

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 120 (1994)
Heft: 13

Artikel: Réseaux d'accélérographes pour barrages (fin)
Autor: Darbre, Georges R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78325>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Réseaux d'accélérographes pour barrages (fin)¹

Par Georges
R. Darbre, Ph.D.,
M.S., ing. dipl. EPFZ
Office fédéral de
l'économie des eaux
Case postale,
3001 Berne

4. Spécifications

Les spécifications requises des instruments dépendent des conditions d'environnement prévalant aux stations et des objectifs d'observations établis ici en postulant l'installation d'accélérographes triaxiaux (voir également [3, 5, 9, 10]). Une fiabilité de fonctionnement extrême est exigée du fait de la rareté de tremblements de terre sévères. Il est de ce fait impératif de n'installer que des appareils de conception et de construction simples, auparavant soigneusement testés dans des conditions réelles, et de travailler en collaboration étroite avec un ingénieur en électronique spécialisé en instrumentation.

Seules les spécifications principales sont mentionnées ici, sans développement des raisons conduisant à leur sélection (pour plus de détails, voir [11]).

4.1. Accélérographes

Enregistrement

– L'installation d'accélérographes à enregistrement digital et enregistrements préalable et postérieur est recommandée. L'accélération maximale correspondant à la menace sismique sur le site pour une période de retour de 100 ans doit pouvoir être enregistrée, la position de l'instrument dans le barrage et l'amplification des vibrations en résultant devant être prises en compte (par exemple, l'amplification de l'accélération amont-aval au milieu du couronnement d'un barrage-voûte peut atteindre théoriquement un facteur de 6 par rapport à celle au pied). La résolution d'accélération devrait atteindre au moins 0,001g, respectivement 12 data bits. La fréquence inférieure mesurée devrait être inférieure à 10% de la première fréquence

propre du barrage et inférieure à la fréquence porteuse d'énergie d'excitation la plus basse, si possible 0 Hz. De la même manière, la fréquence supérieure mesurée doit être supérieure à la fréquence propre du mode le plus élevé contribuant à la réponse du barrage, ainsi qu'à la plus haute fréquence porteuse d'énergie d'excitation (au moins 30 Hz).

Stabilité et bruit

– La stabilité à court terme des capteurs doit être assurée (déviations inférieures à la résolution sur la durée d'un enregistrement), exigence qui s'applique également à la stabilité à long terme associée à la relation tension/accélération (modifications dues aux variations de température par exemple). Cela n'est pas nécessairement requis de la stabilité à long terme de la déviation zéro (due au vieillissement du capteur par exemple) qui peut être corrigée lors de l'interprétation lorsque l'enregistrement est effectué depuis 0 Hz avec enregistrements préalable et postérieur. De façon similaire, le bruit total (capteur et électronique) dont les enregistrements sont entachés doit rester inférieur à la résolution.

Protections

– Dans des endroits particulièrement exposés aux orages, des surtensions importantes peuvent provenir de la foudre. Les instruments doivent alors être montés sur des supports électriquement isolés et tous les câbles métalliques branchés à l'accélérographe. En particulier ceux d'alimentation et d'interconnexion doivent être reliés à un appareil de protection contre les surtensions placé à proximité immédiate de l'accélérographe. Les segments de câbles électriquement pro-

tégés ne doivent pas toucher ou croiser des segments non protégés, et doivent être maintenus à une distance de quelques centimètres de la paroi et du sol par des fiches, ou placés dans des tubes isolants. Aucune surtension ne peut ainsi atteindre l'accélérographe dans les limites de dimensionnement de l'appareil de protection. Les perturbations de fonctionnement d'un accélérographe associées à l'apparition de courants induits par des différences de potentiel électrique peuvent être prévenues en reliant toutes les composantes électriques à une terre unique. Les boîtiers métalliques doivent également être mis à la terre pour des raisons de protection des personnes. Lorsque le capteur est extérieur à l'enregistreur, il faut également veiller à ce que le câble de liaison capteur-enregistreur, à travers lequel passent les signaux analogues de faible voltage, ne croise pas d'autres câbles électriques afin d'éviter des perturbations.

4.2. Réseau

Principe

– Le but fondamental d'une installation en réseau est d'assurer l'enregistrement d'un tremblement de terre simultanément en différents endroits. Cela présuppose une interconnexion par câbles de tous les accélérographes du réseau, les liaisons radios ne fonctionnant en général pas dans les grands barrages. Un enregistrement synchronisé de tous les accélérographes est nécessaire. A défaut, un marquage horaire précis doit être disponible sur les enregistrements. Les câbles d'interconnexion métalliques doivent être protégés contre les surtensions dans les endroits ex-

