

Chapitre II

Programme expérimental et procédures d'essais

II.1 Introduction :

Le programme expérimental a été réalisé dans deux laboratoires différents et qui sont : le laboratoire de pédagogie du département de génie civil de la faculté de Technologie de l'Université de M'sila et le laboratoire de recherche de GEO-MATERIAUX. Ce programme est réparti en deux parties.

II.2 Sol non traité :

a) Essais d'identifications :

- L'analyse chimique.
- La teneur en eau.
- Le poids volumique sec et humide.
- La granulométrie (par tamisage et par sédimentométrie).
- Les limites d'Atterberg.
- L'essai au bleu de méthylène.

b) Essais de caractérisation :

- Proctor normal.
- Proctor modifié.
- Essai C.B.R. immédiat et après imbibition.
- Essais ultrasoniques.

II.3 Sol traité :

c) Essais d'identifications :

- Les limites d'Atterberg.
- L'essai au bleu de méthylène.

d) Essais de caractérisation :

- Proctor normal.
- Proctor modifié.
- Essai C.B.R. immédiat et après imbibition.
- Essais ultrasoniques.

N.B : Les procédures expérimentales suivies dans chaque type d'essai ont été conformes au tant que possible aux méthodes d'essais en vigueur. (N.A)

II.2 Sol non traité :

II.2.1 Essais d'identifications :

II.2.1.1 analyse chimiques :

Le but de cet essai est de déterminer la nature chimique des échantillons choisis. Cette étape étant importante dans l'identification des matériaux locaux utilisés en construction.

II.2.1.2 Paramètres d'état:

Ils comportent :

a) La teneur en eau (NF P 94-050) :

C'est le rapport de la masse de l'eau contenue dans le sol (m_w) sur la masse des grains solides (m_d) qui le constituent exprimé en pourcentage : $w(\%) = \frac{m_w}{m_d} \times 100$

L'essai est effectué sur échantillon intact ramené directement du site.

b) Les poids volumiques sec et humide (NF P 94-053):

La masse volumique d'un sol (γ) est le quotient de la masse (m) du sol par le volume (V) qu'il occupe (y compris les fluides interstitiels : air + eau). Dans ce cas, l'utilisation d'un carottier a été préconisée, qui consistait au respect les étapes de la norme.

La masse volumique d'un sol (γ_d) est le quotient de la masse des grains solides (m_s) du sol par le volume (v) qu'il occupe. La masse volumique sèche peut être obtenue comme le rapport du poids volumique humide par l'unité plus la teneur en eau ($\gamma_d = \gamma_h / (1 + w)$).



Figure II.1: Détermination du poids volumique humide

II.2.1.3 Analyse granulométrique :

a) Par tamisage (NF P 94-056) :

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série des tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse (figure II.2).

b) Par sédimentométrie (NF P 94-057) :

Les particules inférieures à 80 μm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'une défloculation. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et de la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données (figure II.2).

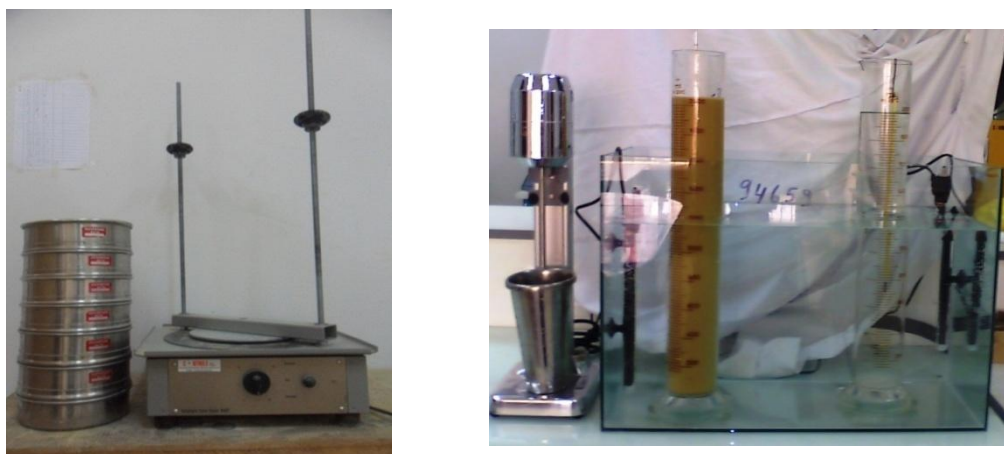


Figure II.2: Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).

