

ESTIMATION DES PERIODES FONDAMENTALES DE VIBRATION DES STRUCTURES DECROCHEES

Par

B. TILIOUINE

Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique (Alger)

T. BRANCI

Maître assistant à l'INES de Chlef

D. BENOUAR

Maître assistant à l'USTHB (Alger)

Résumé

Nous présentons une méthode d'estimation des périodes fondamentales de vibration des structures décrochées. Nous montrons que la période fondamentale des bâtiments décrochés diminue lorsque le rapport des aires de projection tour-base diminue ; la réduction de période étant plus accentuée pour un décrochement situé à mi-hauteur de la structure. Une évaluation des prescriptions réglementaires en vigueur est effectuée en comparant systématiquement les résultats obtenus par application du RPA 81 (version 83) avec ceux déduits de l'analyse dynamique et de la présente méthode.

L'applicabilité de la méthode proposée ainsi que les résultats analytiques de calcul des caractéristiques dynamiques sont établis sur la base de l'analyse dynamique de 10 bâtiments dont 9 décrochés verticalement.

La simplicité ainsi que la précision de la méthode permettent de recommander son utilisation pour une détermination rapide de l'effort de cisaillement de base réglementaire. Deux exemples numériques sont présentés aux fins d'illustrer la démarche à suivre et l'efficacité de la méthode proposée.

Mots clés : périodes fondamentales - vibrations - structures - décrochement - règlement parasismique - cisaillement de base.

1 PROBLEMATIQUE

Le développement rapide des techniques de construction conjugué aux impératifs d'ordre architectural incitent souvent les maîtres d'œuvre à fixer leur choix sur la cons-

truction de structures élancées présentant souvent des décrochements. De telles structures sont constituées en général d'ossatures présentant des distributions de rigidités et de masses hétérogènes excédant de loin les normes parasismiques. Ces changements brutaux d'inertie introduisent inévitablement des modifications de comportement dynamique de la structure tour-base et notamment de la valeur de la période fondamentale de vibration.

Une sous-estimation de celle-ci peut induire une augmentation appréciable des efforts sismiques de calcul contraire à l'économie du projet alors qu'une sur-estimation peut conduire dans certains cas à des dégâts considérables sur le double plan humain et matériel.

Par ailleurs, il convient de noter que si le concepteur dispose d'un instrument de calcul automatique à portée générale, il ne peut procéder à une analyse "exacte" de structure sous actions sismiques qu'après avoir prédimensionné l'ensemble tour-base. D'où la nécessité de disposer dès le stade de l'avant-projet d'un outil simple et rapide permettant de déduire les charges sismiques de calcul avec une précision suffisante pour que les dispositions générales qui en résultent ne soient pas remises en question lors de la vérification définitive de l'ouvrage.

2 INTRODUCTION

L'évaluation de la réponse dynamique des immeubles de grande hauteur, notamment en ossatures décrochées, représente un processus de calcul complexe et laborieux. Un tel processus nécessite non seulement une estimation probable du mouvement sismique de sol mais aussi la détermination des caractéristiques dynamiques de ces structures. Quoique relativement sophistiquées, les études dynamiques de telles structures [1] et celles relatives à

l'évaluation des effets de l'interaction maçonnerie-structure des constructions décrochées élancées [2] ont suscité un intérêt particulier chez les chercheurs.

Néanmoins, les considérations sus-citées ne signifient nullement qu'il faille mettre nécessairement en œuvre un programme de calcul automatique de modèles de structures à planchers déformables et des moyens informatiques importants.

En effet, devant la complexité du problème, l'ingénieur de bureau d'études, souvent confronté aux contraintes de délais contractuels, d'indisponibilité de moyens informatiques performants et de saisie laborieuse des données d'entrée, préfère avoir recours à une approche pseudo-statique équivalente.

Dans ce contexte, il est cependant vital de reconnaître que le domaine de validité des approximations induites par un calcul simplifié repose essentiellement sur une appréciation aussi correcte que possible de la fréquence propre de vibration du mode fondamental.

L'objet du présent article est de présenter une méthode aussi simple et précise que possible d'évaluation des périodes fondamentales des structures décrochées en vue de la détermination des efforts sismiques de cisaillement maximum de base.

3 METHODE

3.1 Modèles de structures décrochées

Les modèles de structure envisagés dans le cadre de cette étude sont représentés par des ossatures de grande hauteur présentant des décrochements verticaux et contreventées par des portiques auto-stables.

