

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 114 (1988)
Heft: 15-16

Artikel: Petite sismique et essais mécaniques en galerie
Autor: Amiguet, Jean-Louis
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76826>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 25.04.2026

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

Petite sismique et essais mécaniques en galerie

Des campagnes combinées de petite sismique et d'essais de plaque en galerie ont été effectuées dans le cadre de deux projets hydro-électriques en Indonésie.

Elles ont permis d'évaluer la déformabilité de la roche sur l'ensemble du réseau de galeries et ont ainsi fourni à l'ingénieur projeteur les paramètres essentiels pour le dimensionnement du revêtement.

Méthode d'investigation

L'essai de plaque (ou l'essai de charge) en galerie est un essai utilisé couramment dans le cadre de projets de galeries, tunnels et barrages en particulier.

PAR JEAN-LOUIS AMIGUET,
ÉTAGNIÈRES

Il peut fournir un grand nombre d'informations sur la déformabilité de la roche à son emplacement d'exécution. Le problème majeur consiste à définir la déformabilité de la roche dans des zones entre deux essais de plaque. Une interpolation des résultats est exclue, les caractéristiques de la roche pouvant changer brusquement d'un endroit à l'autre.

Tout au plus peut-on se fonder sur le relevé géologique pour définir les tronçons de types de roche à comportement semblable du massif rocheux.

La petite sismique constitue là un moyen très efficace pour apprécier quantitativement les secteurs non examinés par des essais ponctuels. En effet, elle permet de déterminer le module dynamique de la roche le long du profil sismique. Selon le type de roche, elle peut aussi donner l'épaisseur approximative de la zone décomprimée autour de la cavité. Une campagne de petite sismique étant peu coûteuse et d'exécution rapide, on peut donc prévoir de nombreux profils sismiques le long de la galerie.

Pour chaque emplacement d'essai de plaque, les modules de déformation statiques sont comparés aux modules dynamiques et servent de valeur de référence. Une interpolation ou extrapolation quantitative devient ainsi possible. Sur la base de ces résultats, il s'agit ensuite de diviser la galerie en tronçons pour lesquels on définit les paramètres géotechniques.

L'ingénieur projeteur procédera ensuite pour chaque tronçon au dimensionnement du revêtement en appliquant une des méthodes de calcul (fig. 4) avec les données de base suivantes :

- le relevé géologique et hydrogéologique
- les paramètres géotechniques
- les charges du massif rocheux et la pression d'eau dans le cas d'une conduite forcée

- la géométrie de la cavité
- le mode d'excavation.

Dans le cas d'un dimensionnement par des méthodes empiriques, les données de base se limitent pratiquement à la description géologique du massif rocheux.

Les projets hydro-électriques de Maninjau et Tanggari

L'investigation combinée de petite sismique et d'essais de plaque en galerie a été appliquée sur deux sites de projets hydro-électriques en Indonésie, des travaux desquels Electrowatt Ingénieurs à Zurich assurait la direction. Le projet de Maninjau est situé dans la partie sud-ouest de l'île de Sumatra, vers l'exutoire d'un lac qui s'est formé

à l'intérieur d'un volcan éteint. Il comporte une prise d'eau, une galerie d'amenée d'eau de 4 km avec trois galeries d'accès et la centrale électrique. La galerie traverse des formations volcaniques composées essentiellement de tuffes bréchiques, de tuffes arénacés et de lahars.

Le projet de Tanggari se trouve dans une petite vallée à l'extrémité nord-est de l'île de Sulawesi. On distingue également la prise d'eau, la galerie d'amenée d'eau de 1,8 km avec une conduite forcée construite à ciel ouvert et une centrale électrique.

La roche volcanique est composée d'andésite, très peu à fortement altérée, massive à très fracturée et de tuffes cimentés plus ou moins altérés.

Travaux préparatoires

Pour les deux sites étudiés, la campagne d'essais a été effectuée pendant la phase finale des travaux d'excavation. Une grande partie des galeries était donc accessible et a pu être étudiée.

Le choix des emplacements pour les essais de plaque revêt une grande importance. Il s'agit en premier lieu de

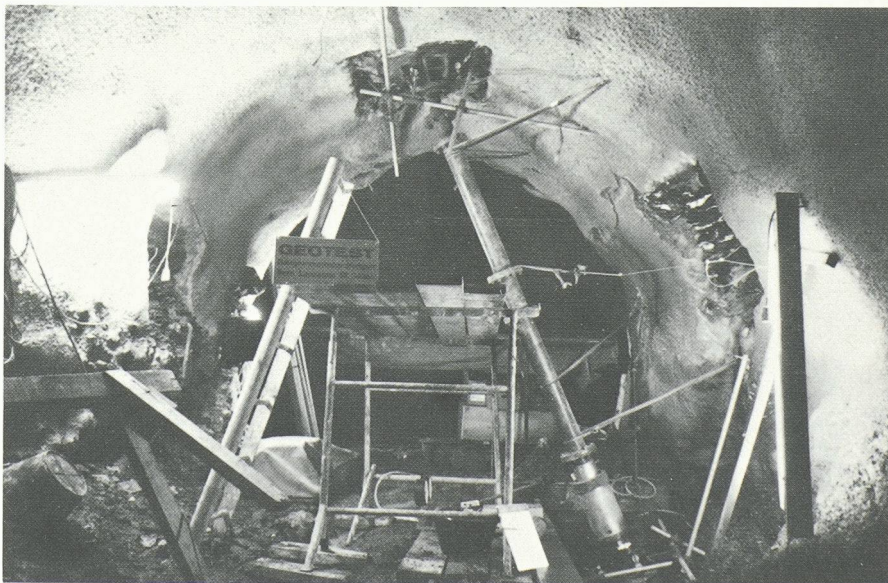


Fig. 1. - Essai de plaque en galerie.