II.2.1.4 Les limites d'Atterberg (NF P 94-051):

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité (W_L),
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (W_P).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence $I_p = W_l - W_p$ qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon (Figure II.3).



Figure II.3: Appareillage de limites d'Atterberg.

II.2.1.5 L'essai au bleu de méthylène (NF P 94-068) :

L'essai est réalisé sur la fraction 0/0.08 mm, il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanence agitation. La valeur de bleu VBs est la quantité de bleu méthylène absorbé

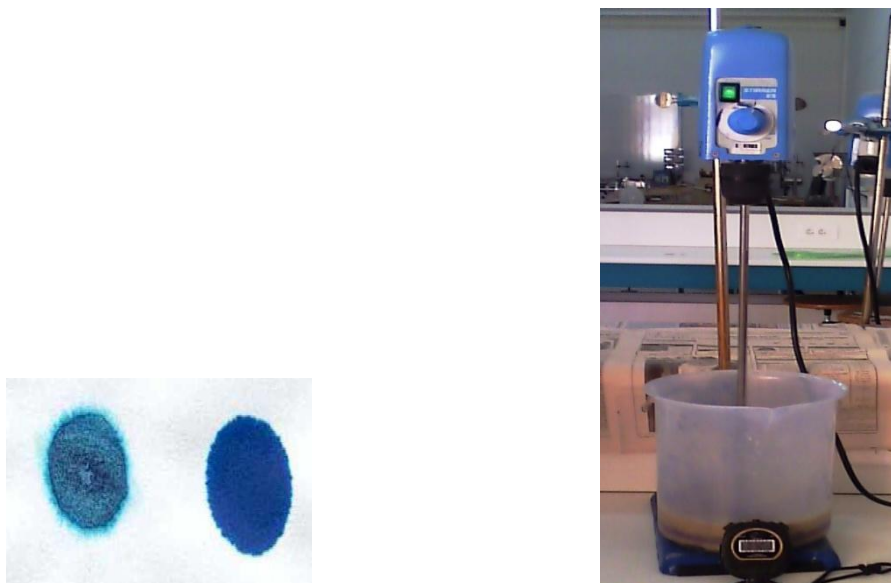


Figure II.4 : Appareillage de l'essai au bleu de méthylène.

A titre d'identification le tableau représente les valeurs de bleu de quelques sols.

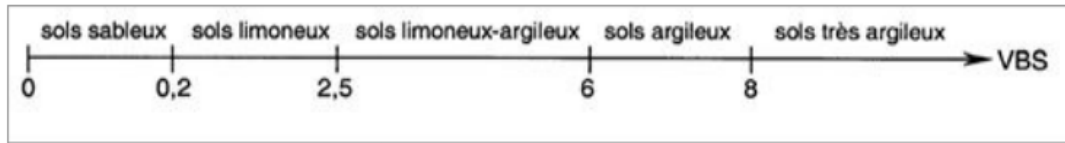


Figure II.5: Valeurs de bleu de quelques sols.

II.2.2 Essais de caractérisation :

II.2.2.1 Essai Proctor normal et modifié (NF P 94-093):

L'essai Proctor est un essai de compactage exécuté en laboratoire qui a pour but de déterminer l'influence de la teneur en eau (w exprimée en %) d'un matériau sur sa compactibilité (exprimée par la masse volumique sèche γ_d en g/cm³ ou en kg/m³).