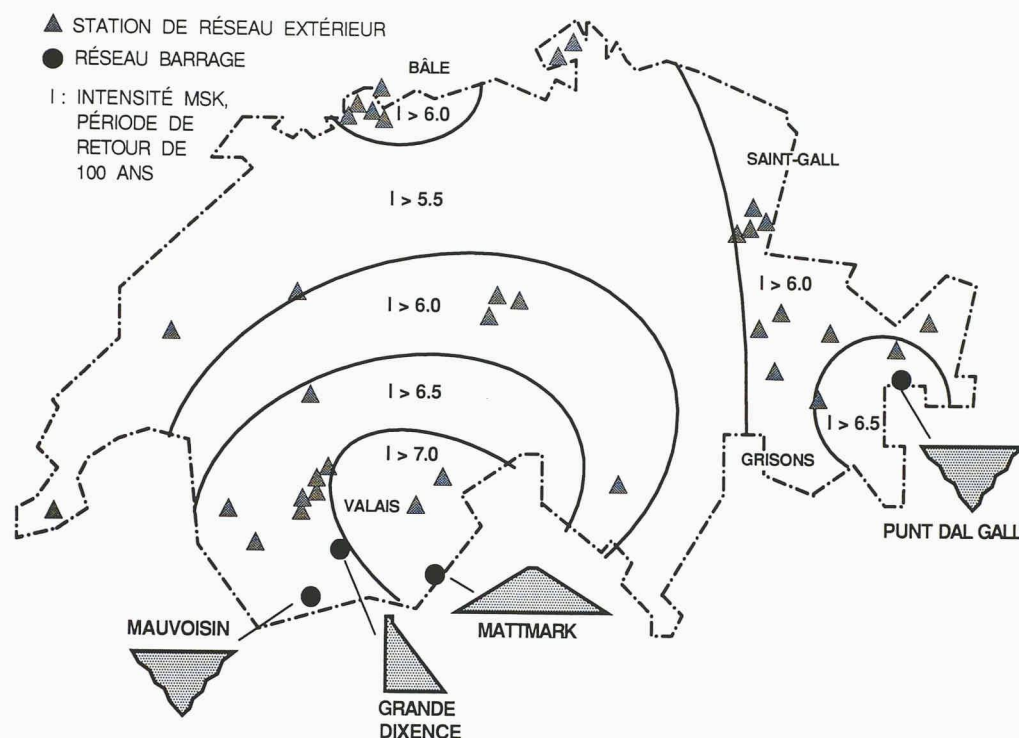


Fig. 7. – Réseau national suisse d'accélérographes

posés (à proximité des accélérographes, de manière similaire à l'alimentation). Une unité de gestion éventuelle, telle qu'elle existe dans une configuration de réseau en étoile, doit être protégée de la même manière qu'un accélérographe.

Interconnexion

- L'interconnexion peut se faire par câble métallique ou par câble à fibres optiques. Si l'avantage du premier réside dans son montage simple, son utilisation est cependant limitée en ce qui concerne les distances et nécessite des précautions pour la mise à la terre et la protection contre les surtensions. Les avantages de la fibre optique résident dans la possibilité de trans-

mettre des signaux sur de grandes distances en l'absence de tous problèmes d'origine électrique; son montage est cependant plus compliqué (fiches de branchement, réparation de cassures).

5. Exemple du réseau national suisse

Un réseau de 35 accélérographes de champ libre et 4 réseaux-barrages d'accélérographes ont été installés en 1992 (fig. 7). Ils sont brièvement présentés ici, l'accent étant mis sur les réseaux-barrages.

5.1. Réseau de champ libre

L'objectif du réseau d'accélérographes de champ libre est d'acquies les observations nécessaires à la détermination des caractéristiques des tremblements de terre locaux de grandes intensités (trace temporelle, accélération maximale, contenu fréquentiel, durée d'excitation forte, spectre de réponse associé), et de valider les relations d'atténuation et les coefficients correspondants présentement utilisés dans les calculs de propagation d'ondes. Les 35 accélérographes sont installés en groupes de 1 à 5 instruments sur des sols différents ou alignés perpendiculairement à l'axe d'une vallée.

Les accélérographes triaxiaux à enregistrement digital sont systématiquement installés dans des stations transformatrices (il reste encore à démontrer que les effets d'interaction sol-structure n'affectent que marginalement les enregistrements). L'accélération dynamique maximale est de 20% g à 50% g (fixée en fonction de la sismicité du lieu), et la plage de fréquence couverte est de 0,2 Hz à 30 Hz. Les enregistrements sont sauvegardés sur une carte mémoire interchangeable.

5.2. Réseaux-barrages

Quatre barrages représentatifs de ceux rencontrés en Suisse (type, géométrie, fondation) se trouvant dans les zones à plus grande sismicité ont été instrumentés. Les accélérations maximales aux quatre sites, calculées pour une période de retour de 100 ans, varient entre 8% g et 11% g.

Instrumentation

- Les accélérographes sont à montage mural avec accéléromètre externe. Ils sont reliés à une unité de gestion centrale par des câbles à fibres optiques (configuration en étoile, fig. 8). L'unité centrale gère l'enclenchement simultané et synchronisé des enregistrements, la synchronisation des horloges internes (un récepteur de signal horaire est relié à l'unité centrale), et la communication à distance (avec elle-même et avec les accélérographes par un modem connecté au réseau téléphonique public).