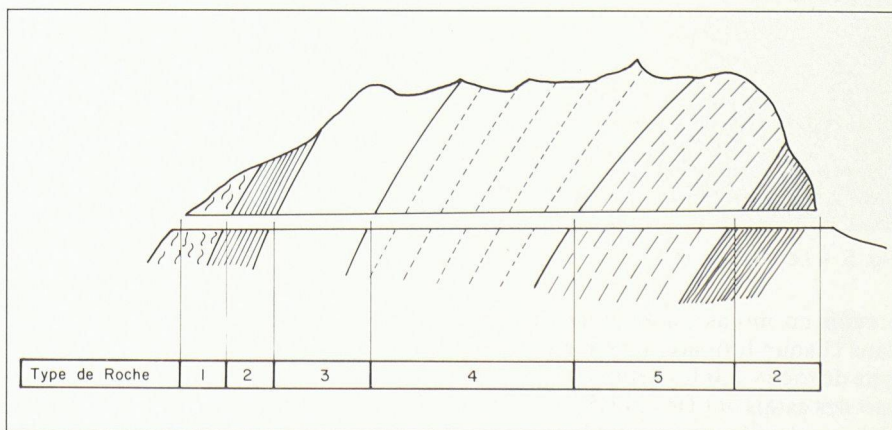


Fig. 2. - Définition des tronçons sur la base de la géologie.

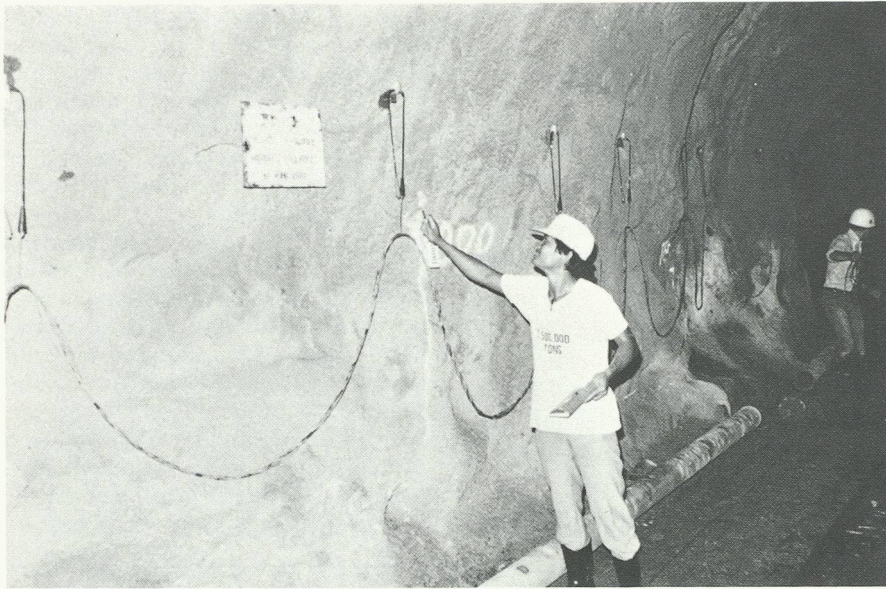


Fig. 3. – Petite sismique: géophones accrochés au parement.

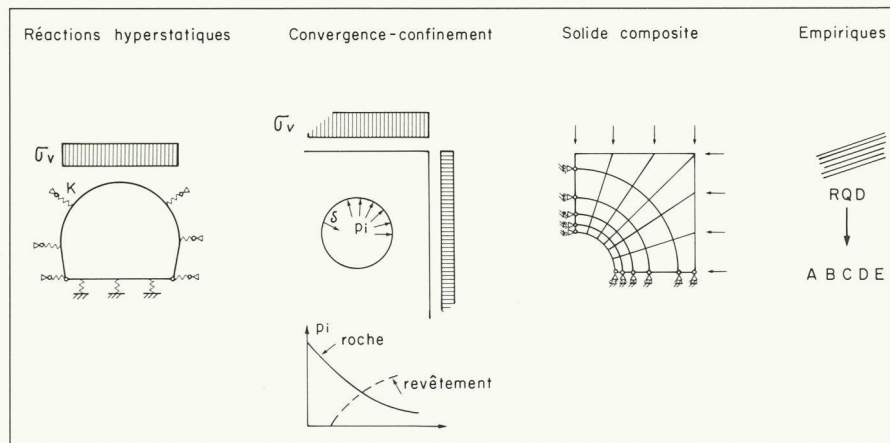


Fig. 4. – Méthodes de calcul du revêtement (selon l'AFTES 1976).

