

ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE D'ÉCRASEMENT DES GRAINS DU MATÉRIAU PEGMATITE À LA FATIGUE

STUDY OF THE GRAIN CRUSHING PHENOMENON OF THE PEGMATITE MATERIAL TO FATIGUE

B. MELBOUCI

Laboratoire Géo matériaux, Environnement et Aménagement
Université Mouloud Mammeri BP N° 17 R.P. 15000 Tizi-Ouzou (Algérie)
E-Mail : melbouciba@hotmail.fr

CONTEXTE PROFESSIONNEL

Notre recherche expérimentale a été initiée par le besoin de la région de caractériser le comportement de granulats locaux appelés à résoudre de façon satisfaisante les problèmes techniques et économiques que pose la réalisation des projets de la région, particulièrement les infrastructures routières et la construction de barrages. En effet, l'extraction abusive des matériaux classiques (sables et graviers) très utilisés dans de nombreux programmes de construction, le risque de pollution de la nappe phréatique essentiellement au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou, et la

pluviométrie annuelle très réduite, ont engendré une pénurie de granulats. Devant cette diminution de ressources en matériaux d'origine alluvionnaire, il convient de mettre en place des solutions de remplacement. Les roches magmatiques, particulièrement les pegmatites qui sont disponibles en surface et en grande quantité dans la région, pourraient certainement fournir les quantités nécessaires si nous avions une meilleure connaissance du comportement de ces matériaux. L'exploitation de ce nouveau matériau « pegmatite » peut également être utilisé dans la construction de remblai, et même dans la fabrication du béton... Pourtant ce domaine est peu exploré, bien que quelques

villageois de la région continuent à construire et à couvrir leurs routes et leurs pistes avec ce matériau. L'objectif de notre travail est de valoriser ce matériau en étudiant particulièrement son comportement physique et mécanique et surtout sa durabilité.

1. INTRODUCTION

Jusqu'à la fin des années 60, l'écrasement des grains était traité comme une curiosité plutôt qu'un aspect de l'ingénierie. On a pris conscience, cependant de l'absolue nécessité de prendre en compte le phénomène d'écrasement des grains dans de nombreux cas en génie civil et tout particulièrement dans le cas des barrages et des fondations profondes.

Une première explication possible réside dans le processus de rupture des grains lorsqu'ils se désintègrent sous l'effet d'une contrainte de contact supérieure à sa résistance à la rupture, un grain ne participe plus à la portance globale de la structure, imposant à ses voisins de supporter sa part des contraintes de contact. La rupture se propage donc progressivement.

On peut aussi invoquer la production de particules très fines par désintégration des grains, phénomène dans lequel les liaisons inter-granulaires se trouvent profondément modifiées, de frottantes pour les grains initiaux à visqueuses pour les particules fines.

En fait, le comportement mécanique des matériaux granulaires dépend des propriétés des grains les constituant et de leur arrangement. Sous des sollicitations mécaniques, le grain peut se fragmenter en donnant des éléments de toutes dimensions, il peut s'user par frottement en donnant essentiellement des éléments fins et ce frottement peut conduire dans certains cas à un polissage de surface.

Ces considérations nous permettent de mieux appréhender la partie expérimentale pour arriver à une bonne caractérisation du phénomène de fatigue lié à l'intensité du chargement obtenu à partir d'essais d'altérabilité, d'usure et de fragmentabilité et particulièrement de fluage à l'oedomètre. Ce dernier est défini comme étant la déformation de celui-ci au cours du temps, lorsqu'il est soumis à un état de contrainte constant. Cette notion pour les sols ne peut pas être appliquée directement, du fait de leur nature polyphasique. Dans le cas de l'essai œdométrique, il consiste à mesurer la variation dans le temps de la hauteur d'un échantillon de matériau qui est freiné latéralement. Il permet, en outre, de relier une variation de volume à une contrainte et, par là même présente une analogie avec un essai de fluage volumique, bien qu'en toute rigueur, le fluage volumique ne puisse être appréhendé qu'en soumettant un échantillon à un état de contrainte isotrope.

