

**Etude en vue de la modification des normes
SN 670 320b Essai CBR en laboratoire et
SN 670 330b**

**Untersuchung im Hinblick auf Änderungen der
Normen SN 670 320b CBR Laborversuch und
SN 670 330b**

M. Cuenoud, ERTEC, Le Mont sur Lausanne

M. Giraudet, SACR, Bassecourt

G. Gruaz et M. Dysli, Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL

**Mandat de recherche 28/99 sur la proposition de
l'Union des professionnels suisses de la route (VSS)**

Septembre 2000

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	II
SUMMARY	IV
1. MANDAT ET OBJECTIFS	1
1.1. PRÉAMBULE.....	3
1.2. MANDAT	3
1.3. OBJECTIFS	4
1.3.1 Réalisation	4
1.3.2 Vitesse d'enfoncement du poinçon CBR.....	4
2. NORMES NATIONALES ET INTERNATIONALES.....	5
2.1. COMPARAISON ENTRE LES NORMES	7
2.2. NOUVELLE NORME EUROPÉENNE POUR L'ESSAI DE COMPACTAGE PROCTOR : PR EN 13286-2.....	8
3. MÉTHODE DE LA RECHERCHE.....	9
3.1. LABORATOIRES IMPLIQUÉS ET MÉTHODE UTILISÉE	11
3.1.1 ERTEC, Le Mont sur Lausanne	11
3.1.2 SACR, Bassecourt.....	11
3.1.3 Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL	11
3.2 TYPES DE MATÉRIAUX UTILISÉS POUR CETTE RECHERCHE.....	11
4. RÉSULTATS OBTENUS	13
4.1 COMPACTEUR	15
4.1.1 Résultats et comparaisons.....	15
4.1.2 Commentaires	21
4.2 VITESSE D'ENFONCEMENT DU POINÇON CBR	23
4.2.1 Résultats et comparaisons.....	23
4.2.2 Commentaires	25
5. MODIFICATIONS PROPOSÉES DANS LA NORMALISATION	27
5.1 NORMES SN 670 320B.....	29
5.2 NORMES SN 670 330B.....	29
6. CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS POUR LA POURSUITE DE CETTE RECHERCHE	31
6.1 Conclusions.....	33
6.2 Proposition pour la poursuite de cette recherche.....	33

RÉSUMÉ

L'utilisation, en Suisse, de nouveaux compacteurs pour l'exécution de l'essai CBR (California Bearing Ratio) a montré que, pour des matériaux présentant un CBR élevé et pour une même énergie de compactage, la forme et les dimensions de la dame avaient une influence marquée sur les résultats obtenus.

En outre, toujours pour des matériaux à coefficient CBR élevé, la déformation de l'anneau dynamométrique des anciennes presses CBR (mais encore très souvent utilisées), qui fait varier la vitesse d'enfoncement du poinçon, a aussi une influence non négligeable sur les résultats obtenus.

La recherche qui fait l'objet de ce rapport a pour but de tirer au clair ces différentes influences, notamment par des essais systématiques et par un examen critique et comparatif des normes étrangères reconnues sur le plan international (ASTM, BSI, AFNOR, DIN).

L'analyse des résultats des CBR a permis de mettre en évidence les tendances suivantes:

- Les valeurs des CBR obtenus avec la dame de forme cylindrique de 75 mm de diamètre donnent presque toujours les valeurs maximales, celles obtenues avec la dame de forme cylindrique de diamètre 51 mm sont presque à chaque fois un peu plus faibles que ces dernières et les valeurs les plus faibles ont été obtenues quasiment à chaque fois avec la dame en secteur.
- Les masses volumique du sol sec ρ_d obtenues suivent à peu près la même tendance que les CBR.
- Les valeurs déterminées avec la dame de diamètre 75 mm sont celles qui se rapprochent le plus des valeurs des CBR obtenus à partir des essais manuels qui utilise une dame de forme cylindrique de diamètre 51 mm, et qui est l'essai de référence préconisé par les normes.

Les CBR obtenus avec des vitesses de poinçonnement différentes ne montrent qu'une légère tendance à l'augmentation du CBR en fonction de la vitesse du poinçonnement. Le nombre d'essais réalisés n'est cependant pas suffisant pour pouvoir quantifier clairement cette relation.

Les normes suisses en la matière devront être modifiées en conséquence, et en relation avec les normes européennes.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Anwendung neuer Geräte in der Schweiz zur Ausführung des CBR-Versuches (California Bearing Ratio) hat gezeigt, dass –für Materialien mit einem hohen CBR-Wert und für die gleiche Verdichtungsenergie- die Form und Grösse des Stempels einen ausgeprägten Einfluss auf die erzielten Resultate hat.

Die Verformung des dynamometrischen Ringes der alten, aber immer noch sehr gebräuchlichen CBR-Pressen, welche die Endringgeschwindigkeit des Stempels verändert, hat (auf Materialien mit einem hohen CBR-Wert) ebenfalls einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die erhaltenen Ergebnisse.

Die den Gegenstand des Berichtes bildenden Untersuchungen haben zum Ziel, diese verschiedenen Einflüsse zu klären, besonders durch systematische Versuchsreihen und durch kritische Prüfung und Vergleich mit dabei herangezogenen im Ausland gebräuchlichen Normen (ASTM, BSI, AFNOR, DIN).

Die Untersuchung der Versuchsergebnisse der CBR-Versuche brachte folgende Tendenzen zum Vorschein:

- Die CBR-Werte, welche mittels eines zylindrischen Stempels mit einem Durchmesser von 76 mm erhalten wurden, ergaben fast immer die höchsten Werte, während die mit Hilfe eines zylindrischen Stempels mit einem Durchmesser von 51 mm fast immer etwas darunter lagen. Die kleinsten Werte wurden jedoch mit dem Kreissegment-Stempel ermittelt.
- Die ermittelten Trockendichten σ_d folgten derselben Tendenz, die schon für die CBR-Werte beobachtet worden war.
- Die durch den 76 mm-Stempel erhaltenen Versuchsergebnisse lassen sich am ehesten mit den Werten vergleichen, welche mittels der Versuche mit dem 51 mm-Stempel bestimmt worden waren, wobei letzterer den von den Normen empfohlenen Referenzversuch darstellt.

Die mittels verschiedener Versuchsgeschwindigkeiten ermittelten CBR-Werte zeigen eine leichte Tendenz der Erhöhung der CBR in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Die Anzahl der Versuche ist jedoch nicht genügend, um diese Beziehung klar quantifizieren zu können.

Infolgedessen und unter Beachtung der europäischen Normen müssten die diesen Bereich betreffenden schweizer Normen modifiziert werden.

SUMMARY

The use of new compactors for the execution of tests CBR in Switzerland (California Bearing Ratio) has shown that, for materials presenting a high CBR value and for a same compaction energy, the shape and dimensions of the hammer had a marked influence on the results obtained.

Moreover, for materials with high CBR value, the deformation of the dynamometer ring of the old CBR press (which is still very often used), inducing a variation of the penetration speed of the punch, has also a considerable influence on the results obtained.

The purpose of the research presented in this report is to highlight these various influences, in particular by systematic tests and by a critical and comparative examination of the foreign codes recognised at an international level (ASTM, BSI, AFNOR, DIN).

- The CBR obtained with the 75 mm diameter cylindrical hammer are always the higher values. Those obtained with the 51 mm diameter cylindrical hammer are almost every time weaker than these latter. The weakest values are those obtained with the sector shape hammer.
- The densities of the dry soil ρ_d follow about the same tendency as the CBR.
- The values determined with the 75 mm diameter cylindrical hammer are the closest to those obtained with the manual compaction using a 51 mm diameter cylindrical hammer (the reference procedure of the standards).

The CBR value obtained with different punching speeds shows only a very slight increasing tendency, according to the punching speed. The number of tests carried out is however not sufficient to be able to clearly quantify this relation.

The Swiss standards on the matter have to be modified consequently, in relationship with the European standards.

1. Mandat et objectifs

1.1. Préambule

Le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (LMS-EPFL) exécute fréquemment, pour d'autres laboratoires, des essais de détermination de la sensibilité au gel selon la norme SN 670 321. A ces occasions, des essais CBR sont quelquefois exécutés en parallèle au LMS-EPFL et dans un autre laboratoire. Ces essais croisés ont montré récemment, que, pour des matériaux à CBR élevé comme les graves concassées, les résultats de ces derniers réalisés selon la procédure de la norme SN 670 320b : essais CBR en laboratoire, n'étaient pas les mêmes selon qu'ils étaient réalisés dans un laboratoire ou dans un autre.