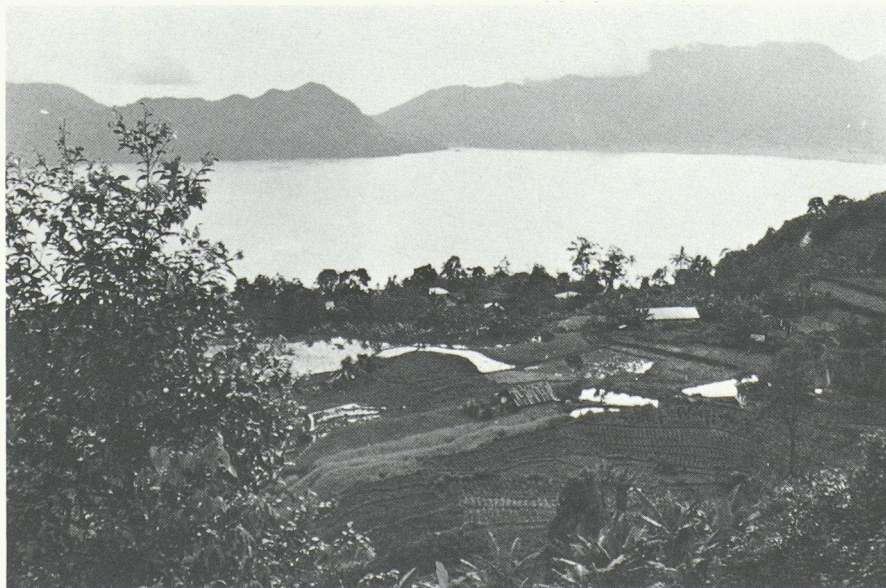


Fig. 5. – Lac de Maninjau.

prévoir au moins un essai significatif dans chaque formation géologique ou type de roche. Sur les deux sites, la plupart des essais ont été réalisés dans des niches préparées à cet effet. Les points d'appui des plaques ont été soigneuse-

ment choisis pour être représentatifs de la roche avoisinante en tenant compte des aspects pratiques d'exécution des essais.

Le programme d'essais de plaque était fondé sur les recommandations de la

Société internationale de mécanique des roches. Il a été maintenu simple, d'une part à cause de l'équipement et de l'outillage disponibles et, d'autre part, nous avons estimé que les informations supplémentaires obtenues avec des essais plus sophistiqués ne compensaient pas le temps de leur préparation. Nous avons notamment renoncé à mesurer les déformations de la roche sous la plaque au moyen de petits extensomètres.

A chaque emplacement d'un essai de plaque, la roche a été examinée par la petite sismique. Cela a permis de comparer les modules dynamiques avec les modules statiques et d'obtenir des valeurs de références.

D'autres bases sismiques ont été réparties le long des galeries existantes en tenant compte des relevés géologiques. Elles ont servi à extrapoler les valeurs statiques sur l'ensemble du réseau de galeries.

Exécution des essais

Essais de plaque

Sur les deux sites, les essais de plaque ont été exécutés par des entreprises indonésiennes, Géotest étant chargé de la surveillance des travaux d'essais et de l'interprétation des résultats.

L'équipement était composé de deux plaques d'appui de 30 cm de diamètre, de la colonne de chargement, d'un vérin de 1000 kN actionné par une pompe à main, du cadre de référence équipé de 2×3 comparateurs pour mesurer les mouvements des plaques d'appui.

Les essais ont été effectués en cinq cycles avec des charges maximales de 150, 250, 350 et 2×450 kN. La charge maximale des deux derniers cycles a été admise sur la base de l'état de contraintes naturel évalué pour le recouvrement maximal de la galerie. Les modules de déformation ont été calculés pour des conditions élastiques selon la formule de Boussinesq.

Nous avons distingué plusieurs modules de déformation :

Module d'élasticité E_{el}

Il est déterminé sur les cycles de décharge. Il a été admis que cette valeur caractérise le comportement élastique du massif rocheux dans son état naturel.

Module de déformation E

Il est déterminé à partir des cycles de chargement primaire pour les lectures de déformations immédiatement après chargement. Du fait de la relative lenteur de la mise en charge par le vérin, ce module est considéré comme un module statique.

Il revêt une certaine importance pour l'ingénieur projeteur dans la mesure où il caractérise le comportement de



Fig. 6. - Site de Tanggari: entrée de la galerie d'amenée d'eau.

la roche décomprimée et disloquée autour de la cavité.

Module de déformation à long terme E_t
Ce module de déformation a été déterminé comme le module précédent, mais en tenant compte des déformations mesurées au bout de 5 à 20 minutes.

Dans le cas étudié, nous pouvions raisonnablement admettre que ces déformations équivalaient grossièrement à 50% de celles à très long terme. La prise en compte de ce problème de fluage est en étroite liaison avec le modèle mécanique adopté pour le dimensionnement du revêtement et avec les propriétés de fluage du revêtement lui-même.

Pour certains essais, en particulier pour ceux effectués en roche tendre, nous avons observé sur la courbe de charge-déformation primaire que le module de déformation était plus petit au début du chargement. Ce phénomène s'explique probablement par la fermeture des fissures qui se sont ouvertes par l'effet du minage.

Petite sismique

Les essais de petite sismique ont été effectués par Géotest sur le site de Maninjau et par l'Université de Bandung sur celui de Tanggari.

L'équipement était composé d'un sismographe à mémoire de 12 canaux avec le nombre correspondant de géophones. Ceux-ci ont été placés à intervalles de 1,2-3,0 m le long du radier ou accrochés au parement de la galerie. L'onde sismique était provoquée par un coup de masse de 4 kg sur la roche ou sur une plaque métallique posée sur le radier. Elle a été placée à chaque fois aux deux extrémités et au centre de la flûte.