L'essai a été effectué à l'aide de Compacteur automatique digital Proctor/CBR

Conditions d'essai:

Le matériau est porté à la différente teneur en eau et chacun des mélanges est ensuite compacté par couche dans un moule cylindrique au moyen d'un marteau compacteur automatique de dimension et de masse normalisée que l'on laisse tomber librement d'une hauteur normalisée. la masse volumique sèche de l'échantillon ainsi compacté est déterminée pour chaque teneur en eau.

$$\text{«Énergie» de compactage (exprimée en kNm/m}^3\text{)} = (N \times H \times m \times g) / v$$

où :

N est le nombre total de coups ;

H est la hauteur de chute de la dame ;

m est la masse de la dame ;

g est l'accélération de la pesanteur ; V est le volume du matériau compacté dans le moule



Figure II.6 : Appareil de l'essai Proctor .



Figure II.7 : Echantillonnage avant compactage .



Figure II.8 : Echantillons après compactage .

II.2.2.2 Essai de portance C.B.R (NF P 94-078):

L'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements,

l'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage des deux rapports ainsi calculés.

a) Essai C.B.R immédiat :

On pose l'éprouvette sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et on procède au poinçonnement de la manière suivante :

Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston, à l'aide des dispositifs prévus sur la presse jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau.

Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon (figure II.9).

Noter les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements suivants : 0,625 ; 1,25 ; 2 ; 2,5 ; 5 ; 7,5 et 10 mm.

L'indice recherché est par conversion la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$= \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN)} \times 100}{13,35}$$

$$= \frac{\text{Effort de pénétration à 5.0 mm d'enfoncement (KN)} \times 100}{19,93}$$



Figure II.9 : Appareil de poinçonnement (essai CBR).

b) Essai C.B.R après imbibition :

Après quatre (4) jours d'immersion (± 2 h) on mesure la hauteur de gonflement Δh indiquée par le comparateur, on extrait l'ensemble hors du bac d'immersion en observant un temps d'égouttage de 15 minutes puis on dépose le trépied, le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement (figure II.8). La même procédure que la détermination de l'indice C.B.R Immédiat.

La valeur de déformation de l'éprouvette g , exprimé en pourcentage :

$$g(\%) = \left(\frac{\Delta h}{h} \right) \times 100$$

On suivra la même procédure que celle de la détermination de l'indice C.B.R immédiat.



Figure II.10 : Imbibition des échantillons (essai CBR).

II.2.2.3 Essais ultrasoniques :

II.2.2.3-1 Introduction :

Le son se déplace dans les solides, les liquides et les gaz à différentes vitesses. Cette vitesse est appelée vitesse de propagation(v) ou célérité (c). Elle est constante dans un milieu donné. Les ultrasons sont des ondes élastiques dont la fréquence est comprise entre 15KHz environ et quelques centaines de Mégahertz. En deçà de cette bande, il s'agit de sons ou d'infrasons et au-delà de cette il s'agit d'hypersons.

II.2.2.3-2 Objet et champ d'application des ultrasons :

Le domaine de l'auscultation ultrasonique constitue un secteur spécifique d'activité. Il renferme ses propres structures professionnelles qui regroupent: industriels, fabricants, distributeurs spécialisés, sociétés de services et organismes d'étude et de formation. Le champ d'application de cette technique ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel. Actuellement cette technique est utilisée dans divers domaines tels que; le nucléaire, l'aéronautique, l'aviation, l'instrumentation industrielle, le contrôle de qualité, le forage, les mines, le génie côtier, et maritime, la mécanique des roches et des sols et même dans les domaines scientifique et médical.

Il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, mais le caractériser et mettre en évidence des hétérogénéités ou des irrégularités de propriétés telles que, variation locale de propriété physique ou chimique, variations de microstructure, de texture ou de rugosité.

II.2.2.3-3 Dispositif expérimental :

L'auscultation ultrasonique permet de localiser le volume des vides, les pores, les fissures ou toutes autres malfaçons dans l'éprouvette de sols. Cette méthode est basée sur la très faible

transmission de l'énergie des ultrasons au travers d'une lame d'air emprisonnée dans le matériau. Le test a pour but de mesurer le temps de propagation de la première impulsion d'un train d'onde deux points. L'onde est émise à partir d'un premier transducteur. Après une distance de parcours (L) et un temps de propagation (t) dans l'éprouvette de sol, l'onde atteint un second transducteur électro-acoustique qui va convertir l'onde en un signal électrique.