Quelques essais croisés furent alors organisés et permirent de commencer à démontrer que la norme SN 670 320b n'était pas assez précise et qu'elle permettait certaines variantes dans sa procédure, variantes qui conduisent à des résultats différents. Ces écarts dans les résultats peuvent avoir, sur les chantiers, des conséquences financières importantes, puisque l'essai CBR est utilisé pour la qualification de matériaux selon la norme SN 670 120.

Ces premières comparaisons ont été menées par les laboratoires suivants:

- Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL
- ERTEC, Le Mont sur Lausanne
- SACR, Bassecourt
- Laboratoire CFF, Berne.

Elles ont notamment montré que les résultats des essais CBR dépendaient fortement du compacteur utilisé et, dans une moindre mesure, de la vitesse d'enfoncement du poinçon qui n'est pas toujours celle prescrite par la norme SN 670 320b.

1.2. Mandat

Suite à ces premiers essais croisés, les LMS-EPFL, SACR et ERTEC ont demandé un crédit de recherche à l'Office fédéral des routes (OFROU) pour poursuivre et consolider ces premières constatations et ainsi permettre de donner des bases pour la modification des normes SN 670 320b : Essais CBR en laboratoire et SN 670 330b : Essais de compactage selon AASHTO. Le mandat de recherche correspondant a été confié aux trois requérants et porte le numéro 28/99. Il est libellé par l'OFROU de la manière suivante : Etude en vue de la modification urgente de la norme SN 670 320b, Essais en laboratoire.

1.3. Objectifs

La recherche a pour objectifs de démontrer que, pour des matériaux présentant un CBR élevé, comment la forme, les dimensions et les déplacements de la dame du compacteur agissent, pour une même énergie de compactage, sur la compacité de l'éprouvette, et quelle est l'influence de la variation de la vitesse d'enfoncement du poinçon sur le coefficient CBR.

1.3.1 Réalisation

Exécuter des essais croisés avec trois laboratoires disposant de trois dames de compactage différentes:

- une dame cylindrique de 51 mm de diamètre.
- une dame en secteur de section égale à la dame précédente, et de 75 mm de rayon.
- une dame cylindrique de 75 mm de diamètre (soit à peu près le rayon du moule CBR).

Tenter de mettre en évidence l'influence de la section, de la forme et des déplacements de la dame sur la compacité de l'éprouvette et par conséquent sur son CBR, ceci pour des mêmes énergies de compactage et pour différents matériaux à CBR élevés.

1.3.2 Vitesse d'enfoncement du poinçon CBR

La vitesse constante d'enfoncement du poinçon est donnée par la norme SN 670 320b, soit : $1,27 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Cependant, dans un très grand nombre de laboratoires suisses et étrangers, la presse CBR impose uniquement une vitesse constante de son plateau et la force d'enfoncement est mesurée par un anneau dynamométrique qui se déforme en même temps que la force augmente. Par conséquent, si l'on ne dispose pas d'anneaux de capacité différente, cette déformation croît en fonction du coefficient CBR ce qui implique que la vitesse d'enfoncement du poinçon ne correspond plus à celle imposée dans la norme. Cette variation semble affecter les résultats des essais entrepris, surtout sur des matériaux à CBR élevé.

Les presses modernes à usages multiples contrôlées par ordinateur ou l'utilisation d'un capteur de force à jauges de contraintes, pratiquement sans déformation, à la place de l'anneau dynamométrique permettent de remédier à ce défaut.

2. Normes nationales et internationales

2.1. Comparaison entre les normes

Caracteristiques	BS 1377 part 4 (Proctor et CBR)	ASTM 698 (Proctor) & ASTM 1883 (CBR)	AFNOR NF P94-093 & NF P94-078	DIN 18127 (Proctor)	SN 670 320b (CBR) & SN 670 330b (Proctor)
Compactage pour l'essai CBR					
Diamètre du moule [mm]	152	152,4	152	150	152
Hauteur de l'éprouvette [mm]	127	127	127	125	127
Volume de l'éprouvette [cm ³]	2305	2315	2305	2208	2305
Forme de la dame	Ø 50 mm	Secteur, r = 73,7 ± 0,5 mm angle au centre = 40°	Ø 51 mm	Ø 75 mm	Ø 50,8 mm
Masse de la dame [kg]	4,5	4,54	4,5	4,5	4,54
Hauteur de chute [mm]	450	457	457	450	457
Nombre de couches	5	5	5	5	5
Nbre de coups par couches	Pas fixé : 30 à 62	25	55	59	12 26 55
Energie de compactage [MJ·m ⁻³]	Pas imposée	1,15	2,7	2,705	0,540 1,170 2,475 (1) (2) (3)
Diamètre max. des grains [mm]	20	19	20	31,5	16
Tolérance sur le diam. max. des grains	Max. 30% de grains compris entre 20 et 37,5 mm à éliminer.	Max. 30% de grains > 19 mm à éliminer.	Max. 25% de grains > 20 mm à éliminer.	Max. 35% de grains > 31,5 mm à éliminer.	Max. 10% de grains compris entre 16 et 31,5 mm.
Poinçonnement					
Diamètre du poinçon [mm]	49,6 ± 0,1	49,63	49,6 ± 0,1	-	49,63
Vitesse enfoncement poinçon [mm/min]	1,0 ± 0,2	1,27	1,27 ± 0,1	-	1,27
CBR pour enfoncement poinçon à : [mm]	2,5 & 5,0	2,54 & 5,08	2,5 & 5,0	-	2,54 & 5,08
Remarques	Valeur CBR max. S'assurer que ρ _d soit à ± 2% de celui obtenu par l'essai Proctor. Anneau en fonction de la force à mesurer. Compactage statique ou dynamique.	Si valeur max. du CBR à 5,08 mm, refaire l'essai pour confirmation.	Dispositif de mesure de la force adapté à l'effort mesuré. Incertitude relative de la force d'au max. 1%.	Pas de norme concernant l'essai CBR.	Si valeur max. du CBR à 5,08 mm, refaire l'essai pour confirmation.

(2) Energie selon Kentucky pour le dimensionnement selon AASHTO

(1) Energie de l'essai Proctor standard avec moule CBR
(3) Energie de l'essai Proctor modifié avec moule CBR

Tableau 1 : Comparaison entre les normes des essais de compactage et de poinçonnement CBR.

2.2. Nouvelle norme européenne pour l'essai de compactage Proctor : pr EN 13286-2

Le projet de norme européenne pour l'essai de compactage Proctor : Pr EN 13286-2 est actuellement en consultation. Seules quelques petites différences sont à signaler par rapport aux normes suisses en vigueur actuellement, soit SN 670 330b : Compactage selon AASHTO et SN 670 320b : Essais CBR en laboratoire. Le tableau 2 donne un bon aperçu des recommandations de ces différentes normes.

Caractéristiques	prEN 13286-2 Compactage Proctor			SN 670 330b Compactage selon AASHTO			SN 670 320b Essais CBR en laboratoire		
	Moule normal		Grand moule (CBR)	Moule AASHTO		Moule CBR			
	Standard	Modifié	Standard	Modifié	Standard	Modifié			
Diamètre du moule [mm]	100	100	150	150	101,6	101,6	152	152	152
Hauteur de l'éprouvette [mm]	120	120	120	120	117	117	127	127	127
Volume de l'éprouvette [cm ³]	942	942	2121	2121	948	948	2305	2305	2305
Diamètre de la dame [mm]	50	50	50	50	51	51	51	51	51
Masse de la dame [kg]	2,5	4,5	2,5	4,5	2,49	4,54	4,54	4,54	4,54
Hauteur de chute [mm]	305	457	305	457	305	457	457	457	457
Nombre de couches	3	5	3	5	3	5	5	5	5
Nbre de coups par couches	25	25	56	56	25	25	12	55	12
Energie de compactage [MJ·m⁻³]	0,607	2,729	0,604	2,715	0,601	2,736	0,540	2,475	0,540
Masse min. éprouvette [kg]	15	15	40	40	15	15	40	40	40
% passant à 16 mm	100	100	< 100	< 100	100	100			
% passant à 31,5 mm	0	0	75 à 100	75 à 100	0	0	100	100	100
% de 8 à 16 mm					max. 20	max. 20			
% de 16 à 31,5 mm					0	0	max. 10	max. 10	max. 10
									(1) (2) (3)

(1) Energie selon Kentucky pour le dimensionnement selon AASHTO

(2) Energie de l'essai Proctor standard avec moule CBR

(3) Energie de l'essai Proctor modifié avec moule CBR

Tableau 2 : Comparaison entre la nouvelle norme européenne et les normes SN concernant l'essai de compactage Proctor.