Compte tenu du nombre élevé de variables nécessaires pour une caractérisation adéquate des effets des irrégularités, les modèles physiques sont déduits à partir d'un portique de référence en variant deux paramètres :

- Le rapport R_H de la hauteur de la tour, h , à celle de la structure H :

$$R_H = \frac{h}{H}$$
- Le rapport R_A de la section en plan de la tour S_t à celle de la base S_b :

$$R_A = \frac{S_t}{S_b}$$

Quatre différentes valeurs sont retenues pour le paramètre R_A : 1.0, 2/3, 1/3 et 1/9. La première valeur est associée au portique uniforme alors que les trois autres valeurs correspondent aux rapports des sections indiquées sur la figure 1.

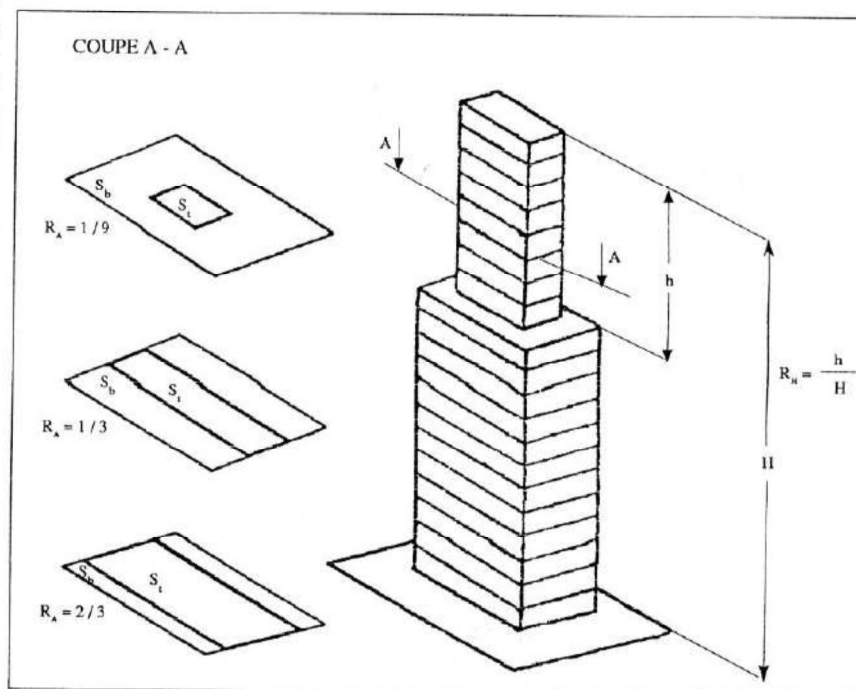


Figure 1 : Bâtiment décroché avec ses trois vues en plan.

Les valeurs attribuées au paramètre R_H sont : 0.00, 0.25, 0.50 et 0.75.

Elles correspondent respectivement au bâtiment régulier et aux bâtiments décrochés ayant une tour de cinq, dix et quinze étages.

De toute évidence, d'autres paramètres et valeurs de variables peuvent être introduits mais cependant au prix d'analyses plus complexes et plus laborieuses.

3.2 Aspects réglementaires

Le problème de détermination de la période fondamentale des constructions de grande hauteur décrochées (cas souvent rencontré en pratique), par une formule simplifiée constitue un vide réglementaire difficile à combler.

Le règlement parasismique algérien (RPA 81, version 83) prescrit (Art. 3.3.1.2.2) la formule empirique suivante [3] identique à celles préconisées par les codes australien et iranien :

$$T = 0.09 H / \sqrt{L} \quad (1)$$

où H et L , exprimées en mètres, représentent la hauteur totale et la dimension en plan de la construction dans le sens de l'action sismique.

Néanmoins, l'expérience montre que le champ d'application de cette formule est très limité et que celle-ci ne peut s'appliquer aux bâtiments décrochés de grande hauteur. La même remarque s'applique aux formules représentées sur la figure 2 (*Uniform Building Code 1976*) qui même pour des structures à trames régulières montrent des écarts sensibles de valeur par rapport aux périodes observées.

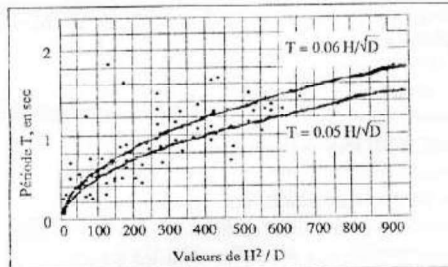


Figure 2 : Périodes observées en fonction du rapport H^2/D .