La fréquence d'un son est le nombre de vibration effectué par seconde (1Hertz=1vibration par seconde) La norme EN12504- préconise d'utiliser une fréquence propre des transducteurs compris entre 20KHz et 150KHz

La vitesse de propagation de l'onde sonore dans l'éprouvette du sol est : $v = L/t$. L'analyseur utilisé a une précision de l'ordre de la micro- seconde.

A titre de comparaison, le tableau : II-1 donne la vitesse phase de ces ondes dans quelques milieux

Matériau	Masse Volumique (g/cm ³)	Vitesse des Ondes Longitudinales (m/s)
Aciers	7,8	5900
Air (sec, 20°)	1,3.10 ⁻³	330
Aluminium	2,7	6300
Araldite	1,2	2500
Béton	2,5	4500
Béton bitumineux	2,3	1850
Cuivre	8,9	4700
Eau (20°)	1,0	1480
Eau (0°)	1,0	1430
Fonte	7,2	4600
Glycérine	1,3	1900
Huile	0,8	1500
Hydrogène (0°)	0,09.10 ⁻³	1300
Laiton	8,5	4500
Mercure	13,6	1450
Muscle	1,0	1600
Pétrole	0,8	1330
Plexiglas	1,2	2700
Quartz	2,7	5750
Titanate de Baryum	5,7	5400
Verre	2,5	5650
Zirconium	6,4	5650

Tableau : II.1 Valeur de vitesses ultrasoniques moyennes arrondies

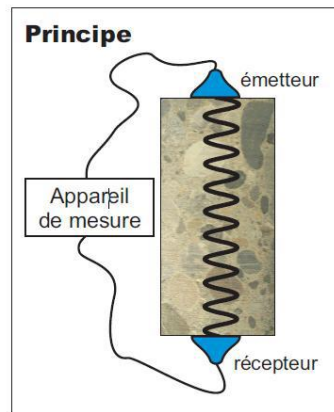


Figure II.11 : Mesure par ultrasons

II.2.2.3-4 Les avantages principaux de mesure par ultrasons :

Les méthodes de contrôle non destructif sont nombreuses. Le contrôle par ultrasons est fréquemment utilisé car il présente de nombreux avantages :

- ✓ facilité de mise en œuvre;
- ✓ mesure directe sans passer par des algorithmes de calcul;
- ✓ réponse rapide usuellement en fraction de seconde;
- ✓ très bonne résolution;
- ✓ possibilité de travailler sur une seule face de la pièce à contrôler (pas besoin d'un accès à la deuxième face);
- ✓ capacité à traverser d'importantes épaisseurs de matière en fonction de la fréquence de travail;
- ✓ existence de relations entre la propagation des ultrasons et les caractéristiques du matériau;
- ✓ possibilité de caractériser des matériaux afin d'en connaître les propriétés élastiques
- ✓ contrôler les pièces pour vérifier leur intégrité.

d'élaboration (inclusions, soufflures, défauts de collage...) ou d'endommagement dû aux sollicitations (fissures...) [9]

II.2.2.3-5 Vitesse de propagation des ultrasons :

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément à contrôler.

Après avoir franchi une longueur de parcours (L) dans le matériau, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores (t).

La vitesse de propagation des ultrasons est donnée par la formule : $v=L/t$

Avec : L = longueur de parcours

t = le temps de propagation des ondes ultrasonores.

II.2.2.3-6 Méthodes de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons :

II.2.2.3-6-1 Mesures en transparence directe:

Utilisées dans le cas des éprouvettes, les transducteurs (émetteur et récepteur) sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.