3. Méthode de la recherche

3.1. Laboratoires impliqués et méthode utilisée

3.1.1 ERTEC, Le Mont sur Lausanne

Ce laboratoire utilise le moule CBR standard de 152 mm de diamètre pour une hauteur de 127 mm, et un compacteur automatique. La dame de compactage est de forme cylindrique de 75 mm de diamètre, soit environ le rayon du moule CBR. La presse de poinçonnement est une presse moderne dont le plateau est asservi à la vitesse requise par la norme, soit : 1.27 mm/min.

3.1.2 SACR, Bassecourt

Ce laboratoire utilise le moule CBR standard de diamètre 152 mm pour une hauteur de 127 mm, et un compacteur automatique. La dame de compactage est de forme cylindrique de 51 mm de diamètre. La presse de poinçonnement est également une presse moderne asservie en vitesse, soit : 1.27 mm/min.

3.1.3 Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL

Ce laboratoire utilise le moule CBR standard de diamètre 152 mm pour une hauteur de 127 mm, et un compacteur automatique. La dame est en secteur de 75 mm de rayon et de section égale à la dame de diamètre 51 mm. La presse de poinçonnement est une ancienne presse mécanique dont la vitesse du plateau est constante, soit : 1.27 mm/min, elle ne peut pas être asservie. Afin d'éviter les problèmes de déformation de l'anneau dynamométrique qui entraîne une imprécision sur la vitesse de poinçonnement, celui-ci a été remplacé par un capteur de force électronique dont la déformation peut être négligée.

En outre, ce laboratoire a effectué les essais avec compactage manuel. Ce mode de compactage est la méthode de référence.

3.2 Types de matériaux utilisés pour cette recherche

Les courbes granulométriques des trois graves utilisées pour la réalisation de ces essais dans le cadre de cette recherche se trouvent sur la figure 1, il s'agit de :

- Une grave I roulée provenant de Poissine de granulométrie 0/63 mm, écrêtée à 16 mm.
- Une grave I concassée provenant de la carrière d'Arvel de granulométrie 0/63 mm, écrêtée à 16 mm.
- Une grave II concassée provenant de la carrière des matériaux Sabag SA à Courrendlin de granulométrie 0/30 mm, écrêtée à 16 mm.

3.3 Mode de préparation des échantillons

Préparation in situ d'environ 10 tonnes de matériau, homogénéisés à la chargeuse. Prélèvement par ERTEC S.A. pour la grave d'ARVEL et par le client, mais selon les consignes d'ERTEC, pour la grave de la Poissine, des quantités nécessaires.

Séchage de la totalité des matériaux prélevés à l'étuve à 100°C. Ecrêtage à la tamiseuse au tamis de 16mm (tamis carré de 50x50cm) pendant 5 minutes de la totalité des matériaux prélevés. Préparation des différents échantillons de laboratoire, par cartages successifs du matériau sec et écrêté à l'aide d'un échantillonneur à couloirs

La grave 0/30 de Courrendlin a été préparée par la SACR S.A. à partir d'un tout-venant sélectionné, extrait des bancs les plus nobles de la carrière, par concassage primaire dans un concasseur rotatif.

Un échantillon d'ensemble de quelque 350 kg a été prélevé le 3.02.2000, à la sortie de la bande transporteuse équipée d'une goulotte pour que le "jet" soit concentré et que le prélèvement comporte bien toutes les fractions.

L'échantillon ainsi prélevé a été écrêté au tamis de 16 mm. Les échantillons de laboratoire ont été préparé par quartage du tamisat avant d'être distribués aux différents laboratoires, soit : au LMS, à ERTEC, et à la SACR.

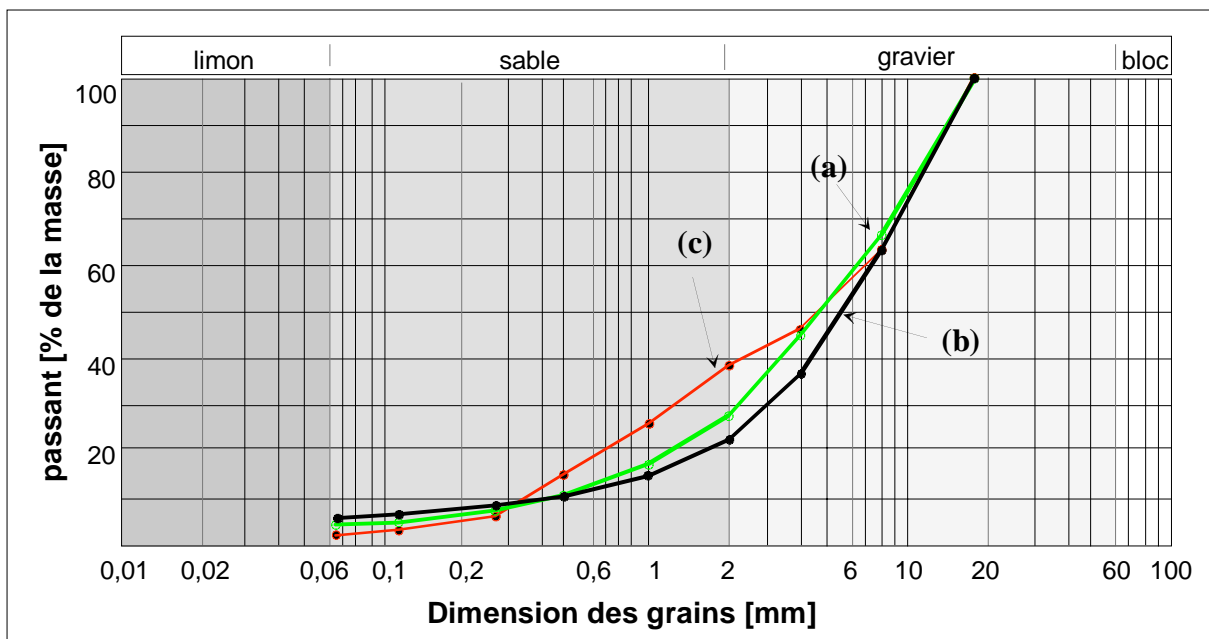


Figure 1 : Courbes granulométrique des graves utilisées écrêtées à 16 mm

- (a) Courbe granulométrique de la grave I concassée de la carrière d'Arvel
- (b) Courbe granulométrique de la grave II concassée de Courrendlin
- (c) Courbe granulométrique de la grave I roulée de Poissine

4. Résultats obtenus

4.1 Compacteur

4.1.1 Résultats et comparaisons

Tous les résultats obtenus par les trois laboratoires impliqués dans cette recherche se trouvent dans les tableaux 3 et 4 et sur les figures 2 à 6.

Tous les graphiques ont été représentés avec la même échelle pour faciliter la comparaison des résultats obtenus.

Les points représentant les résultats des différents laboratoires ont été reliés pour indiquer la tendance ou la dispersion des valeurs obtenues.

Seuls les CBR correspondant à un enfoncement du piston de 5,08 mm ont été représentés sur ces graphiques car ces valeurs sont toujours supérieures à celles obtenues pour un enfoncement de 2,54 mm, c'est-à-dire que ce sont celles que l'on devrait prendre en considération lors de la qualification d'une grave à l'aide de la norme.