L'accélérographe a les caractéristiques suivantes: accéléromètre triaxial à capteurs capacitifs, fréquence propre et amortissement des capteurs de 850 Hz et 70%, mesure entre 0 Hz et 50 Hz (filtre Butterworth à 6 pôles), filtre d'enclenchement de 0,5 Hz à 15 Hz, enregistrement digital sur mémoire non volatile SRAM

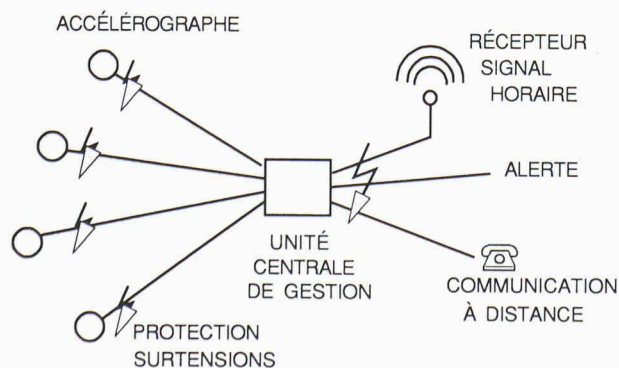


Fig. 8. – Réseau en étoile

de 512 kBytes (environ 18 minutes d'enregistrement), accélération dynamique maximale de $\pm 0,5$ g (horizontal) et 1 g $\pm 0,5$ g (vertical), résolution de 0,00025 g (correspondant à 12 data bits), 200 enregistrements par seconde ($dt = 0,005$ secondes), tests de fonctionnement automatiques intégrés, autonomie de plus de 48 heures sur batterie interne. La compatibilité électromagnétique des accélérographes a été vérifiée en laboratoire et les boîtiers satisfont aux critères d'étanchéité de la classe IP65 [12]. L'accélérographe a été testé en galerie au barrage d'Emosson et à proximité immédiate du poste de couplage de la Batiaz lors de la phase d'évaluation.

Réseaux

- Les réseaux installés sont présentés aux figures 9 à 12 (voir [13, 14, 15, 16] pour une description plus détaillée). Une station en champ libre a été installée à l'entrée d'un tunnel d'accès à chaque barrage.

12 accélérographes ont été installés au barrage-voûte de Mauvoisin (fig. 9). Leur position a été choisie en partie sur la base des résultats d'une analyse modale mise à disposition par Electrowatt Ingénieurs Conseils SA à Zurich. Pour une hauteur de 250,5 m, le barrage a une longueur de couronnement de 520 m et une épaisseur au pied de 53,5 m et de 12 m au couronnement. L'accent est mis sur l'observation de l'excitation effective (considérant la propagation des ondes) et de la réponse du barrage. La station en champ libre est en aval, à une distance de 600 m du barrage. L'interconnexion a nécessité la pose de 6494 m de câbles fibres optiques, dont un segment de 1393 m pour relier

la station en champ libre.

7 accélérographes et 2180 m de câbles fibres optiques ont été installés au barrage-voûte de Punt-dal-Gall (fig. 10). Le barrage présente une hauteur maximale de 130 m, une longueur du couronnement de 540 m, une épaisseur à la base de 24,5 m et une épaisseur au couronnement variant entre 10 et 12 m. L'objectif est l'observation minimale de l'excitation et de la réponse. La station en champ libre est placée à une distance de 325 m du barrage (prolongation de l'appui en rive droite).

Le barrage-poids de la Grande-Dixence (6 accélérographes et 1645 m de câbles fibres optiques, fig. 11) a une hauteur de 285 m. Les autres dimensions principales sont une longueur de couronnement de 695 m, une épaisseur à la base de 198 m et une épaisseur au couronnement de 15 m. Le barrage a été bétonné par plots de 16 m de largeur. Les objectifs sont l'observation du plot central (excitation effective au pied et réponse) et du comportement indépendant des plots voisins. La station en champ libre se trouve 290 m en aval du barrage.

La digue de Mattmark (4 accélérographes et 3290 m de câbles fibres optiques, dont un segment de 2170 m pour la station en champ libre, fig. 12) a une hauteur de 120 m, une longueur de couronnement de 780 m, une largeur à la base de 373 m et une largeur au couronnement de 9 m. L'objectif est l'observation minimale de l'excitation et de la réponse. La station en champ libre se trouve à 775 m de la digue (aval).

Montage

- La présence de galeries dans lesquelles tous les accéléro-

graphes ont pu être installés (à une exception près) et la proximité d'une alimentation électrique ont simplifié le montage. Seuls un puits de 150 cm de profondeur au couronnement de la digue de Mattmark (pour y placer un accélérographe) et un forage de 8 m dans une dalle en béton au barrage de Mauvoisin (afin de faciliter le passage des câbles d'interconnexion) ont dû être réalisés. L'alimentation des accélérographes et de l'unité de gestion du réseau de la Grande-Dixence a également dû être reliée au groupe électrogène de secours du barrage, des coupures de courant supérieures à 48 heures pouvant se produire sur le circuit d'alimentation normal.

