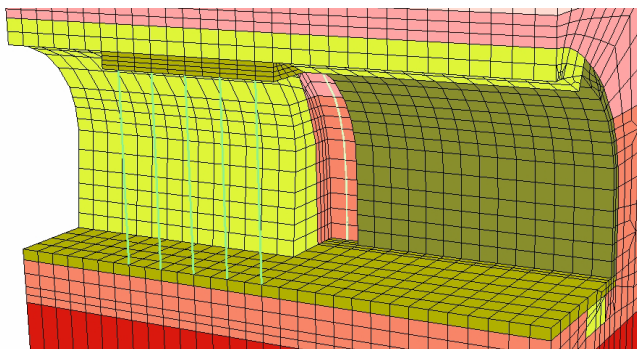


Figure 11. Principe d'élargissement

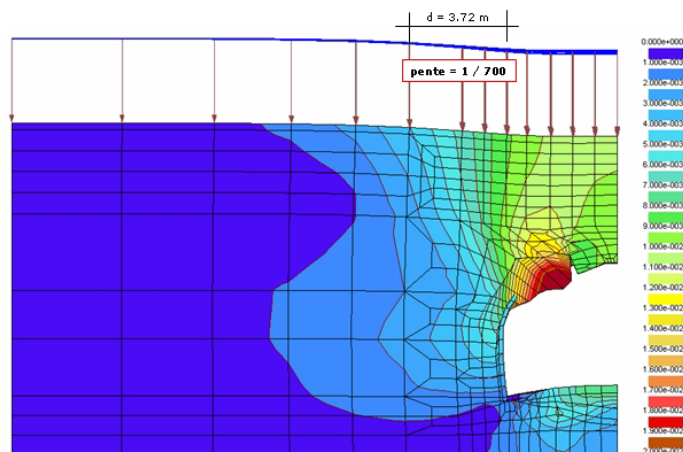


Figure 12. Déplacements dans la coupe médiane

Ouvrage de protection contre les crues

En collaboration avec SRP AG, Brig

La construction d'un ouvrage de retenue contre les crues et les éboulis en amont d'un village (Figure 13) a été étudiée à l'aide d'un modèle EF tridimensionnel, avec couplage hydro-mécanique. La vérification de l'ouvrage s'est effectuée selon les directives de l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (désormais OFEN).



Figure 13. Vue de l'ouvrage projeté

Deux variantes ont été étudiées, afin de comparer entre autres la distribution des sous-pressions sous la fondation du barrage, avec ou sans voile d'injection. Les contraintes et déplacements de l'ouvrage sous chargement pseudo-statique correspondant à la vérification au séisme sont illustrés en Figures 14 et 15.

Une attention particulière a été portée aux appuis de l'ouvrage sur les flancs de la vallée, en évaluant le risque de fissuration sous les cas de charge « réservoir plein » et « séisme ».

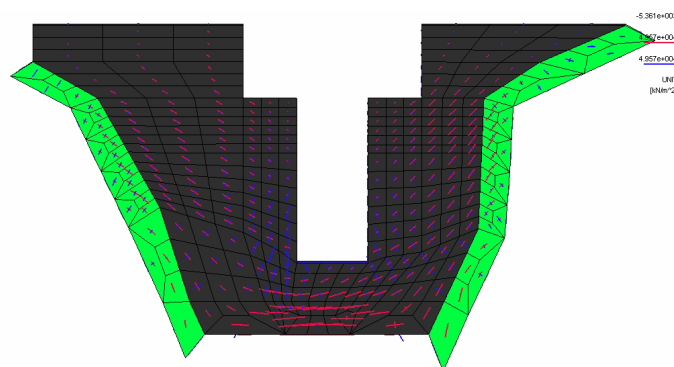


Figure 14. Contraintes principales

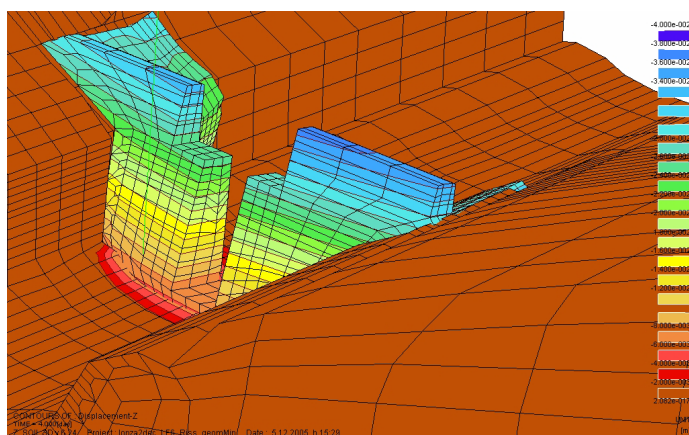


Figure 15. Champ de déplacements verticaux

Aïssa Mellal. Ingénieur civil, Dr Ecole Centrale, Paris.

Spécialiste en modélisation du comportement dynamique des sols sous sollicitations cycliques et dynamiques.

Participation au développement du logiciel **CyberQuake** (détermination de la réponse d'une colonne de sol sous sollicitation dynamique) et auteur du logiciel **Pierre** (calcul de trajectoires - déterministe et probabiliste - lors de la chute de blocs).



GeoMod ingénieurs conseils SA
Av. des Jordils 5
CH-1006 Lausanne

T : +41 21 311 34 30
F : +41 21 311 34 29
www.geomod.ch
info@geomod.ch