Tableau 3 : Graves concassées d'Arvel et de Courrendlin

Grave	Energie [MJ/m ³]	Labo	Compactage	ρd [t.m ⁻³]	Coeff. CBR % à 2,54 mm	Coeff. CBR à 5,08 mm
I Concassée Arvel	1.2	LMS 99	Machine / secteur	2.03	48	62
I Concassée Arvel	1.2	LMS 99	Machine / secteur	2.06	56	69
I Concassée Arvel	1.2	SACR	Machine Ø 51 mm	1.98	58	70
I Concassée Arvel	1.2	SACR	Machine Ø 51 mm	2.01	58	67
I Concassée Arvel	1.2	SACR	Machine Ø 51 mm	1.99	54	70
I Concassée Arvel	1.2	ERTEC	Machine Ø 75 mm	2.09	83	102
I Concassée Arvel	1.2	ERTEC	Machine Ø 75 mm	2.11	87	107
I Concassée Arvel	1.2	CFE	Machine Ø 75 mm	2.06	72	85
I Concassée Arvel	1.2	CFE	Machine Ø 75 mm	2.04	80	94
I Concassée Arvel	1.2	LMS 00	Machine / secteur	2.02	66	83
I Concassée Arvel	1.2	LMS 00	Machine / secteur	2.02	50	65
I Concassée Arvel	1.2	LMS 00	Manuel Ø 51 mm	1.99	57	72
I Concassée Arvel	1.2	LMS 00	Manuel Ø 51 mm	2.04	72	95
II Conc. Courrendlin	1.2	LMS 00	Machine / secteur	2.04	38	49
II Conc. Courrendlin	1.2	LMS 00	Machine / secteur	2.00	43	56
II Conc. Courrendlin	1.2	LMS 00	Manuel Ø 51 mm	1.99	53	67
II Conc. Courrendlin	1.2	LMS 00	Manuel Ø 51 mm	2.03	65	78
II Conc. Courrendlin	1.2	SACR	Machine Ø 51 mm	2.04	51	63
II Conc. Courrendlin	1.2	SACR	Machine Ø 51 mm	2.10	47	63
II Conc. Courrendlin	1.2	ERTEC	Machine Ø 75 mm	1.99	60	72
II Conc. Courrendlin	1.2	ERTEC	Machine Ø 75 mm	2.02	54	67

Tableau 3, suite : Graves concassées d'Arvel et de Courrendlin

II Conc. Courrendlin	2.5	LMS 00	Machine / secteur	2.09	55	69
II Conc. Courrendlin	2.5	LMS 00	Machine / secteur	2.04	59	71
II Conc. Courrendlin	2.5	LMS 00	Manuel Ø 51 mm	2.09	90	(1) 115
II Conc. Courrendlin	2.5	LMS 00	Manuel Ø 51 mm	2.05	79	97
II Conc. Courrendlin	2.5	SACR	Machine Ø 51 mm	2.12	84	109
II Conc. Courrendlin	2.5	SACR	Machine Ø 51 mm	2.17	77	102
II Conc. Courrendlin	2.5	ERTEC	Machine Ø 75 mm	2.12	101	127
II Conc. Courrendlin	2.5	ERTEC	Machine Ø 75 mm	2.07	83	103

Tableau 4 : Grave I roulée de Poissine

I Roulée Poissine	1.2	LMS 00	Machine / secteur	2.09	42	56
I Roulée Poissine	1.2	LMS 00	Machine / secteur	2.07	40	53
I Roulée Poissine	1.2	LMS 00	Manuel Ø 51 mm	2.07	66	82
I Roulée Poissine	1.2	LMS 00	Manuel Ø 51 mm	2.13	67	86
I Roulée Poissine	1.2	SACR	Machine Ø 51 mm	2.16	42	56
I Roulée Poissine	1.2	SACR	Machine Ø 51 mm	2.11	41	55
I Roulée Poissine	1.2	ERTEC	Machine Ø 75 mm	2.10	51	70
I Roulée Poissine	1.2	ERTEC	Machine Ø 75 mm	2.12	56	74

I Roulée Poissine	2.5	LMS 00	Machine / secteur	2.12	56	78
I Roulée Poissine	2.5	LMS 00	Machine / secteur	2.12	58	76
I Roulée Poissine	2.5	LMS 00	Manuel Ø 51 mm	2.13	86	100
I Roulée Poissine	2.5	LMS 00	Manuel Ø 51 mm	2.17	120	160 (1)
I Roulée Poissine	2.5	SACR	Machine Ø 51 mm	2.17	91	117
I Roulée Poissine	2.5	SACR	Machine Ø 51 mm	2.14	80	104
I Roulée Poissine	2.5	ERTEC	Machine Ø 75 mm	2.18	100	130
I Roulée Poissine	2.5	ERTEC	Machine Ø 75 mm	2.18	135	159

- (1) Ces valeurs ont été interprétées par prolongement de la courbe : charge – enfoncement, et non pas déterminées directement à partir des mesures effectuées sur l'échantillon.

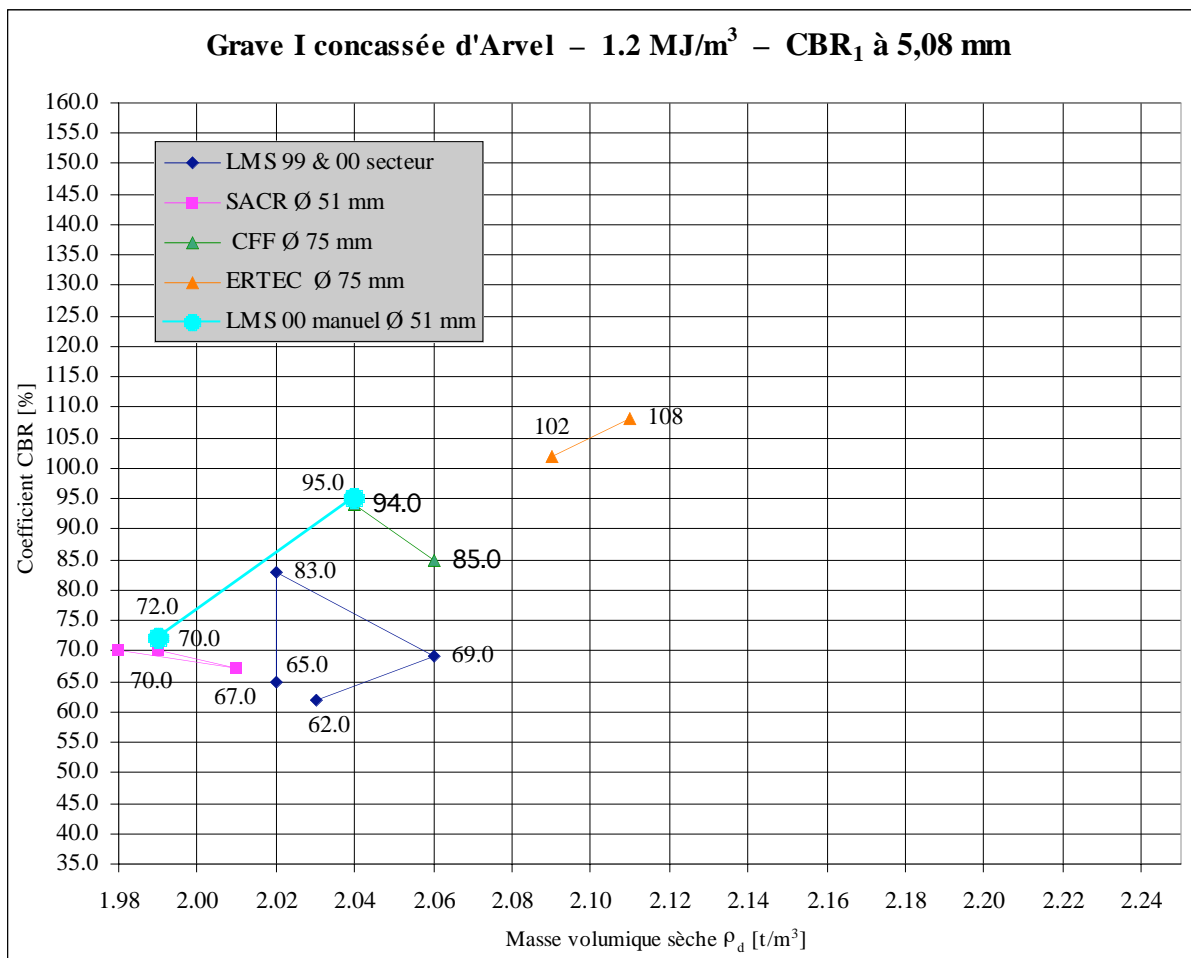


Figure 2 : Grave I concassée d'Arvel, énergie de compactage de 1.2 MJ/m³.
 Résultats des CBR₁ pour un d'enfoncement du poinçon de 5,08 mm.