Par ailleurs, le code américain SEAOC 1974 [4] dans sa rédaction originale Sect. 2313 (i), préconise que l'effet des décrochements soit négligé pour les bâtiments dont les dimensions en plan de la tour dans chaque direction sont au moins égales à 75% des dimensions correspondantes de la base. Cette recommandation (reprise également par le RPA) ne précise cependant pas la démarche à suivre pour évaluer la réponse dans le cas de dimensions en plan plus petites de la tour, d'où l'intérêt de la présente étude.

La section 4.1 du "1975 National Building Code of Canada", [5], préconise de classer les bâtiments décrochés selon différentes catégories en fonction du rapport R_H et du rapport de la dimension en plan de la tour parallèle à la direction de l'action sismique, à celle de la base dans la même direction. Ce classement qui rappelle "curieusement" les recommandations de l'appendice C du code SEAOC 1974 ne résout pas pour autant le problème de détermination de la période fondamentale des structures décrochées.

3.3 Méthode suggérée

Afin de mieux appréhender le problème, les périodes fondamentales de 10 bâtiments (dont 9 décrochés dans le cadre des hypothèses 3.1) ont été calculés rigoureusement en utilisant les algorithmes usuels de calcul des fréquences propres de vibration (*méthode de transformation via une formulation par la méthode des raideurs et méthode d'itération via une formulation par la méthode des souplesses pour vérification éventuelle*) [6]. La figure 3 montre les effets des paramètres R_H et R_A sur les périodes fondamentales des modes de vibration de ces bâtiments.

Algerie EQUIPEMENT

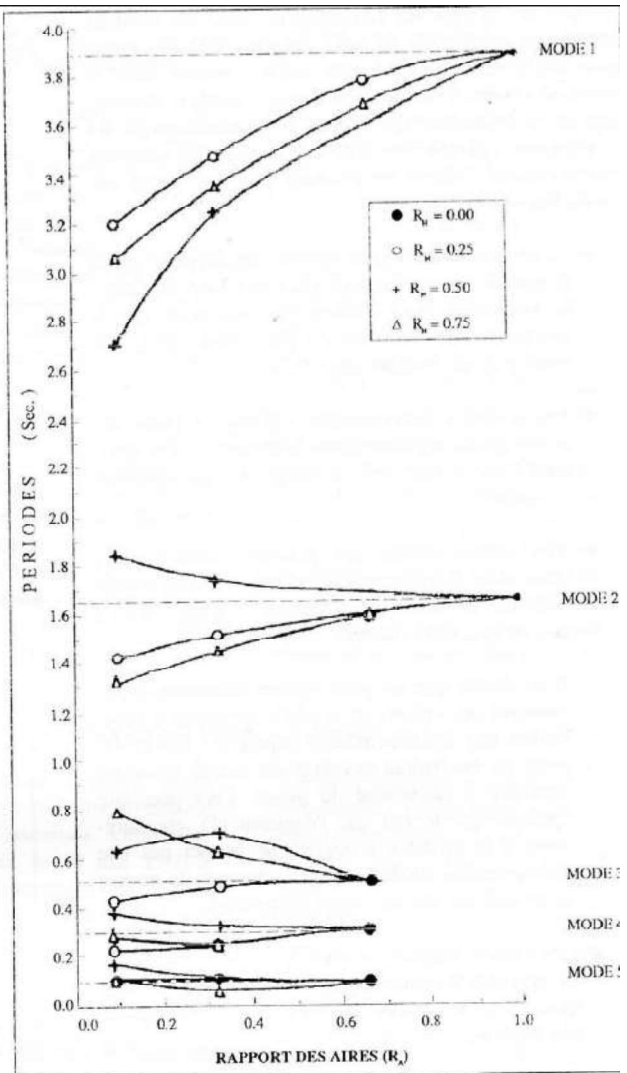


Figure 3 : Effet du rapport des aires sur les périodes propres d'une série de structures décrochées.

N°	R_H	R_A	Analyse Dynamique	Méthode suggérée	Code R.P.A. 81
1	0.00	1.0	1.000	1.000	1.000
2	0.25	2/3	0.976	0.916	1.000
3	---	1/3	0.891	0.833	1.000
4	---	1/9	0.819	0.778	1.000
5	0.50	2/3	0.932	0.833	1.000
6	---	1/3	0.837	0.848	1.000
7	---	1/9	0.601	0.706	1.000
8	0.75	2/3	0.930	0.916	1.000
9	---	1/3	0.862	0.833	1.000
10	---	1/9	0.788	0.788	1.000

Tableau 1 : Comparaison des périodes fondamentales.