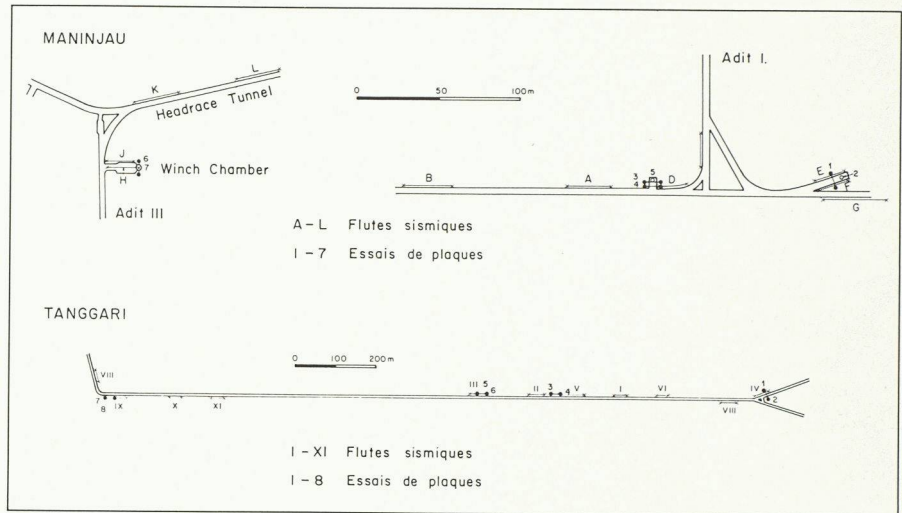


Fig. 7. - Emplacements des essais de plaque et de petite sismique.

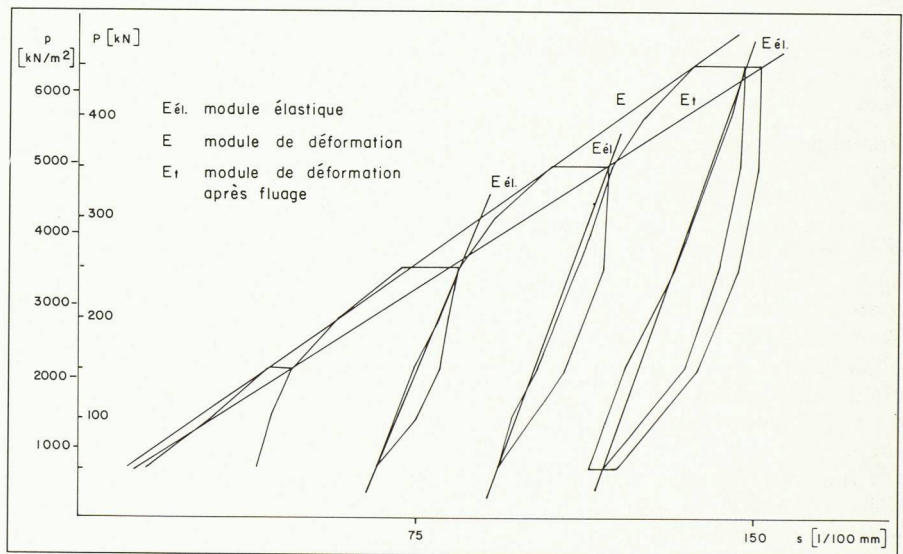


Fig. 8. - Essai de plaque: cycles de charge-décharge.

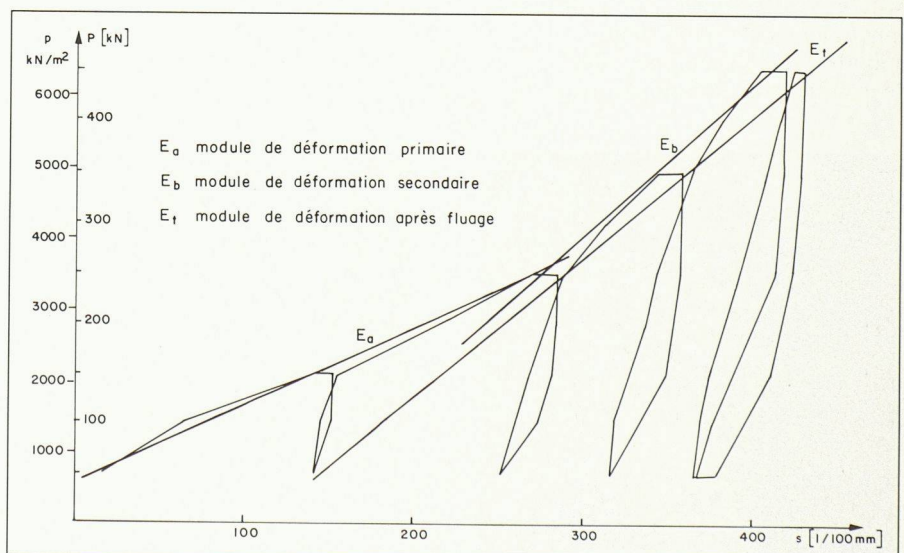


Fig. 9. - Essai de plaque: cycles de charge-décharge.