Dans la mesure du possible, tous les accéléromètres ont été placés sur les parois amont des galeries et orientés de la même manière (+X: direction aval perpendiculaire à l'axe du barrage, +Y: direction rive gauche tangentielle au barrage, +Z: direction verticale vers le haut). La configuration type d'une station est indiquée à la figure 13, et la figure 14 montre la photo d'une station. Les dimensions des boîtiers (largeur x hauteur x profondeur, en mm) sont de 75x80x57 (accéléromètre), 200x230x110 (enregistreur) et 160x120x90 (protection contre les surtensions). Une distance d'environ 20 cm sépare les éléments entre eux. Les appareils sont montés selon les spécifications concernant la protection contre les surtensions (montage isolé, protection de l'alimentation, câbles éloignés de la paroi), le câble de capteur (pas de croisement avec d'autres câbles électriques) et l'écoulement de l'eau (espace entre les instruments et la paroi). Les câbles d'interconnexion ont

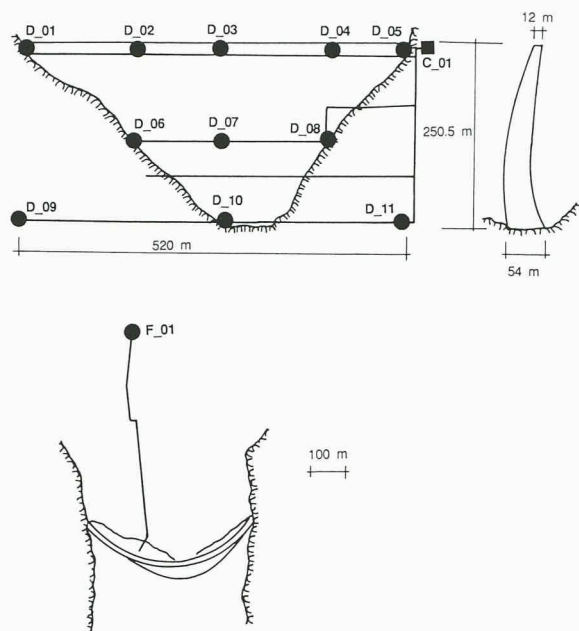


Fig. 9. - Réseau de Mauvoisin

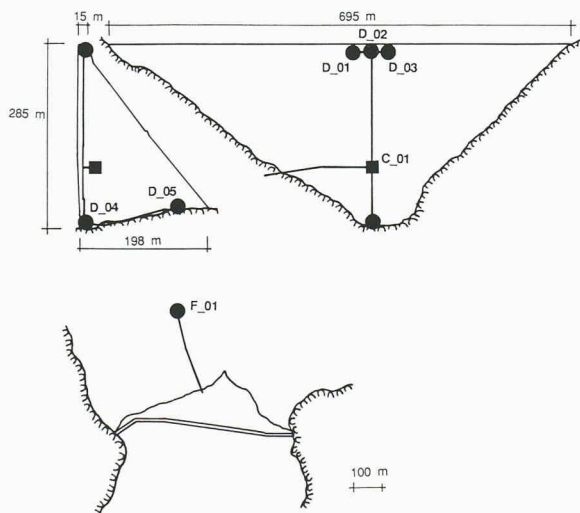
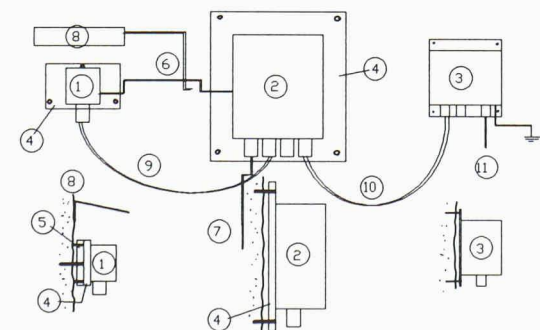


Fig. 11. - Réseau de la Grande-Dixence

ELEVATION



COUPES

Fig. 13. - Configuration type d'une station d'accélérographe:

- | | |
|---------------------------------------|---|
| (1) Accéléromètre | (7) Câble d'interconnexion (fibres optiques) |
| (2) Enregistreur | (8) Toit de protection |
| (3) Protection contre les surtensions | (9) Câble de liaison accéléromètre-enregistreur |
| (4) Support électriquement isolé | (10) Alimentation électrique protégée |
| (5) Support métallique | (11) Alimentation électrique non protégée |
| (6) Fil de terre | |