Afin de faciliter les comparaisons avec les résultats déduits par application du code algérien (RPA 81) toutes les valeurs de périodes fondamentales portées dans le tableau 1 obtenues par le calcul "exact" (analyse dynamique) et la méthode proposée ont été normalisées en les divisant par la période fondamentale du bâtiment uniforme correspondante. D'après ces résultats, les observations suivantes peuvent être notées :

- La période fondamentale décroît sensiblement quand le rapport des sections en plan tour-base diminue ; la diminution étant d'autant plus accentuée que le niveau de décrochement est plus voisin de la mi-hauteur de la structure ($R_H = 0.5$).
- Les périodes fondamentales obtenues à partir des prescriptions réglementaires algériennes sont constantes quelle que soit la valeur du décrochement considéré.
- Les valeurs réelles des périodes réglementaires demeurent inférieures aux périodes fondamentales déduites de l'analyse dynamique (calcul "exact") des 10 structures étudiées.

Il en résulte que ces prescriptions admettent implicitement des valeurs de rigidités structurales supérieures aux rigidités réelles impliquant inévitablement un coefficient sismique de calcul important contraire à l'économie du projet. Ceci peut être expliqué par le fait que l'équation (1), contrairement à la méthode suggérée, ne permet pas une représentation adéquate des distributions de masses et de raideurs des structures décrochées.

- La méthode suggérée permet de prédire des valeurs de périodes fondamentales en "excellente" concordance avec celles obtenues par analyse dynamique des structures décrochées.

Ceci étant, nous présentons ci-après les principales étapes de calcul de la méthode simplifiée.

Pour le cas de structures décrochées caractérisées par un rapport $R_H < 1/2$:

- Calculer la hauteur pondérée

$$H_p = H - h (1 - R_A)$$

- Calculer le rapport correctif $\psi = \frac{H_p}{H}$

$$\psi = 1 - R_H (1 - R_A)$$

- En déduire la période fondamentale de la structure décrochée T_D

$$T_D = T_u \psi$$

où T_u désigne la période du bâtiment uniforme de même hauteur, estimée par la formule empirique de Suko-Adams [7] dont les étapes de calcul sont décrites dans le paragraphe 4 (Application numérique).

Pour le cas de structures décrochées caractérisées par un rapport $R_H > 1/2$:

- Calculer la hauteur pondérée en substituant la hauteur de la tour à celle de la base et inversement
- En déduire le rapport correctif ψ

$$\psi = R_H + R_A (1 - R_H)$$

- Déterminer la période fondamentale de la structure décrochée

$$T_D = T_u \psi$$

4 APPLICATIONS NUMERIQUES

Dans un souci de clarté, nous présentons, ci-après, en détail la démarche à suivre complétée par deux exemples numériques relatifs aux portiques dont les caractéristiques mécaniques et géométriques sont décrites sur les figures 4 (pour le portique uniforme), 5 et 6 (pour deux portiques décrochés associés).

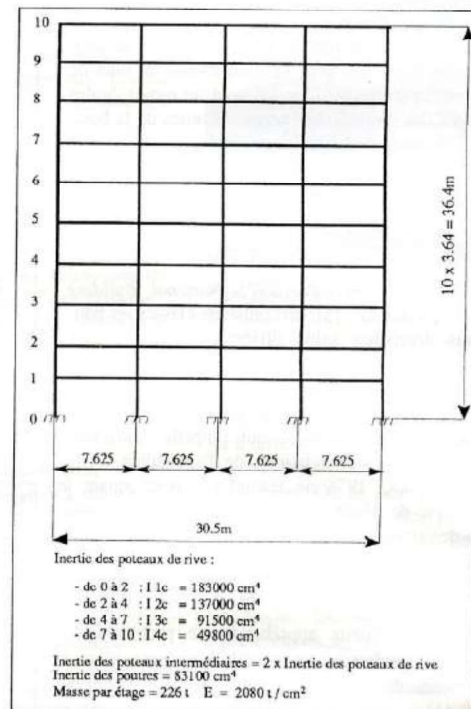


Figure 4 : Portique uniforme

L'équation empirique suggérée s'écrit :