En modifiant le dispositif de la source de l'onde, il a été possible de distinguer les temps de parcours des ondes longitudinales et transversales et à calculer ainsi le module dynamique de la roche. Dans la plupart des cas, l'essai avec l'onde de choc partant du centre de la flûte a permis de déterminer l'ordre de

grandeur de la zone disloquée autour de la galerie. Dans le cas présent, cette zone était définie par la décompression élastique du massif ainsi que par l'ouverture de fissures par le minage. L'épaisseur de la zone affectée par l'altération de la roche était trop faible et l'onde sismique qui suivait cette zone

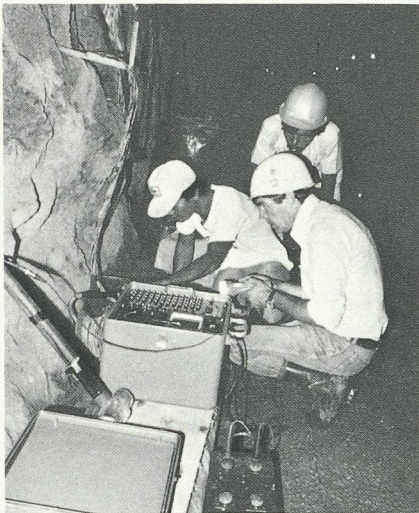


Fig. 10. - Sismographe à 12 canaux.

jusqu'au prochain géophone ne pouvait être détectée.

Résultats et interprétation

Les résultats sont donnés sous la forme de tableaux où sont reportés les modules de déformation et l'épaisseur de la zone disloquée pour les divers types de roche.

Pour le site de Maninjau, les valeurs obtenues par les essais ont été attribuées relativement aisément aux types de roche définis par le géologue du site.

On remarque que les mesures effectuées par la petite sismique ont révélé pour les tuffes bréchiques des zones présentant une grande dispersion des modules dynamiques. Pour la zone avec les valeurs élevées, nous ne disposons d'aucune valeur statique du fait que les emplacements des essais de plaque ont été choisis avant tout

TABLEAU 1. - Déformabilité de la roche et épaisseur de la zone disloquée : site de Maninjau

GÉOLOGIE/ PÉTROGRAPHIE		E_{DYN} $MN \cdot M^{-2}$	$E_{ÉL}$ $MN \cdot M^{-2}$	E $MN \cdot M^{-2}$	E_T $MN \cdot M^{-2}$	E CM
TUFFES BRÉCHIQUES 1	MIN	6700	3000	1200	1000	40
	MAX	10800	5500	2900	2500	120
TUFFES BRÉCHIQUES 2	MIN	13000	-	-	-	80
	MAX	17000	-	-	-	-
TUFFES ARÉNACÉS	MIN	2700	~2000	~2000	~770	-
	MAX	5200	-	-	-	-
LAHARS BRÉCHIQUES	MIN	5600	2000	220	200	60
	MAX	9200	2800	820	800	150

TABLEAU 2. - Déformabilité de la roche et épaisseur de la zone disloquée : site de Tanggari.

A		B		C	
KM		KM		KM	
0.215 - (0.455)	240 M	0.000 - 0.215	215 M		
		(1.034) - 1.061	27 M	1.061 - 1.080	19 M
		1.080 - 1.159	79 M	1.159 - 1.208	49 M
		1.208 - 1.252	44 M	1.252 - 1.294	42 M
		1.294 - 1.544	250 M	1.544 - 1.712	168 M
		1.712 - (1.735)	23 M		
	240 M		638 M		278 M

dans des zones rocheuses de moindre qualité.

Pour compléter ces valeurs, on pourrait évaluer grossièrement un module élastique sur la base du diagramme de la figure 14, qui présente une comparaison des modules statiques et dynamiques pour les autres emplacements d'essais. Le diagramme indique un

module statique équivalant à environ la moitié du module dynamique.

Sur le site de Tanggari, nous avons défini trois types de roche sur la base de la description géologique et des caractéristiques géotechniques obtenues par les essais *in situ*. Ainsi, à chaque tronçon de la galerie, on attribue des valeurs de déformabilité.

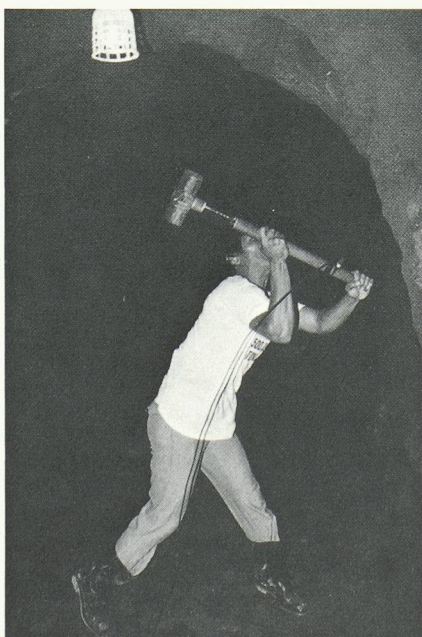


Fig. 11. - Petite sismique: coup de masse sur le parement.