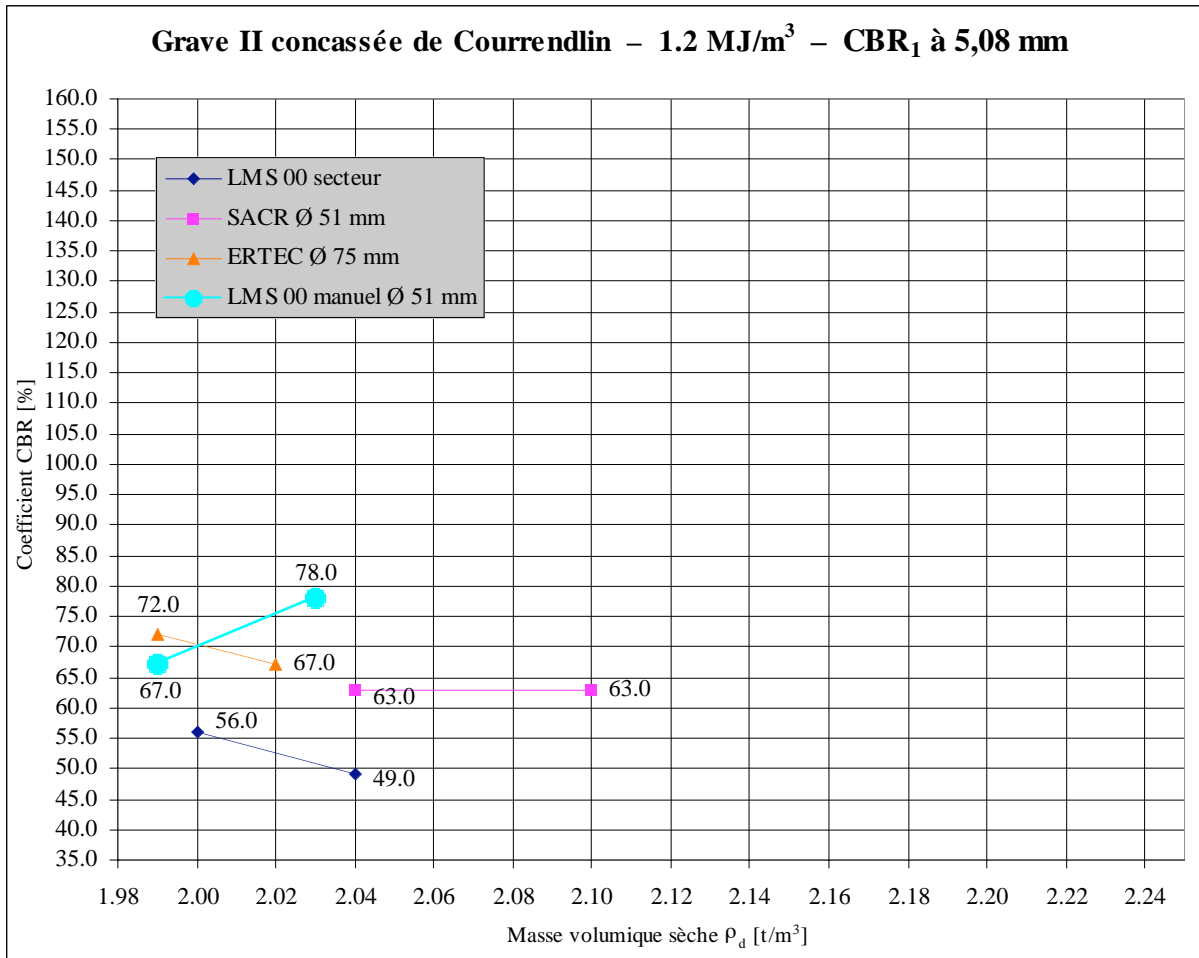


Figure 3 : Grave II concassée de Courrendlin, énergie de compactage de 1.2 MJ/m³.
Résultats des CBR₁ pour un d'enfoncement du poinçon de 5,08 mm.

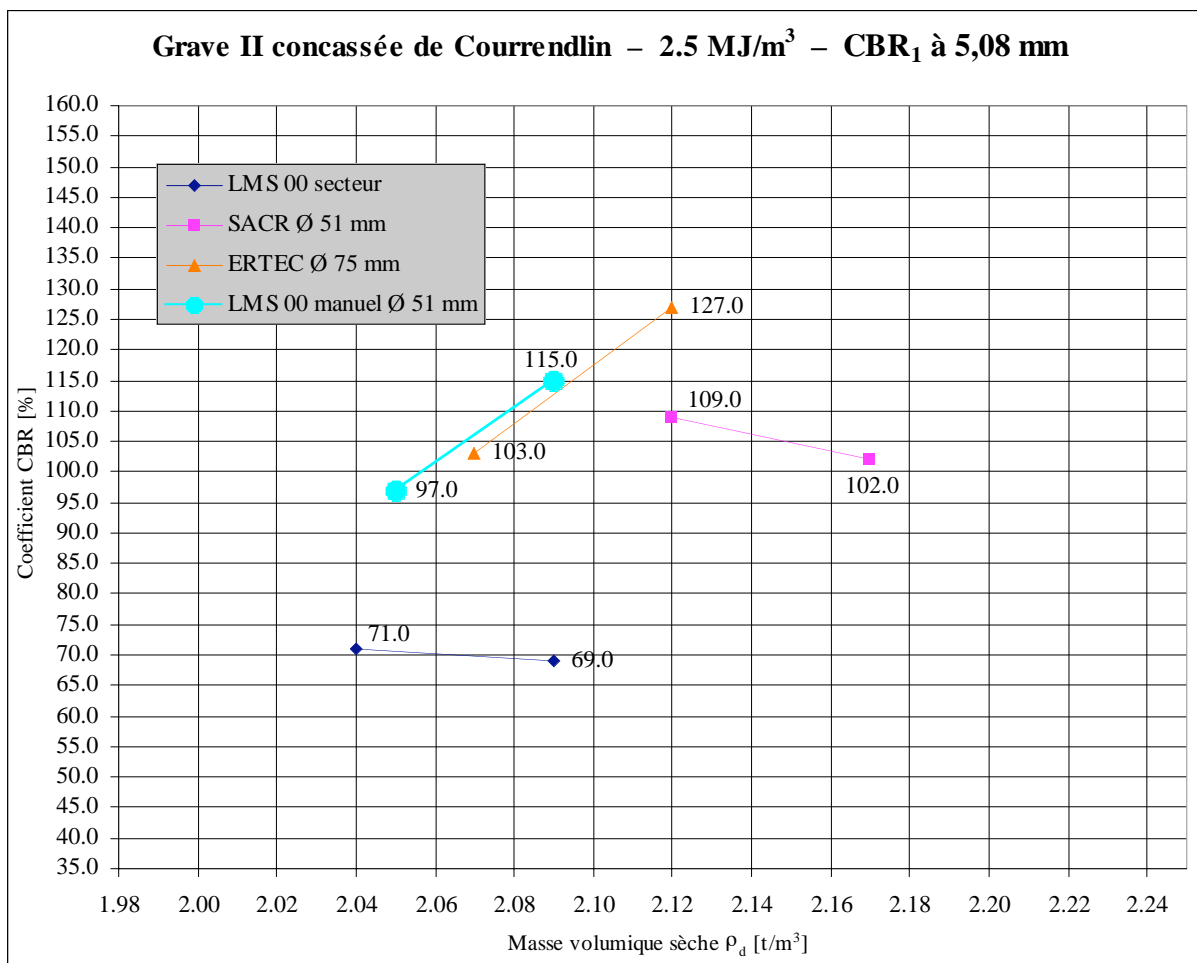


Figure 4 : Grave II concassée de Courrendlin, énergie de compactage de 2.5 MJ/m³.
 Résultats des CBR₁ pour un d'enfoncement du poinçon de 5,08 mm.