2. IDENTIFICATION DU MATÉRIAU PEGMATITE

Le massif ancien de grande Kabylie est constitué d'un socle gneissique et d'une couverture schisteuse (Bossière 1971). À côté de ces différents terrains, on note la présence des pegmatites. Elles sont plus abondantes dans la zone limite socle-couverture. Elle est définie comme étant une roche magmatique, qui fait partie de la famille des roches granitiques; elle présente donc la même composition minéralogique que le granit. Les principaux minéraux sont :

- Le feldspath (kaolin)
- Le mica noir (en faible quantité)
- Le quartz de couleur blanc laiteux
- Le mica blanc ou muscovite (brillant)

À partir des observations des terrains et de l'analyse pétrographique, Bossière et Gromov (1973) ont montré l'existence de deux générations distinctes de pegmatites :

- La première est principalement constituée de plagioclase, de biotite et de quartz et qui correspond au matériau étudié.
- Tandis que la deuxième est formée de muscovite, de tourmaline et de quartz.

L'association des deux générations permet de définir la pegmatite de type 1 qui est la plus simple et la plus fréquente. Elle est représentée par des filons couches. Ces derniers sont très répandus et bien visibles (Bossière et Gromov 1973) car ils forment souvent des crêtes (cas d'Aît-Oumalou, de Mekla et de Larbaa-Nath-Irathen) ; tandis que le type 2 n'est constitué que par la seconde génération.

2.1. Origine des échantillons

Les échantillons de pegmatite de type 1 ont été prélevés au lieu dit « Taguemount -ne- Cherif » à 2 Km du chef lieu de la commune d'Aît-Oumalou et à 30 Km au Nord-Est de la Wilaya de Tizi-ouzou. Les granulats utilisés ont été concassés de la façon suivante : blocs initiaux soumis au concassage, granulométrie de sortie 0/20 mm.

2.2. Étude pétrographique

L'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X (analyse quantitative) a été réalisée sur nos échantillons au laboratoire de minéralogie de l'université de Nancy 1 (France). Les résultats ont été confirmés au niveau du Centre de Recherche et du Développement (CRD) de Boumerdès. En effet, le minéral dominant est le Quartz, et les minéraux accessoires sont : l'albite (feldspath), muscovite et microline. Les différents résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 1 ci-après.

Minéraux	Quartz (%)	Albite (%)	Microline (%)	Muscovite (%)	autres minéraux accessoires (%)
Pourcentage	71.4	16.7	1.9	9	0.8

Tableau 1 : Minéralogie des échantillons étudiés.

Après avoir soumis les blocs de roche au concasseur giratoire, les fractions granulaires retenues se répartissent en trois classes granulométriques : 0/6 - 6/10 - 10/14. On obtient les échantillons d'essai par séparation de l'échantillon global de chaque classe granulaire par un diviseur à couloir.

2.3. Caractéristiques physiques

Les valeurs de γ_s , γ_{sat} , w , $\gamma_{d\ opt}$, w_{opt} , Indice CBR et gonflement obtenues sont regroupées dans le tableau 2 ci-dessous :

Les résultats d'analyse pétrographique (Melbouci et Roth 2002) ont montré que le minéral le plus abondant est le quartz avec un pourcentage assez élevé. Le feldspath dans ce matériau est présent sous la catégorie d'albite. En outre les courbes Proctor obtenues sont pratiquement aplaties, le