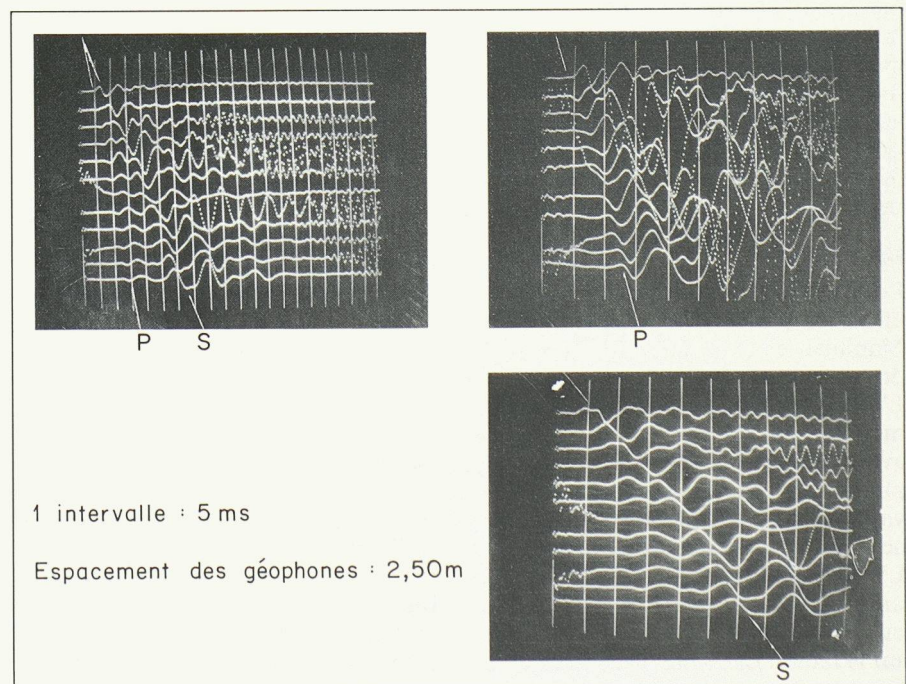


Fig. 12. - Petite sismique: enregistrement des ondes P et S.

Les valeurs indiquant l'épaisseur de la zone disloquée ont une dispersion relativement grande. Les deux raisons principales en sont les suivantes :

La première concerne la *technique d'essai*. L'écartement des géophones près de la source est relativement grand ; la détermination de la vitesse de l'onde à travers la zone disloquée est donc fondée sur quelques points de mesure seulement. L'hétérogénéité et la fissuration de la roche empêchent d'obtenir de meilleurs résultats en rapprochant les géophones. De meilleurs résultats, dans le cas de roches plus homogènes, peuvent être obtenus en recourant par exemple à la méthode d'ultrason.

La deuxième raison concerne la *zone décompressée ou disloquée autour de la cavité*. Cette zone résulte de trois phénomènes indépendants (fig. 15) :

- la déformation élastique ou plastique de la roche au bord de la cavité définissant une zone décompressée
- l'effet du minage qui provoque une dislocation de la roche
- l'altération physico-chimique de la roche due aux conditions atmosphériques dans la galerie.

Pour chaque phénomène, la limite de la zone vers l'intérieur du massif est progressive. La définition de l'épaisseur de la zone décompressée ou disloquée est donc relativement arbitraire. La connaissance de l'étendue de cette zone autour de la cavité est néanmoins importante pour l'ingénieur projeteur, en particulier dans le cas d'une conduite forcée où une forte pression est exercée depuis l'intérieur de la galerie sur le revêtement et le massif rocheux. Dans ce cas, la déformabilité de la roche dans cette zone sera caractérisée par le module de déformation obtenu par la courbe de chargement primaire dans les essais de plaque.

Si la roche est facilement altérable, et qu'elle n'ait pas été protégée par du béton projeté par exemple, il faudra diminuer sensiblement les valeurs de déformabilité obtenues par les essais de plaque qui sont habituellement effectués sur la roche saine.

La déformabilité du massif en dehors de la zone décompressée est donnée par le module élastique, cela pour autant que l'on peut admettre un comportement élastique du massif et que, avec l'essai de plaque, on arrive à rétablir les conditions originelles de la roche par les chargements cycliques. Ces conditions ne sont par exemple pas remplies pour des essais effectués sur la roche altérée pour laquelle les propriétés géotechniques sont définitivement modifiées.

Conclusions

Les deux campagnes d'essais en galerie ont montré que l'application conjointe des essais de plaque et de la

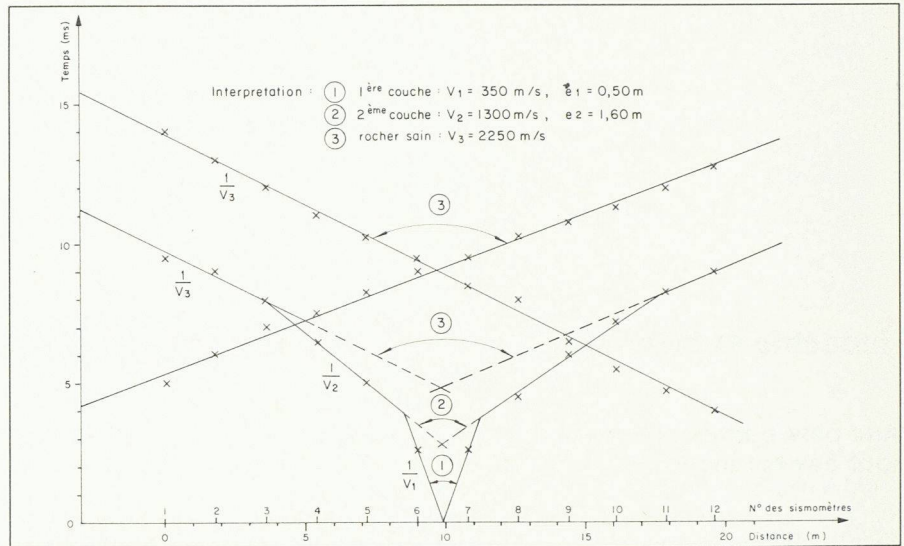


Fig. 13. - Petite sismique: détermination de l'épaisseur de la zone disloquée.