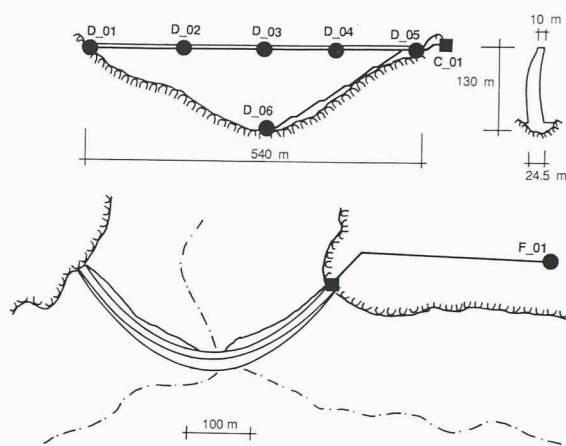


Fig. 10. - Réseau de Punt-dal-Gall

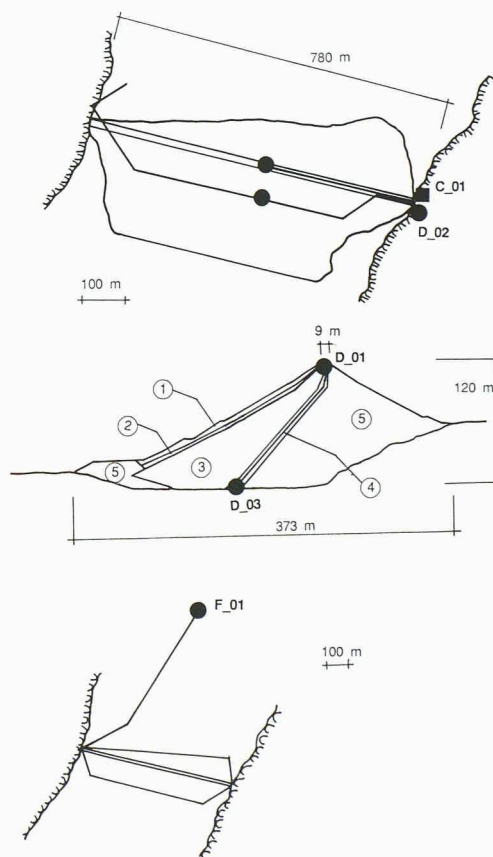


Fig. 12. - Réseau de Mattmark

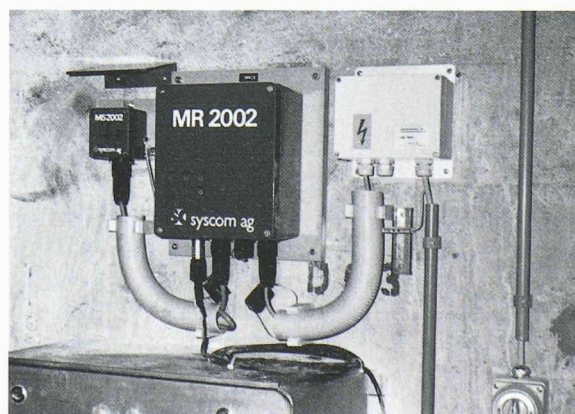


Fig. 14. - Station au barrage de Mauvoisin (Photo P. Smit, Service sismologique suisse)

été tirés sur des chemins à câbles ou dans des tubes, spécifiquement posés à cet effet sur certains tronçons. Les dimensions du boîtier de l'unité de gestion, modem compris, sont 600x350x556. De par les caractéristiques des capteurs (fréquence propre élevée et large plage de fréquence de réaction), de légers chocs peuvent engendrer une saturation du signal analogue avant que celui-ci ne soit filtré (chocs provoqués par une goutte d'eau tombant sur le boîtier de l'accéléromètre par exemple). Il en résulte l'enregistrement d'un signal qui pourrait totalement fausser un enregistrement réel si cela devait se produire lors d'un tremblement de terre. Un toit de protection est placé au dessus des accéléromètres afin de prévenir ce phénomène.

Critères d'enclenchement

- Les critères d'enclenchement appliqués sont illustrés à la figure 15a pour le barrage de Mauvoisin. Le seuil d'enregistrement, fixé à 10 fois la résolution pour les appareils le long de l'appui et en fondation, est plus élevé pour les appareils placés dans le barrage. L'enregistrement localisé s'enclenche dès qu'une composante atteint le seuil fixé et l'enclenchement du réseau s'effectue dès que les accélérographes reliés logiquement selon une des relations de la figure 15b atteignent simultanément leur seuil d'enclenchement.

Relais d'alerte

- Un relais de signal d'alerte se ferme sur la base d'un principe identique à celui utilisé pour l'enclenchement de l'enregistrement. Le barrage et les environs devraient être contrôlés dans les 24 heures lorsque le seuil inférieur (2% g à 4% g) est atteint, et im-