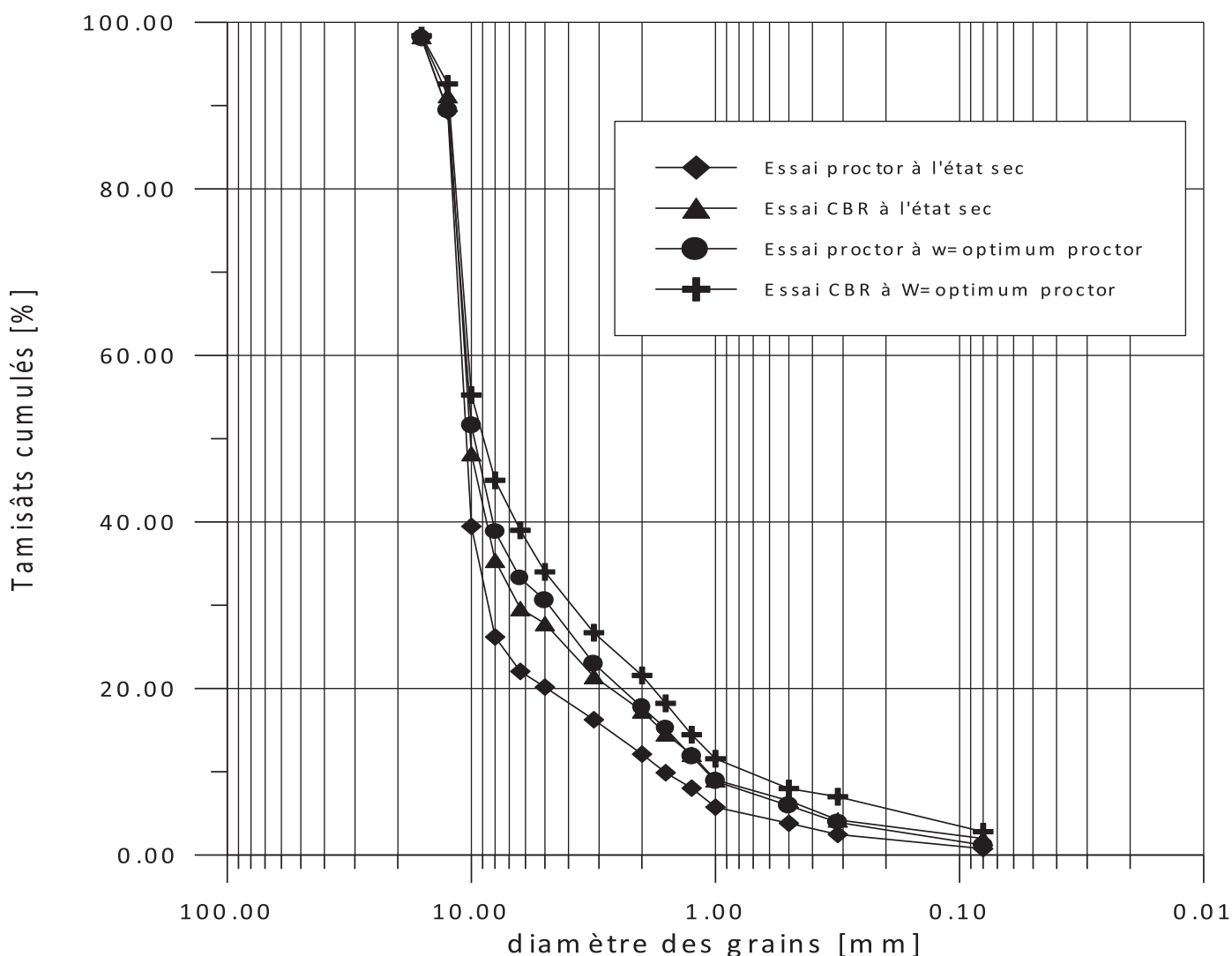
matériau est donc peu sensible à l'eau (Melbouci et Roth 2006). Par ailleurs, les résultats du CBR montrent que la pegmatite a une portance très favorable et un gonflement nul.

2.4. Influence du mode de compactage

Dans ce cas précis, nous avons choisi deux types d'essais : l'essai Proctor modifié et l'essai CBR. Les échantillons testés sont soumis aux deux états sec lâche et humide à teneur en eau optimale. Les résultats montrent que pour des énergies assez proches, les matériaux compactés statiquement donnent plus de rupture des grains que ceux compactés dynamiquement, c'est-à-dire le degré d'écrasement à l'essai CBR est plus important que celui de l'essai Proctor que ce soit à l'état sec lâche ou à l'état humide (figure 1).

caractéristiques	w%	γ_s g/cm ³	γ_{sat} g/cm ³	$\gamma_{d\ opt}$ [g/cm ³]	w_{opt} %	Indice CBR	Gonflement
valeur	17.05	2.67	2.09	1.78	7.78	38.98	0

Tableau 2 : Caractéristiques physiques du matériau pegmatite.