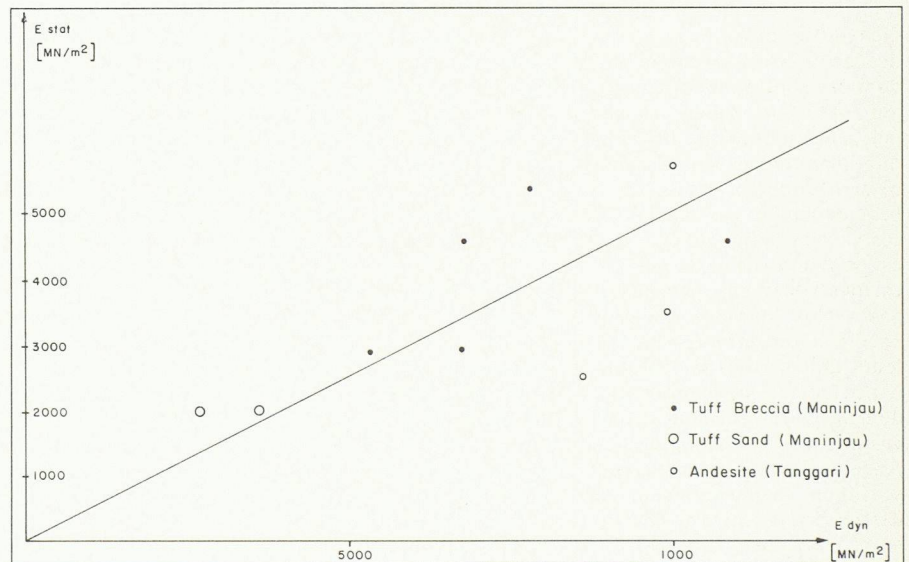


Fig. 14. - Relation module élastique/statique-module dynamique.

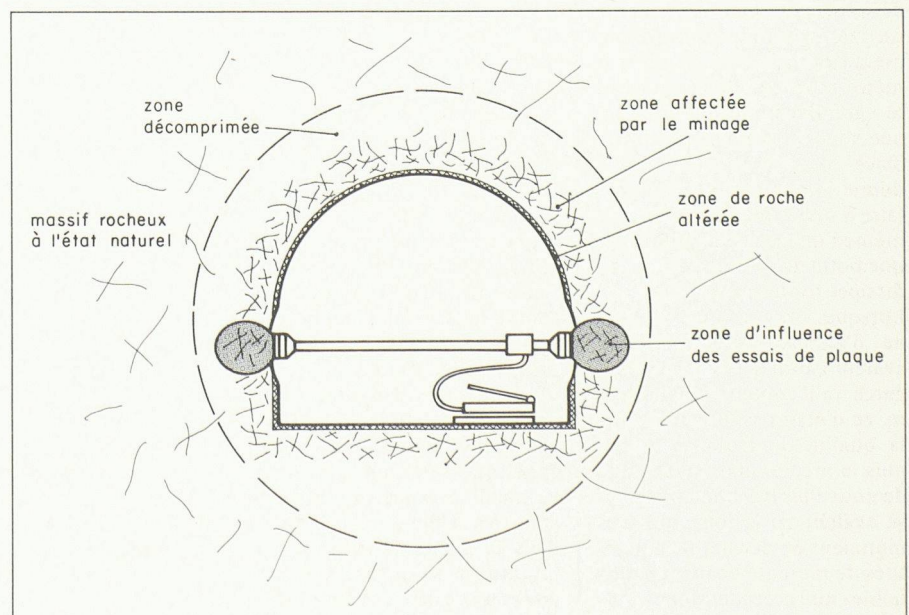


Fig. 15. - Zones rocheuses autour d'une cavité.

petite sismique donne un optimum d'informations pour le dimensionnement du revêtement de la galerie. Les essais de plaque fournissent les diverses valeurs de déformabilité de la

roche, alors que la petite sismique permet de les extrapoler sur l'ensemble du réseau de galeries et fournit, en plus, un ordre de grandeur de l'épaisseur de la zone disloquée autour de la cavité.

Adresse de l'auteur :
Jean-Louis Amiguet
Ingénieur civil EPF/SIA
Géotest SA
1037 Etagnières

Industrie et technique

Aux plus petites concentrations, tout devient incertain

S'il nous est arrivé, naguère, d'inhaler de l'air vicié sans nous en apercevoir, nous nous en consolerons aujourd'hui en sachant que chaque mètre cube de cet air contenait, hier après-midi par exemple, 18 μg de dioxyde de soufre, 54 μg d'oxyde d'azote et 47 μg d'ozone. Ces données sont publiées chaque jour. A Tokio, depuis dix ans déjà, elles sont même affichées quotidiennement sur des panneaux lumineux. Mais on a beau demander aux Japonais si ces valeurs indiquent que l'air est bon ou mauvais, la réponse est invariablement : « On ne sait pas. » Nos journaux ajoutent encore à ces mesures les valeurs limites fixées par l'Ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPA), ainsi que les niveaux d'alerte au smog de Los Angeles. Les valeurs mesurées se situent le plus souvent en dessous ou au niveau des valeurs OPA, ce qui procure le sentiment rassurant qu'il y a encore de la marge, puisque les cotes d'alerte au smog sont supérieures de trois à quatre fois à ces valeurs limites.