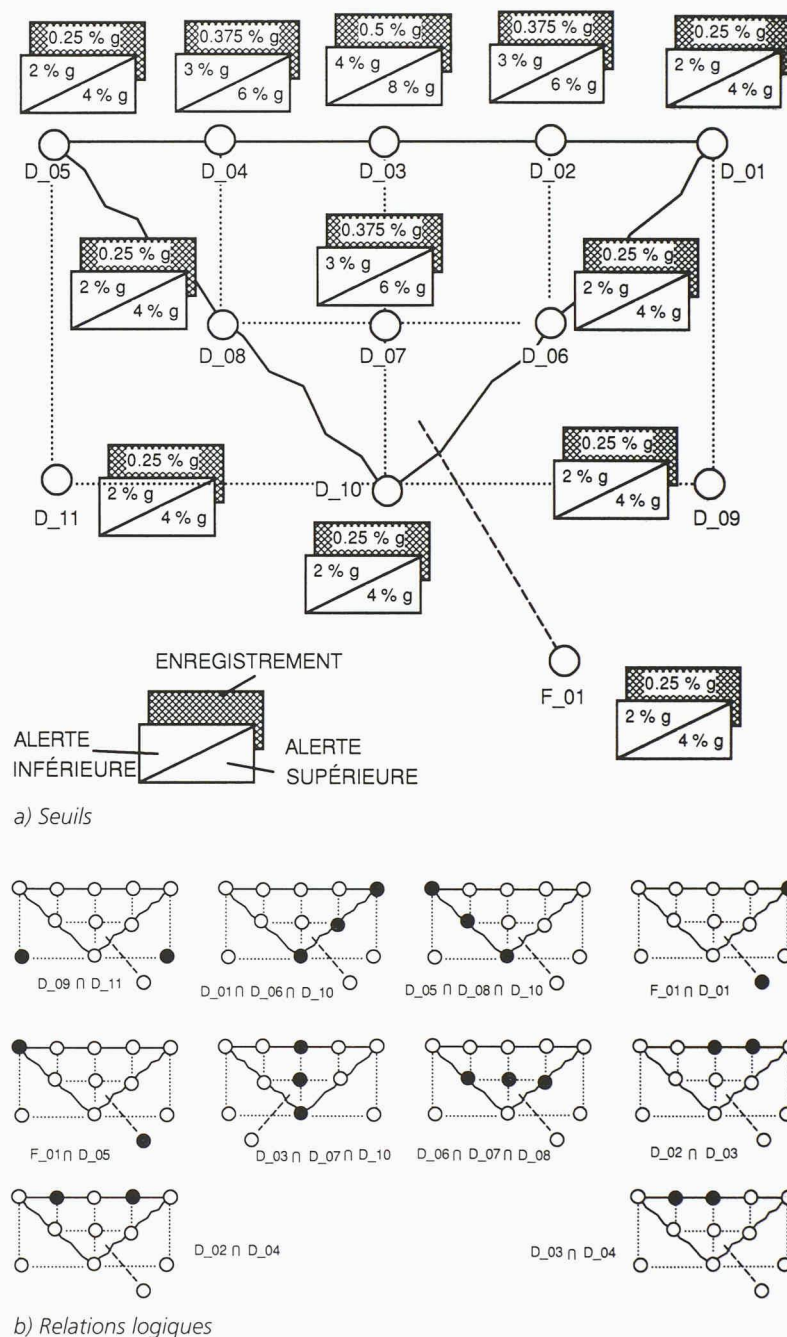


Fig. 15. - Critères d'enclenchement du réseau de Mauvoisin

médiatement quand le supérieur (4% g à 8% g) est atteint. Les premières valeurs sont volontairement basses afin d'exercer la procédure de contrôle à intervalles réguliers.

6. Expériences lors du tremblement de terre de Domodossola (14 juin 1993)

Un tremblement de terre de magnitude 4,4 s'est produit à proximité de Domodossola le 14 juin 1993. Les réseaux de la digue de Mattmark (distance à l'épicentre de 25 km) et du barrage-poids de la Grande-Dixence (72 km) ont été enclenchés lors de cet événement (des dé-

tails sont disponibles dans la communication [17]).

Mattmark

- Les accélérations maximales observées à Mattmark sont présentées à la figure 16a et la trace d'accélération dans la direction amont-aval à la figure 17. Le niveau d'eau atteignait 66,6 m lors de l'événement, et l'amplification d'accélération du pied au couronnement a atteint environ 2 (valeur extrême, direction amont-aval). La valeur extrême de l'accélération en rive droite étant également supérieure à celle au pied, cette amplification ne pro-

vient manifestement pas uniquement d'un comportement dynamique bidimensionnel de la digue, mais est influencée de manière prépondérante par les effets de vallée et le comportement tridimensionnel de la digue.

Grande-Dixence

- Les accélérations maximales enregistrées sont résumées à la figure 16b (niveau d'eau de 183,5 m). L'amplification de la base au sommet atteint ici une valeur de 5 à 6. L'importance des effets de vallée et du comportement tridimensionnel ne peut être évaluée du fait de l'absence d'instruments aux rives. La fonction de transfert pour la direction amont-aval à la section principale est indiquée dans la figure 18 (de 0 Hz à 10 Hz). La pointe à 2,2 Hz devrait correspondre à la première fréquence propre du barrage, dont l'amortissement est de l'ordre de 1% de l'amortissement critique.