2.5. Influence de l'altérabilité de la pegmatite

Afin d'apprécier la manifestation d'altération dans les pegmatites, nous avons effectué des essais de granulométrie sèche sur différents échantillons avant et après avoir subi plusieurs cycles d'essai d'altérabilité.

En comparant les essais réalisés sur la pegmatite altérée naturellement, et les essais portant sur le même matériau altéré suivant le mode opératoire du Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), nous constatons que la rupture est plus importante dans le deuxième cas que dans le premier (figure 2). En effet, le pourcentage de fines au fond des tamis est plus important pour le matériau altéré suivant le mode opératoire du LCPC (tableau 3). En outre, nous avons remarqué que les trois modes de rupture (écaillage, abrasion et fracture) proposés par Guyon et Troadec (1994), ont été observés sur les grains de pegmatite.

L'essai réalisé sur la pegmatite saine montre que le degré d'écrasement est moindre comparativement aux essais réalisés sur les pegmatites altérées naturellement ou suivant le mode opératoire du LCPC (figure 2).

3. ESSAIS DE RÉSISTANCE À L'USURE, À LA FRAGMENTATION ET À LA DÉGRADABILITÉ

Essais Micro-Deval (MDE) : Ces essais sont effectués sur les classes granulaires 4-6.3 ; 6.3-10 ; 10-14 mm et suivant la norme NFP 18-572 qui définit le mode opératoire pour la mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats. Les résultats de cette étude sont regroupés dans le tableau 4 ci-après.

Matériau	sain	Altéré naturellement	Altéré suivant le mode opératoire du LCPC
% fines sous une contrainte de 3.2 MPa	3.8	5.6	7.86

Tableau 3 : Pourcentage de fines obtenues au dernier tamis suivant l'altérabilité de la pegmatite de granulométrie 6/10 soumise à une contrainte de 3.2 MPa.