En revanche, on sait moins bien définir ce que signifie en réalité un microgramme (un milliardième de gramme ou μg) par mètre cube. Le seul fait que cette « grandeur » ne soit pas donnée sous la forme d'un chiffre placé loin après une virgule donne l'impression qu'on a affaire à une « quantité » ; en fait, même l'image de l'aiguille dans une botte de foin ne suffit pas à dissiper toute incertitude.

Lorsque, il y a une vingtaine d'années, les Américains avaient banni le fromage suisse parce qu'il contenait du mercure, ce n'était pas dû au fait que la qualité du fromage n'était plus la même, mais au fait que de nouvelles méthodes d'analyse avaient vu le jour, qui permettaient de déceler des quantités de mercure beaucoup plus faibles que précédemment. Aujourd'hui, les choses en sont au point que, selon un spécialiste,

on est en mesure de détecter partout des traces de n'importe quelle substance.

Que signifie « valeur limite acceptable » ?

Une chose est claire : il s'agit d'empêcher les émissions d'atteindre le niveau de la nocivité. Toutes les émissions, et donc leurs corollaires, les immissions, doivent être limitées de telle sorte qu'elles ne comportent pas de danger pour la santé humaine. Mais voilà une notion bien difficile à transposer en chiffres précis : Pendant combien de temps une personne a-t-elle subi une immission ? Qui est un « être humain en bonne santé » ? L'objectif n'en est pas moins ambitieux : on fixe des valeurs limites d'immission après avoir dûment pris en considération le principe de la prévention, ainsi que les effets provoqués par les substances atmosphériques polluantes même sur des groupes humains particulièrement sensibles. Les valeurs limites d'émission, fixées de façon analogue, doivent donc être renforcées lorsque les valeurs d'immission, qui servent d'étalon de mesure de l'ensemble de la charge polluante, sont dépassées.

Il est d'autres limites dont on pourrait aussi tenir compte, comme le caractère supportable pour l'économie, ou l'état d'avancement de la technique. Mais elles laissent une telle marge d'interprétation... Pour l'instant, quoi qu'il en soit, elles semblent être totalement passées sous silence par les médias. A cela vient s'ajouter le dépérissement des forêts, dont on cherche généralement les causes dans les polluants atmosphériques. Or on n'a pas encore établi avec certitude quels sont les éléments à l'œuvre dans ce phénomène. Mais peu importe, c'est apparu suffisant aux yeux de certains pour introduire dans l'OPA des seuils sensiblement inférieurs à ceux

des prescriptions correspondantes de la RFA.

Les mesures exigent une précision scientifique

A propos de qualité de l'air, qui donc s'intéresse à la façon dont ces valeurs doivent être mesurées ? Certes, aux substances limites sont attribuées des valeurs limites qui doivent être faciles à mesurer. Ce n'est pas un hasard : de nombreux spécialistes estiment en effet que, de cette manière, on fait moins l'inventaire des substances nuisibles à la santé que celui des substances faciles à mesurer. Même pour un éventail ainsi simplifié, la règle veut toutefois qu'on ne compare entre elles des mesures effectuées en des lieux différents que si elles ont été effectuées de façon rigoureusement identique : mêmes intervalles de prélèvement, même hauteur au sol, éloignement des sources de pollution parasite (gaz d'échappement de voitures, par exemple), mêmes systèmes de mesure.

Il n'empêche que, en dépit du fait que les valeurs ne portaient que sur des quantités allant de 30 à 100 μg - autrement dit de 0,000030 à 0,000100 g -, les mesures de contrôle ont indiqué une marge d'erreur d'environ 10%.

Qui est autorisé à mesurer et à publier les résultats ?

Notre Ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPA) n'est pas assez précise sur ce point. En fait, la compétence en matière d'application a été confiée aux cantons. Dès lors existe le danger que chaque canton développe son propre modèle d'application et que les techniques de mesure utilisées ainsi que l'enregistrement des résultats en viennent à varier d'un lieu à l'autre. Il s'agit d'empêcher une telle évolution, car les résultats des mesures doivent demeurer comparables, ne serait-ce que pour disposer de critères d'assainissement raison-

nables pour les installations existantes.

Une telle exigence est particulièrement légitime en ce qui concerne les installations industrielles, puisque des mesures représentatives ne peuvent être effectuées et interprétées correctement que si l'on dispose également de bonnes connaissances sur les installations que l'on doit contrôler. Le 20 mars 1986, le conseiller national Kurt Schule avait demandé que soit formé un groupe de travail axé sur la pratique pour s'occuper de ces problèmes. Sa proposition est restée sans écho. Serait-ce encore le cas aujourd'hui ? Au contraire, en République fédérale d'Allemagne, pays qui, d'une manière générale, fait figure de modèle en matière de préservation de la qualité de l'air, la commission des Länder pour la surveillance des immissions a assorti les méthodes de mesures d'un certain nombre de conditions :

- compétences spéciales
 - fiabilité et organisation
 - indépendance
 - neutralité de la présentation.
- L'essentiel de ces méthodes a en outre été défini.

La signification des résultats de mesures

Cet ensemble de problèmes revêt une grande importance pour l'industrie et l'artisanat. Car, en se fondant sur des résultats de mesure, les autorités peuvent imposer aux entreprises des dépenses d'assainissement considérables. De toute façon, une publication sans points de référence, voire la déformation partielle des résultats de mesures faites sont politiquement dangereuses, par l'effet qu'elles produisent sur le public. C'est ce qu'a clairement démontré le caractère confus des communiqués officiels sur les taux de radiation, diffusés après l'accident de Tchernobyl.

(Infochimie)