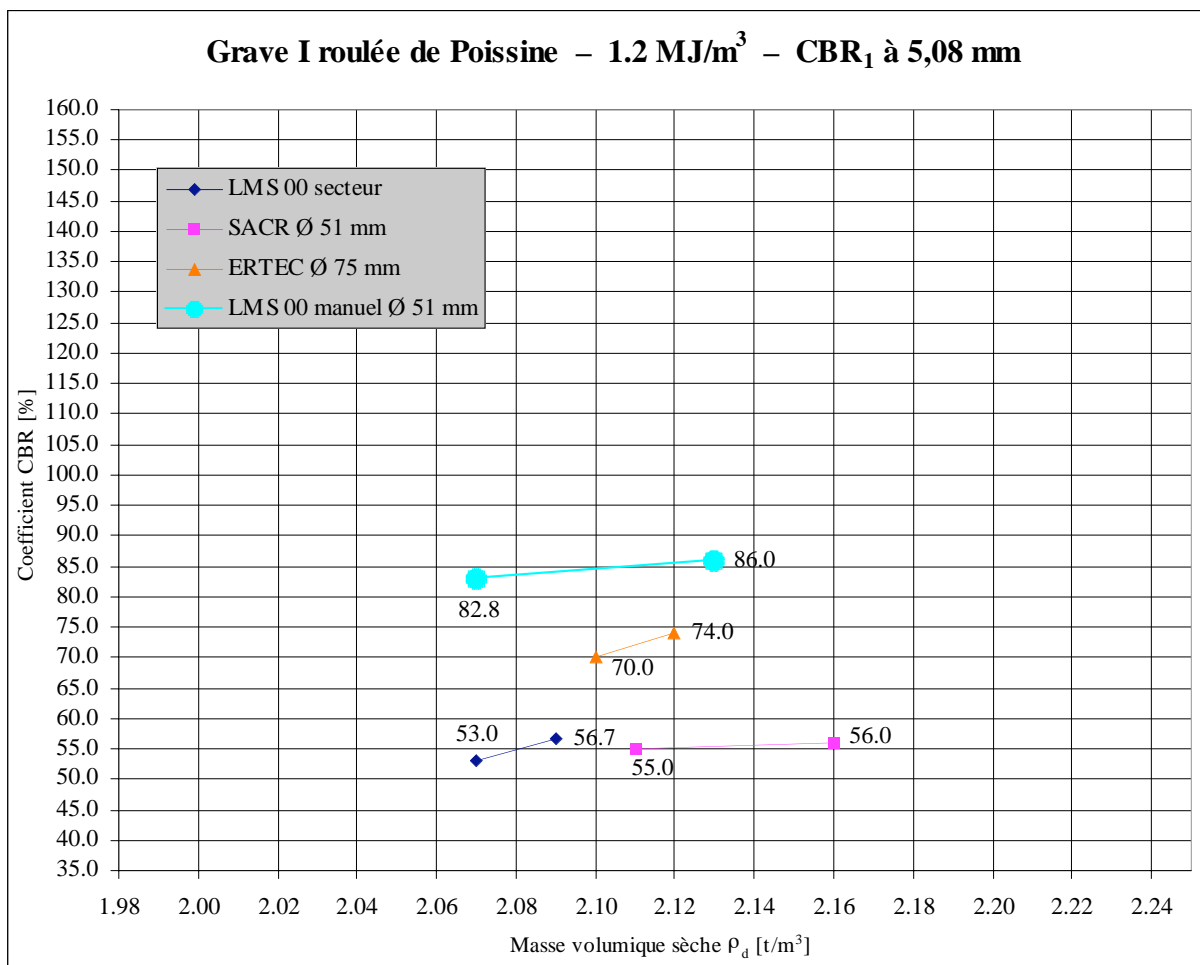


Figure 5 : Grave I roulée de Poissine , énergie de compactage de 1.2 MJ/m³.

Résultats des CBR₁ pour un d'enfoncement du poinçon de 5,08 mm.

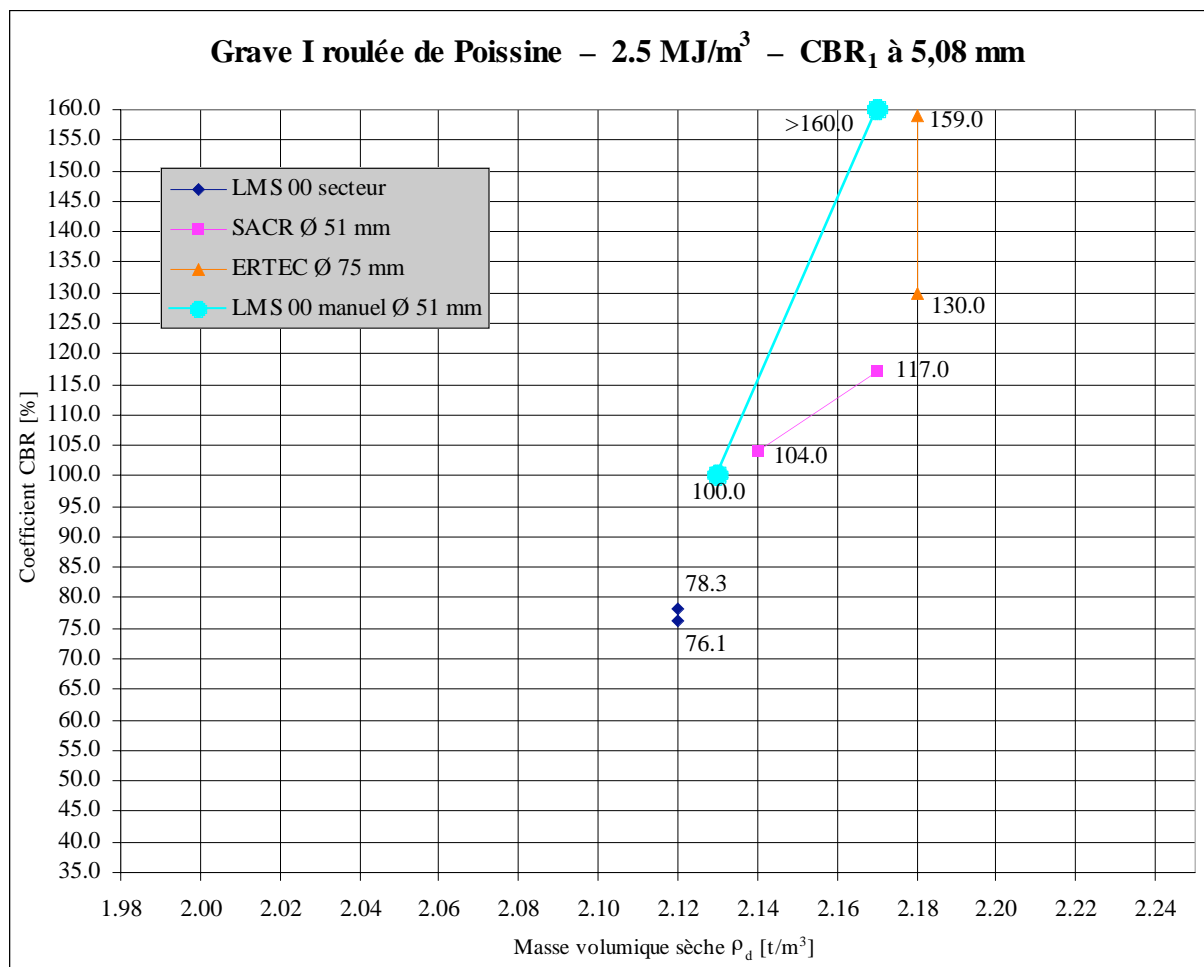


Figure 6 : Grave I roulée de Poissine, énergie de compactage de 2.5 MJ/m³.

Résultats des CBR₁ pour un d'enfoncement du poinçon de 5,08 mm.

4.1.2 Commentaires

En observant ces résultats et en comparant les essais effectués avec les compacteurs automatiques avec ceux obtenus avec le compactage manuel de référence préconisé par la norme, on peut faire les commentaires suivants :

- Les valeurs des CBR déterminés avec un compacteur automatique et la dame de forme cylindrique de 75 mm de diamètre donnent en général et pour les trois matériaux testés, les valeurs maximales (3 cas sur 5).
- Les valeurs des CBR obtenus avec un compacteur automatique et la dame de forme cylindrique de 51 mm de diamètre sont presque chaque fois un peu plus faibles que celles susmentionnées (3 cas sur 5).

- Les CBR obtenus avec un compacteur automatique et la dame en secteur avec un angle au centre d'environ 40° et dont la section est égale à celle de la dame de 51 mm de diamètre donnent systématiquement les valeurs les plus faibles (5 cas sur 5). Il semblerait que la diffusion de l'énergie dans l'échantillon que l'on compacte avec ce genre de dame soit moins bonne qu'avec les deux autres. On le remarque aussi sur les valeurs des ρ_a , qui sont également plus faibles pratiquement à chaque fois.
- En définitive, la seule tendance qui semble ressortir de cette recherche, est que les valeurs déterminées avec la dame de 75 mm de diamètre sont celles qui se rapprochent le plus des valeurs CBR obtenues avec l'essai manuel qui utilise une dame de forme cylindrique de 51 mm de diamètre, et qui est l'essai de référence préconisé par les normes.
- On peut également relever que les valeurs obtenues avec les essais manuels sont celles pour lesquelles la dispersion est la plus grande (4 cas sur 5).