$$T_D = T_o h_m \sqrt{\beta/\alpha} \frac{N_s}{10} [1 - R_H (1 - R_A)] \quad \text{Si } R_H < 1/2$$

$$T_D = T_o h_m \sqrt{\beta/\alpha} \frac{N_s}{10} [R_H + R_A (1 - R_H)] \quad \text{Si } R_H > 1/2$$

où

$$T_o = T_o (K_b/K_c) \quad \text{Réf. [7]}$$

$$K_b = \sum (EI/L)_b / N_s N_b \quad (EI/L)_b : \text{Raideur de poutre}$$

$$K_c = \sum (EI/L)_c / N_s (N_b + 1) \quad (EI/L)_c : \text{Raideur de colonne}$$

N_b : Nombre de travées
 N_s : Nombre d'étages

$$\alpha = 1.73 K_c / 10^6 \quad (K_c \text{ en tonnes-cm})$$

$$\beta = mg / 31.7 [(N_b + 0.4) / N_b] \quad (mg \text{ en tonnes-forces})$$

mg : Poids moyen par étage et par colonne en tonnes-forces

$$h_m = H / 3.66 N_s \quad (H \text{ en mètres})$$

4.1 Exemple numérique relatif au portique décroché de la figure 5

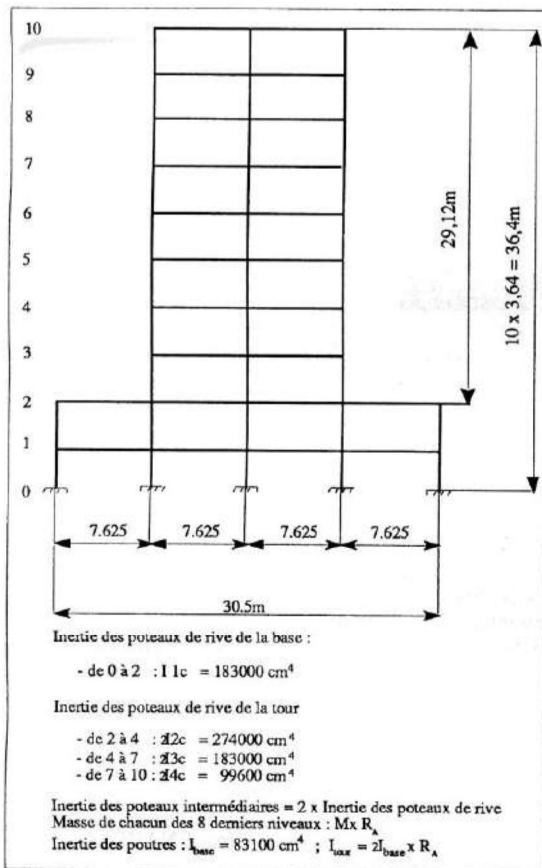


Figure 5 : Portique décroché ($R_H = 0.8$, $R_A = 0.25$).

$$R_H = 0.8 \text{ (Soit } R_H > 1/2)$$

$$R_A = 0.25$$

D'où après tous calculs faits :

$$T_d = 1.68 \text{ s}$$

4.2 Exemple numérique relatif au portique décroché de la figure 6

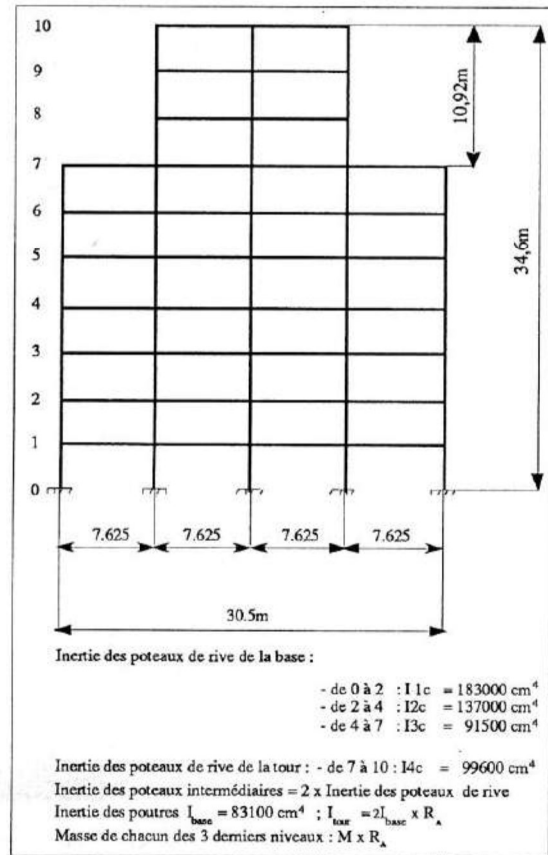


Figure 6 : Portique décroché ($R_H = 0.3$; $R_A = 0.25$).