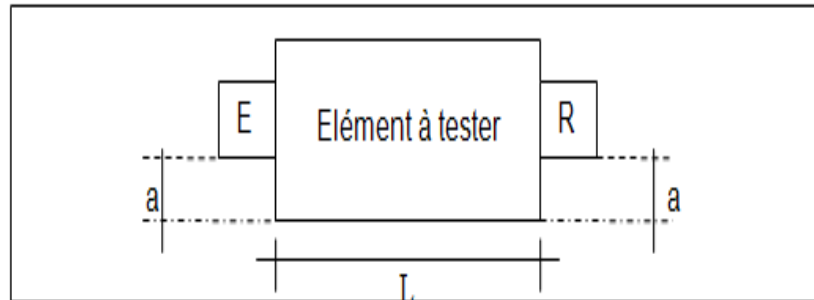


Figure II.12 Mesures en transparence directe

II.2.2.3-6-2 Mesure en surface :

L'émetteur est maintenu en un point fixe ; le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.

Après avoir porté graphiquement les temps et les distances, on trace la droite moyenne de ces différents points dont la pente correspond à la valeur de la vitesse du son dans le milieu considéré.

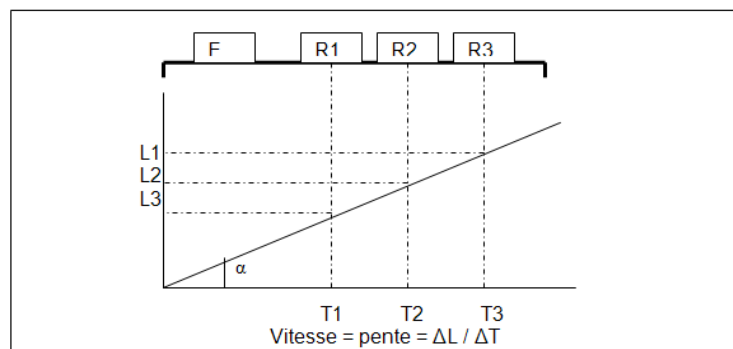


Figure II.13 Mesure en surface

II.2.2.3-6-3 Mesures en transparence par Rayonnement :

Cette méthode consiste à placer l'émetteur en un point fixe, et sur la face opposée ou perpendiculaire, on déplace à intervalle constant le récepteur sur une ligne.

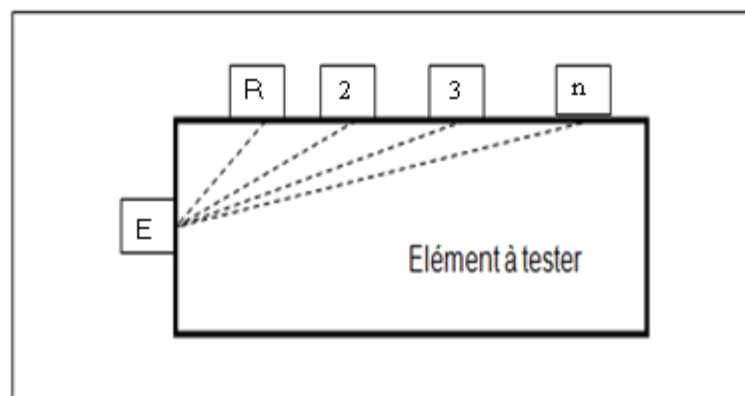


Figure II.14 Mesure en transparence par rayonnement

II.2.2.3-7 Protocole expérimentale :

II.2.2.3.7.1 Introduction :

Les méthodes ultrasonores consistent, en général, en la mesure du temps de vol d'une impulsion se propageant sur une distance connue dans un milieu donné. Si le milieu support de la propagation est non dispersif, ce temps est relié simplement et directement à la vitesse de phase. Mais dès que l'on considère un milieu dispersif, le sens physique de la vitesse mesurée devient incertain. L'objet de cette étude est d'essayer de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasoniques traversant des éprouvettes de sol non traité et traité à différents dosages en ciment. [10]

II.2.2.3.7.2 Mesure du temps de propagation par ultrason :



Figure II.15 L'appareil de l'ultrason utilisé

- **Spécifications**

L'appareil d'auscultation sonore 58-E4900 comporte un boîtier robuste, un écran tactile rétro éclairé 5.7" rendant aisée l'utilisation de l'appareil.