Pour rappel:

La norme SN 670 320b: Essais CBR en laboratoire ne fixe pas la forme de la dame, par contre, elle est fixée dans la norme SN 670 330b: Essais de compactage selon AASHTO, soit, la dame de forme cylindrique de 51 mm de diamètre.

4.2 Vitesse d'enfoncement du poinçon CBR

4.2.1 Résultats et comparaisons

Les résultats obtenus par le laboratoire de la SACR ainsi que certains résultats obtenus par le LMS-EPFL lors de différentes études se trouvent dans le tableau 5 sur et les figures 7 et 8.

Tableau 5 : Résultats des essais effectués sur la grave II concassée de Courrendlin par le laboratoire de la SACR et de ceux effectués sur différentes graves I et II concassées lors d'expertises réalisées par le LMS-EPFL.

Grave	Energie [MJ/m ³]	Labo	Compactage	ρd [t.m-3]	Vitesse [mm/min]	Coeff. CBR % à 5,08 mm
II Concassée Courrendlin	2.5	SACR	Machine Ø 51 mm	2.12	1.27	109
II Concassée Courrendlin	2.5	SACR	Machine Ø 51 mm	2.17	1.27	102
II Concassée Courrendlin	2.5	SACR	Machine Ø 51 mm	2.08	0.90	120
II Concassée Courrendlin	2.5	SACR	Machine Ø 51 mm	2.16	0.90	100
II Concassée Courrendlin	2.5	SACR	Machine Ø 51 mm	2.12	0.60	109
II Concassée Courrendlin	2.5	SACR	Machine Ø 51 mm	2.14	0.60	92

CFF concassée	1.2	LMS	Secteur	2.11	1.00	78
CFF concassée	1.2	LMS	Secteur	2.14	1.27	99
CFF concassée	1.2	LMS	Machine Ø 75 mm	2.17	1.27	109
Route T9	1.2	LMS	Secteur	2.14	1.27	79
Route T9	1.2	LMS	Secteur	2.13	1.00	67
I Concassée Arvel	1.2	LMS	Secteur	2.02	1.27	86
I Concassée Arvel	1.2	LMS	Secteur	2.04	1.27	96
I Concassée Arvel	1.2	LMS	Secteur	2.02	1.00	68

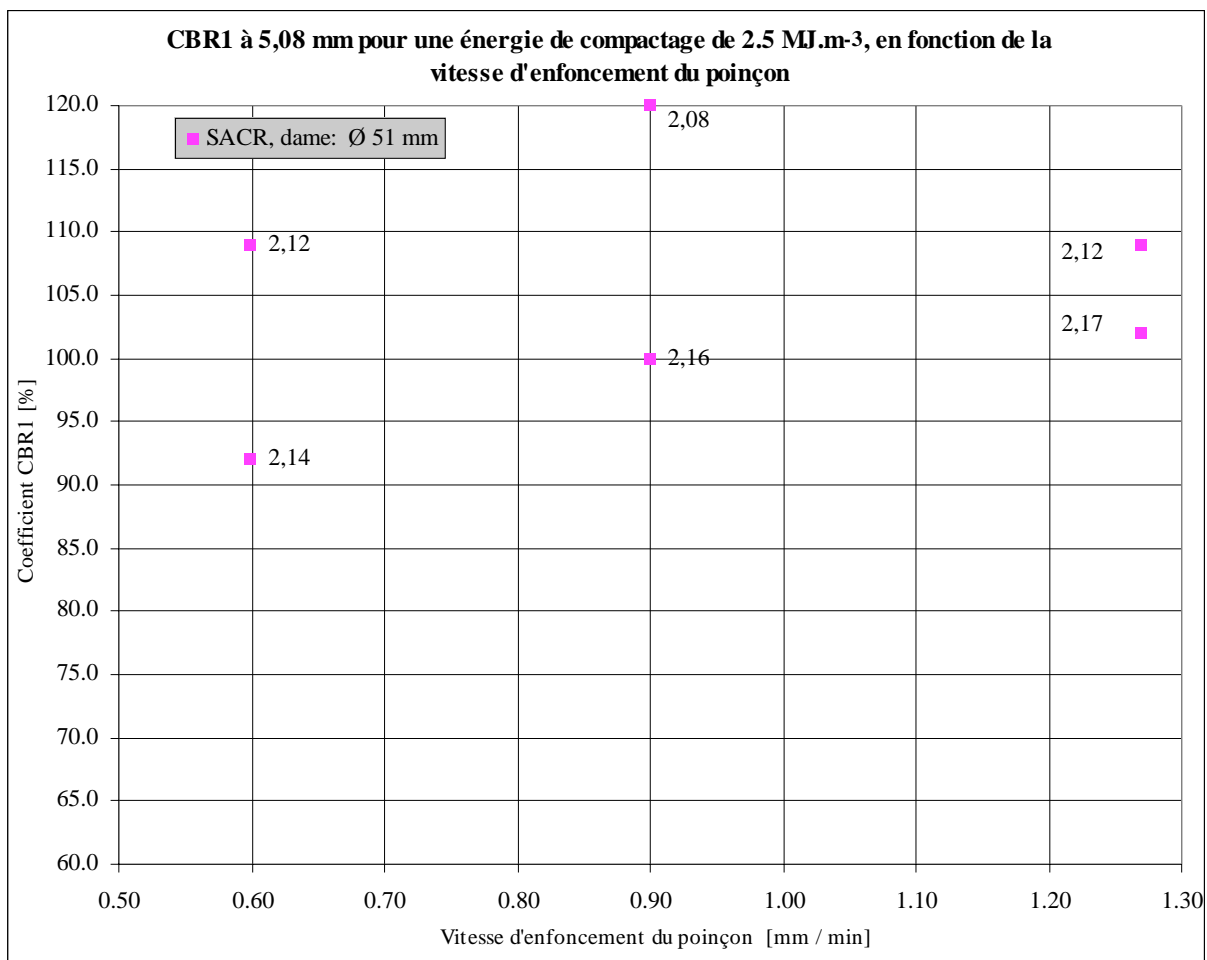


Figure 7 : Résultats des CBR₁ pour un enfoncement du poinçon de 5,08 en fonction de la vitesse de poinçonnement effectués sur la grave II concassée de Courrendlin