Remarques

- Le comportement des réseaux lors de ce tremblement de terre a confirmé que l'instrumentation réalisée peut fournir les observations recherchées. Plusieurs déficiences des installations ont également pu être mises à jour, en particulier en relation avec le fonctionnement des accélérographes les plus éloignés des barrages (qui n'ont pas réagi à l'ordre d'enregistrement commun), avec la stabilité et le bruit des capteurs (trop importants pour permettre une interprétation complète des enregistrements) et avec la communication modem (ne fonctionnant que sporadiquement). La nécessité de planifier à l'avance la dissémination des enregistrements aux institutions intéressées et d'assurer leur interprétation systéma-

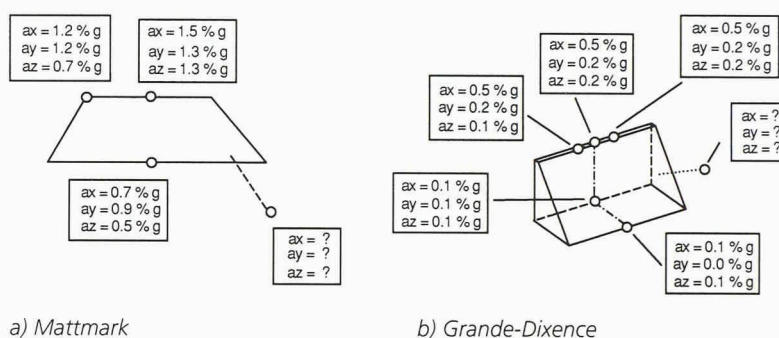


Fig. 16. – Accélérations maximales, tremblement de terre de Domodossola, 14 juin 1993

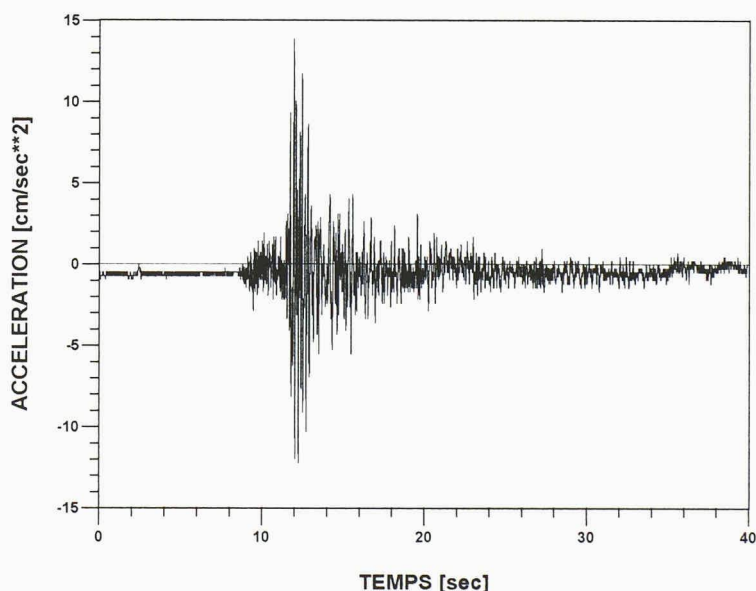


Fig. 17. – Accélération au couronnement de la digue de Mattmark, direction amont-aval, 14 juin 1993

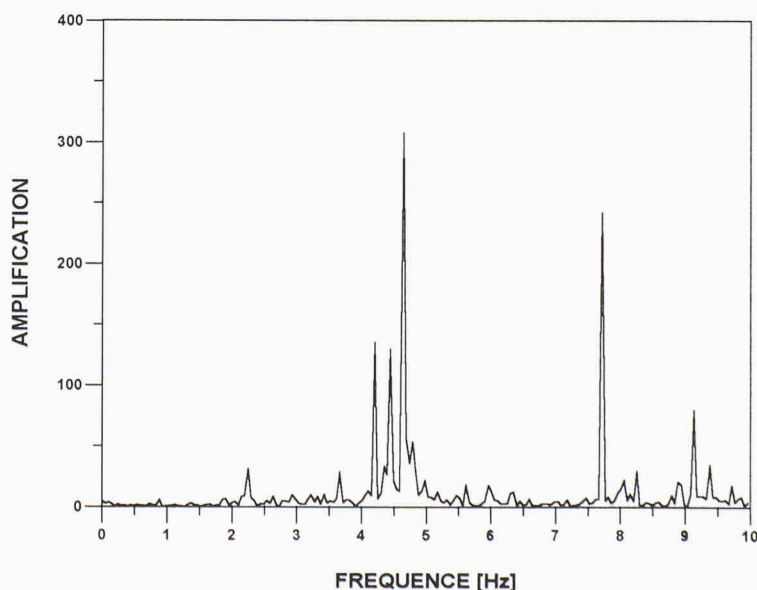


Fig. 18. – Fonction de transfert pied-couronnement à la section centrale du barrage-poids de la Grande-Dixence, direction amont-aval, 14 juin 1993

tique est également apparue. L'interprétation est avant tout du ressort de l'analyse structurale dont l'identification des systèmes fait partie intégrante. Cette branche du génie civil mérite une plus grande attention en Suisse au niveau de la recherche.