$$R_H = 0.3 \text{ (Soit } R_H < 1/2)$$

$$R_A = 0.25$$

D'où après tous calculs faits :

$$T_d = 1.53 \text{ s}$$

Comparées aux prescriptions réglementaires (RPA 81), les valeurs des périodes obtenues, 1.68 s et 1.53 s, conduisent à des efforts sismiques de cisaillement, moins importants que ceux déduits de l'application directe des formules empiriques :

$$T = 0.09 H / \sqrt{L} = 0.59 \text{ s} \quad \text{ou} \quad T = 0.1N = 1 \text{ s}$$

5 CONCLUSION

Une méthode empirique est développée pour la prédiction des périodes fondamentales des structures décrochées présentant des caractéristiques géométriques et mécaniques sortant du cadre des prescriptions réglementaires. Compte tenu de son efficacité (simplicité, précision et rapidité) nous proposons son utilisation pour une détermination plus précise des efforts sismiques de calcul préconisés par les règlements en vigueur ①

6 BIBLIOGRAPHIE

- [1] T. Branci "Incidence des décrochements verticaux sur la réponse dynamique des systèmes à plusieurs degrés de liberté." Thèse de Magister, Département de Génie Civil, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, Mai 1988.
- [2] B. Tiliouine, T. Branci "Effets de l'Interaction Maçonnerie-Structure sur l'analyse dynamique des structures décrochées", Séminaire International "sur les processus physiques dans les foyers sismiques et les effets de séismes sur les terrains et les ouvrages" Boumerdès, I.N.H. Algérie, Avril 1988.
- [3] Règles parasismiques Algériennes 1981, version 1983, E.N.A.L., Alger, Algérie 1984.
- [4] Seismology Committee, Structural Engineers Association of California, "Recommended lateral force requirements and commentary" San Francisco, California, U.S.A., 1974.
- [5] "National Building Code of Canada" Structural loads and procedures and commentaries on Part4, Ottawa, Canada, 1975.
- [6] K. J. Bathe and E. L. Wilson "Numerical Methods in Finite Element Analysis" Prentice-Hall, Inc. New Jersey, U.S.A., 1976.
- [7] M. Suko, P.F. Adams "Inelastic Analysis of Multistory Multibay Frames Subjected to Dynamic Disturbances" Structural Engineering Report, N°44, Dept. Civil Eng. University of Alberta, Edmonton, Canada, June 1973.

ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS



PATHOLOGIE - AUSCULTATION - REPARATION ET ENTRETIEN DES PONTS ET TUNNELS

★ OBJECTIFS

- Détecter les désordres et identifier les causes de la dégradation des structures.
- Evaluer les difficultés techniques de réparation et de protection des matériaux utilisés.
- Définir les méthodes et moyens de réparation et d'entretien les plus adaptés d'un point de vue technique et économique.
- Tirer des leçons des désordres constatés pour améliorer la conception d'ouvrages.

★ PUBLIC VISE

- Ingénieurs d'études, de laboratoire, d'entreprises et des Administrations.
- Elèves ingénieurs de dernière année.

★ AGENDA

- Date : 14 & 15 Février 1993
- Lieu : Ecole Nationale des Travaux Publics
- Frais de participation : 1 600 DA

★ PROGRAMME

- ✓ Nécessité de la surveillance et de l'entretien des ouvrages.
- ✓ Causes des désordres dans les ouvrages.
- ✓ Méthodologie de la maintenance (Expertise - Entretien - Réparation).
- ✓ Méthodologie d'auscultation, moyens et analyse des résultats.
- ✓ Méthodes de surveillance, d'entretien et de réparation des équipements d'ouvrages d'art.

★ CONFERENCIERS

- BAYASLI Rachid : Ing. ENAPTA
- BENMEHDI Hocine : Ingénieur EIF
- BENHOUHOU Med. Chafik : Ingénieur CTTP
- BOUTAMINE Mébarek : ENTP
- BENSALMA Ahmed : Ingénieur ENROS
- BEKKAT Seddik : Ingénieur ENROS
- Deux experts internationaux.

▼ Responsable Pédagogique ▼

MR KADRI Omar, ENTP