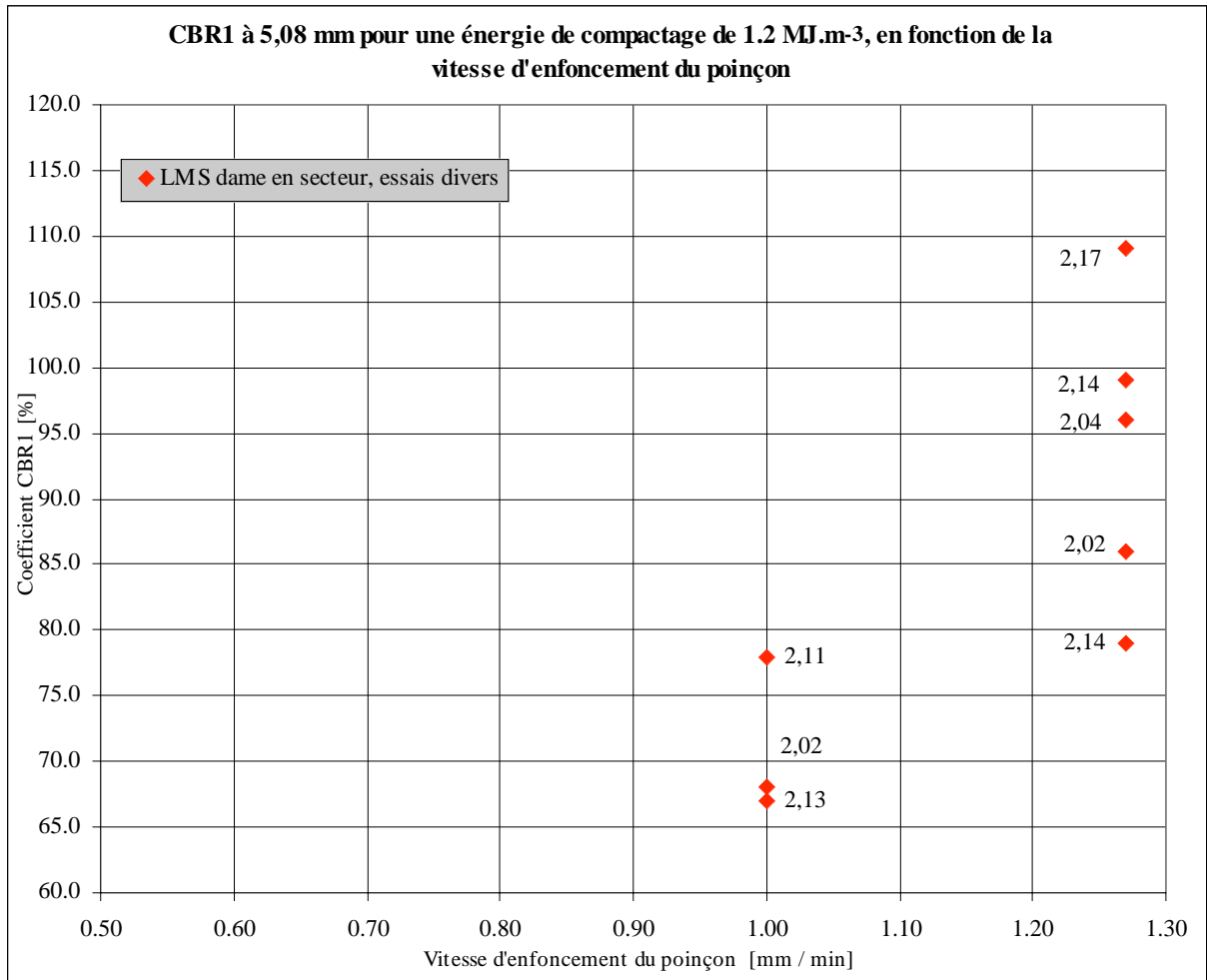


Figure 8 : Résultats des CBR₁ pour un enfoncement du poinçon de 5,08 en fonction de la vitesse de poinçonnement, effectués sur différentes graves I et II concassées lors d’expertises

4.2.2 Commentaires

Les CBR obtenus par la SACR avec trois vitesses de poinçonnement différentes ne montrent qu’une très légère tendance à l’augmentation du CBR en fonction de la vitesse de poinçonnement. Le nombre d’essais réalisés n’est cependant pas suffisant pour pouvoir l’affirmer clairement. Par contre, les résultats des essais CBR effectués par le LMS lors de la réalisation d’expertises montrent quant à eux une tendance plus marquée de l’effet de la vitesse sur la valeur du CBR.

5. Modifications proposées dans la normalisation

5.1 Normes SN 670 320b

Modifications à faire sous le point 10 de la partie B, exécution de l'essai :

- Indiquer la précision avec laquelle la force doit être mesurée, soit à $\pm 1\%$ de la force maximale appliquée.
- Introduire un paragraphe rendant attentif l'utilisateur de la norme que c'est la vitesse du poinçon qui est prescrite et non pas celle du plateau de la presse, et qu'il est nécessaire d'utiliser une presse ou un capteur qui garantit cette vitesse.

5.2 Normes SN 670 330b

Cette norme nécessitera une révision complète, lorsque la norme européenne EN 13286 entrera en vigueur.

Dans un premier temps ou à l'occasion de la révision complète, il faudra préciser et bien mettre en évidence que la norme décrit un essai de référence avec compactage manuel utilisant une dame cylindrique de 51 mm de diamètre.

Il faut cependant savoir qu'aujourd'hui il n'est économiquement plus possible de réaliser un essai CBR avec compactage manuel. En outre, cet essai exige un opérateur très consciencieux sans quoi la dispersion des résultats est plus importante qu'avec l'essai réalisé avec un compacteur automatique. Enfin, il est important de rappeler que l'influence du compacteur ne se fait sentir que pour des matériaux à CBR élevé.

En tous les cas et à notre avis, le compacteur automatique doit être intégré à la procédure décrite par la norme SN 670 330 revue. Deux solutions sont possibles :

- Imposer un compacteur automatique qui utilise la dame de 75 mm de diamètre, à savoir celle qui conduit aux résultats les plus proches de ceux obtenus avec le compactage manuel. Avec ce compacteur, il faudrait encore préciser l'angle de rotation du moule après chaque coup de la dame.
- Demander aux fabricants d'étalonner leur compacteur automatique sur la base de l'essai avec compactage manuel. Cet étalonnage pourrait être effectué :
 - En modifiant la hauteur de chute, le nombre de coups ou la masse de la dame de manière à obtenir les mêmes masses volumiques apparentes sèches qu'avec l'essai manuel de référence.
 - En produisant deux courbes d'étalonnage donnant : la masse volumique significative en fonction de la masse volumique mesurée et le CBR significatif en fonction de celui mesuré avec le compacteur automatique. La détermination de ces courbes d'étalonnage exigera un très grand nombre d'essais à charge du fabricant du compacteur.

6. Conclusions et propositions pour la poursuite de cette recherche

6.1 Conclusions

Pour réaliser l'essai CBR, les laboratoires routiers et de mécanique des sols de Suisse et de l'étranger utilisent depuis très longtemps des compacteurs automatiques. Bien que les énergies de compactage utilisées soient les mêmes pour tous ces compacteurs du commerce, il se trouve que, pour des éprouvettes de matériaux grossiers tels que les graves pour couches de fondations en particulier, la compacité, donc la masse volumique et les CBR obtenus ne sont pas les mêmes, tant s'en faut.

Les quelques modestes essais réalisés par les auteurs de cette recherche ont tout d'abord montré que, pour des matériaux grossiers et pour un même compacteur, la dispersion des résultats était très importante. Du fait de la présence de grains de grand diamètre et de leur répartition aléatoire dans l'éprouvette (formation possible et non détectable de nids de gravier), cette grande dispersion est explicable. Il faudrait cependant en tenir compte dans les critères de qualification de ces matériaux, ce qui n'est pratiquement jamais le cas.

Cette recherche a montré, pour des matériaux grossiers, l'importance du mode de compactage sur les CBR obtenus. Or, ce mode de compactage va bientôt être régi par une norme européenne qui ne fixera probablement que la procédure d'un essai avec compactage manuel. La norme suisse correspondante (SN 670 330) devra intégrer les compacteurs automatiques car, aujourd'hui, un compactage manuel n'est économiquement plus possible et la dispersion de ses résultats est en général plus grande que celle de ceux réalisés mécaniquement.

Avec ces compacteurs automatiques, pour obtenir une compacité de l'éprouvette constituée de matériaux grossiers proche de celle obtenue avec le compactage manuel de référence, il faudra soit fixer le diamètre de la dame à 75 mm, soit demander aux fabricants des compacteurs d'étalonner leurs appareils d'une manière ou d'une autre. Cet étalonnage présentera certainement de grandes difficultés.

Quoique son influence sur les résultats de l'essai CBR ne semble pas être très grande, il faudra préciser dans la norme correspondante que c'est bien la vitesse du poinçon qui est donnée et non pas celle du plateau de la presse.

6.2 Proposition pour la poursuite de cette recherche

La poursuite de la recherche sur l'influence des compacteurs et de la vitesse de poinçonnement sur le CBR ne semble pas très utile. Il est clair que la présente recherche se base sur un nombre très restreint d'essais et que ces résultats sont largement insuffisants pour en tirer des conclusions probantes. Les modifications des normes sur le compactage et le CBR qu'elle propose vont cependant permettre de lever toute ambiguïté sur la façon de conduire ces essais.

Enfin, dans les normes suisses et pour des matériaux grossiers comme les graves, l'utilisation du CBR comme critère de qualification est entièrement à revoir et devrait faire l'objet d'une recherche importante.

Cette recherche concernera surtout la révision de la norme SN 670 120d : Graves pour couches de fondation, où les points suivants devraient être tout particulièrement étudiés :

- Le concassé n'est pas défini. Que faire avec des mélanges de concassé et de roulé? Quels critères de qualification (valeurs des CBR) leur appliquer ?
- Pourquoi CBR_2 et $CBR_F \geq 40\%$ pour le roulé et $\geq 80\%$ pour le concassé ? Que faire avec les mélanges de concassé et de roulé ?
- Quelles valeurs faut-il fixer dans la norme pour les CBR et éventuellement avec quelle tolérance peut-on les considérer comme valables ou utilisables pour la qualification des graves?
- La condition $(CBR_F / CBR_1) \geq 0,5$ est-elle encore valable relativement à un essai de détermination de la susceptibilité au gel (SN 670 321) qui donne des gélivités plus importantes pour les graves I et II qu'avec l'ancien essai ?
- Est-ce que l'essai CBR_F est pertinent pour les graves I ?

En outre, cette norme devra être adaptée à la normalisation européenne.

Un appel d'offre pour une recherche correspondante sera lancé dès la publication du présent rapport.