Références

- [1] SÄGESESSER R. et MAYER-ROSA, D.: «Erdbebengefährdung in der Schweiz», *Schweizerische Bauzeitung* 96/7, 107-123, 1978
- [2] DARBRE, G.R.: «Tremblements de terre: modèles de calcul», *Eau-Energie-Air*, vol. 85, N° 1/2, 7-16, 1993
- [3] BOLT, B. A. et HUDSON, D.E.: «Seismic instrumentation of dams», *Journal of the geotechnical engineering division*, ASCE, vol. 101, N° GT 11, 1095, 1975
- [4] US National Research Council: «Safety of existing dams: Evaluation and improvement», Committee on the safety of existing dams, National Academy Press, Washington DC, 1983
- [5] US Committee on Large Dams: «Strong motion instruments at dams: guidelines for their selection, installation, operation and maintenance», US COLD, Denver CO, 1989
- [6] US National Research Council: «Earthquake engineering for concrete dams: Design, performance and research needs», Panel on Earthquake Engineering for Concrete Dams, National Academy Press, Washington DC, 1990
- [7] FOK, K.-L. et CHOPRA, A.K.: «Earthquake analysis and response of concrete arch dams», Report N° UCB/EERC-85/07, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1985
- [8] FEDOCK, J.J.: «Strong-motion instrumentation of earth dams», US Department of the Interior, Geological survey, Open-File Report 82-469 (preliminary), 1982
- [9] IWAN, W.D.: «Instrument arrays for strong motion studies», in 'Lifeline earthquake engineering - buried pipelines, seismic risk and instrumentation', 3rd national congress on pressure vessels and piping, San Francisco, California, ASME, PVP-34, 1979
- [10] IWAN, W.D.: «Strong-motion earthquake measurement: past accomplishments and future directions», Proceedings of the 9th world conf. on earthquake eng., Tokyo-Kyoto, VIII 97-104, 1988
- [11] DARBRE, G.R.: «Instrumentation de barrages par accélérographes», Rapport de l'Office fédéral de l'économie des eaux, Berne, 1994
- [12] IEC - International Electrotechnical Commission: «Degrés de protection procurés par les enveloppes (Code IP)», Norme internationale, référence CEI/IEC 529:1989, 1989
- [13] DARBRE, G.R.: «Instrumentation par accélérographes du barrage-voûte de Mauvoisin», rapport de l'Office fédéral de l'économie des eaux, Berne, 1993
- [14] DARBRE, G.R.: «Instrumentation par accélérographes du barrage-voûte de Punt-dal-Gall», rapport de l'Office fédéral de l'économie des eaux, Berne, 1993
- [15] DARBRE, G.R.: «Instrumentation par accélérographes du barrage-poids de la Grande-Dixence», rapport de l'Office fédéral de l'économie des eaux, Berne, 1993
- [16] DARBRE, G.R.: «Instrumentation par accélérographes de la digue de Mattmark», rapport de l'Office fédéral de l'économie des eaux, Berne, 1993
- [17] DARBRE, G.R. et STUDER, J.: «Verhalten der Talsperrenstarkbebenmessnetze beim Domodossola Erdbeben von 14. Juni 1993», Mitteilungsblatt der deutschen, österreichischen und schweizer Gesellschaften für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik, 10/1993, 1993

Remerciements

La réalisation du réseau national d'accélérographes, dans le cadre duquel l'étude présentée ici a été réalisée, a été rendue possible grâce à un fonds de recherche mis à disposition par les propriétaires des barrages et des centrales nucléaires. Les propriétaires des barrages instrumentés ont, de plus, généreusement contribué aux travaux d'installation. Ces soutiens sont sincèrement appréciés. Emossion SA et son chef d'exploitation, M. J.-M. Rouiller, ont apporté leur concours et expertise lors de la phase d'évaluation des instruments. Les aspects électrotechniques de l'instrumentation ont été traités par M. M. Dietiker du Service sismologique suisse à Zurich. Leur engagement compétent et collégial est mentionné avec plaisir.

Action «Monika Hauser Zenica»

Dans son numéro 9 du 24 février dernier, notre excellente consœur alémanique *Schweizer Ingenieur und Architekt* se faisait l'écho d'une action lancée par la section zuricoise de la SIA, destinée à aider Mme Monika Hauser, médecin de Saint-Gall, qui a installé dans la ville bosniaque de Zenica un centre d'assistance gynécologique aux femmes violées dans les conflits en ex-Yougoslavie.

Les lecteurs de la revue étaient invités à envoyer leurs dons en espèces sur le compte de chèques postaux de la section zuricoise.

A fin avril dernier, les initiateurs de cette action avaient enregistré des dons d'un montant total de 53 641 francs.

Cela a été l'occasion de présenter dans *Schweizer Ingenieur und Architekt* les travaux et les projets de l'association créée par Monika Hauser.

Ce sont plusieurs milliers de femmes qui ont été soignées dans le cadre de cette action, qui a en outre permis de distribuer des repas chauds à l'hôpital de Zenica et des denrées alimentaires à des familles de la ville.

Pour permettre de poursuivre cette action, Monika Hauser souhaite susciter une *solidarité féminine internationale*, en faveur de laquelle des dons peuvent être versés au CCP 80-9903-8, SIA section zuricoise, Zurich, avec la mention «Action Monika Hauser»; les donateurs peuvent demander à voir leur nom figurer dans les colonnes de *SI+A*.