Ses caractéristiques :

- Ecran tactile multifonction 5.7"
- Echantillonnage 2MHz, résolution 12bit
- 7 amplifications de gain
- 8 filtres low-pass de fréquence
- Traitement évolué du signal (temps de propagation, forme d'onde, FFT, SonReb)
- Taux d'impulsion au choix 1, 2, 5, 10 par seconde
- Puissance d'émission 2500V
- Temps de propagation jusqu'à 16ms, résolution 0.1µs
- carte Mémoire
- Sortie RS232 et USB pour connexion PC et impression ultérieure
- Fonctionnement sur batteries internes rechargeables (7.2 Ah) autonomie jusqu'à 9 heures.

- **Présentation**

L'appareil est livré avec transducteur d'émission et de réception (l'une des sondes comporte un bouton d'échantillonnage), câbles, barreau de calibrage, produit couplant et boîtier de transport.

II.2.2.3.7.3 Applications :

- ✓ Mesure de la vitesse du son des matériaux de construction tel que béton, maçonnerie, pierre, et de bois
- ✓ Détermination de la qualité des matériaux avec recherche d'hétérogénéité, de vides, et de fissures.
- ✓ Localisation de zones ayant subies des agressions externes

II.2.2.3.7.4 Principe de mesure :

Le principe utilisé est celui de la mesure du temps de propagation (t) des ondes longitudinales dans le matériau.

Les deux sondes sont appliquées l'une en face de l'autre contre la surface de l'éprouvette, et le temps de propagation est lu sur l'affichage digital en microsecondes.

Connaissant la distance (L) parcourue par les ondes, on en déduit une vitesse (v) :

Avec $v=L/t$

v : exprimée le plus souvent en mètres par seconde (m/s)

II.2.2.3.7.5 Contrôles du calibrage :

L'appareil d'auscultation utilisé est un modèle numérique.

Avant chaque emploi, il est recommandé de contrôler la calibration.

Le temps de passage des ultrasons à travers l'éprouvette étalon (éprouvette de calibration) est de $56.3 \mu\text{s}$.

II.2.2.3.7.6 Type de mesure (mesure en transparence direct) :

Le capteur est placé face à l'émetteur, ce qui fait que la distance entre les centres des sondes (ou bien la distance parcourue par les sondes) est égale à l'épaisseur de l'élément ausculté (fig. II.16).

C'est le type de mesure le plus utilisé et qui fournit plus de précision du temps de propagation des ondes.

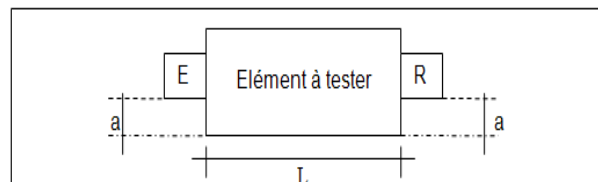


Figure II.16 Mesures en transparence direct

II.2.2.3.7.7 Réparations de la surface des points d'essai :

Avant de faire l'essai de n'importe quel point, on doit :

- Marquer les points de mesure sur la surface de l'élément (particulièrement si on emploie la mesure par transparence pour avoir les deux sondes sur le même axe).
- Enduire la surface de l'élément avec de la vaseline (ou une autre matière qui donne un bon couplage acoustique) sur les points de mesure.

II.2.2.3.7.8 Mesures des temps de propagation d'ondes longitudinales :

- On applique une couche épaisse de gel de branchement pour ultrasons sur les faces frontales des sondes à ultrasons, puis on appuie fermement les sondes sur la partie frontale de l'éprouvette.
- On mesure le temps de propagation (t) du début de l'impulsion d'émission au début de l'impulsion de réception et on consigne les résultats dans un tableau.

II.3 Sol traité:

On effectue le même processus que des essais précédents (sans traitement), mais cette fois-ci en ajoutant en ciment de: 2% ; 4% ; 6% ; 8%; 10%; et 12%, qui concerne les essais suivants :

- Les limites d'Atterberg.
- L'essai au bleu de méthylène.
- Essai C.B.R. immédiat et après imbibition.
- Essais ultrasoniques.