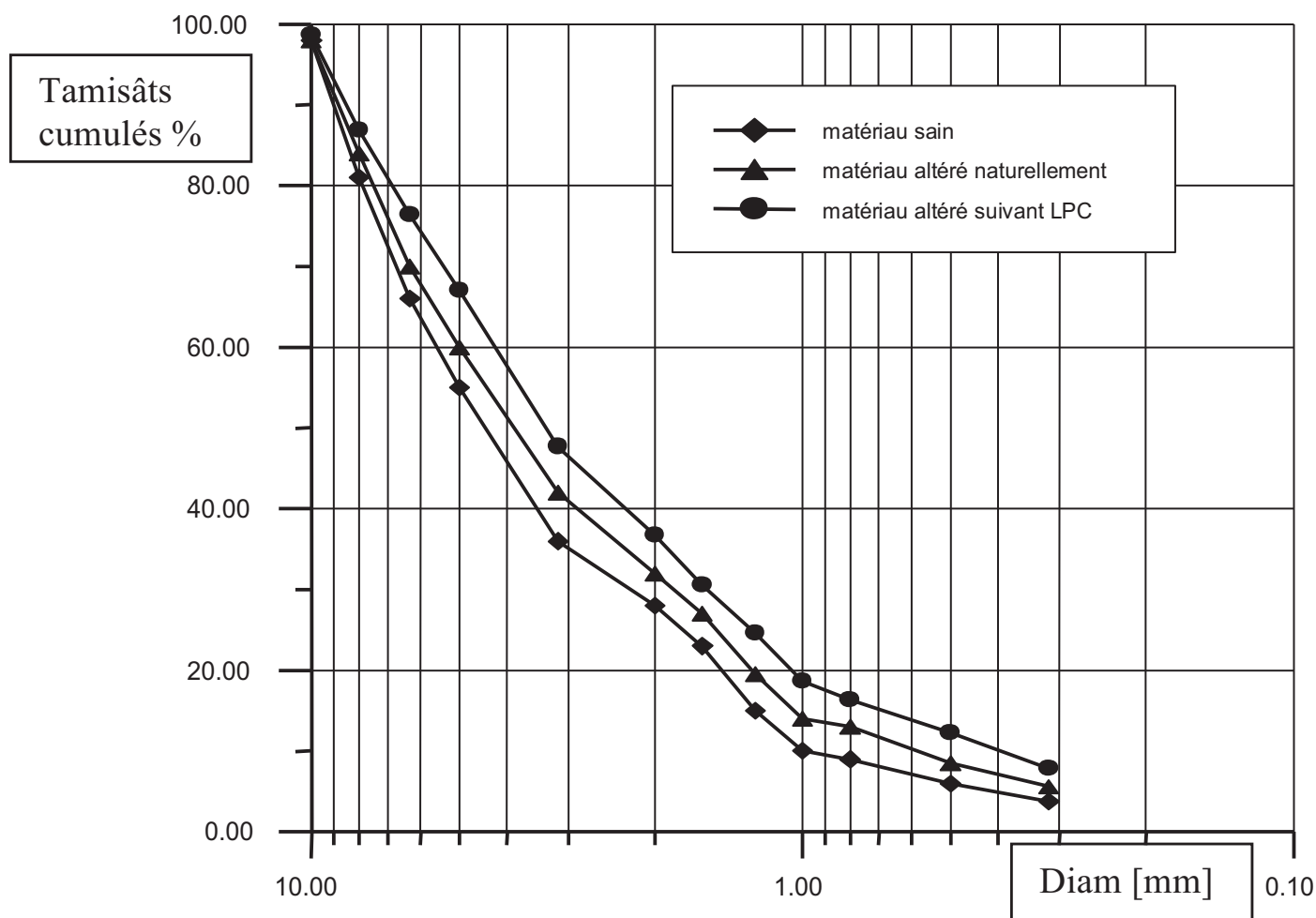


Figure 2 : Influence de l'altérabilité sur le degré d'écrasement des grains de pegmatite de classe granulaire 6/10 soumise à une même contrainte de 3.2 MPa.

Essais Los-Angeles : Le but de ces essais effectués suivant la norme NFP 18-573 est de mesurer la résistance à la fragmentation des éléments de granulats par la mesure de la quantité d'éléments inférieure à 1.6 mm, produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los-Angeles. Les valeurs de Los-Angeles sont portées dans le tableau 4 ci-après.

Essai de fragmentabilité : Cet essai permet de mesurer la sensibilité d'un matériau rocheux à se fragmenter sous la sollicitation des engins de terrassement. La norme NF P94 66 prévoit que si le coefficient de fragmentabilité « FR » est supérieure à 7, donc le matériau est fragmentable. Le matériau pegmatite est fragmentable car $FR=30$ (Figure 3).

Essai de dégradabilité : Cet essai permet d'apprécier les potentialités d'un matériau à évaluer après sa mise en oeuvre sous l'action des cycles (immersion - séchage). Le résultat (figure 4) obtenu est de « 1.11 ». La norme NFP 18-576 prévoit que si le coefficient de dégradabilité est inférieur à 5 : alors, on est en présence d'un matériau peu dégradé. Notons que le mode opératoire de cet essai est identique à celui de l'essai d'altérabilité. Au niveau de l'essai d'altérabilité nous avons déterminé la dégradabilité du matériau pegmatite pour chaque cycle d'immersion séchage.

Les résultats obtenus à partir des différents essais testés, nous permettent de classer ce matériau comme un matériau peu sensible à l'eau et dont les caractéristiques obtenues à partir des essais de granulats montrent que la pegmatite est un matériau peu dégradé mais assez fragmentable et sa résistance à l'usure est satisfaisante si ce nouveau matériau est utilisé à l'état sain.

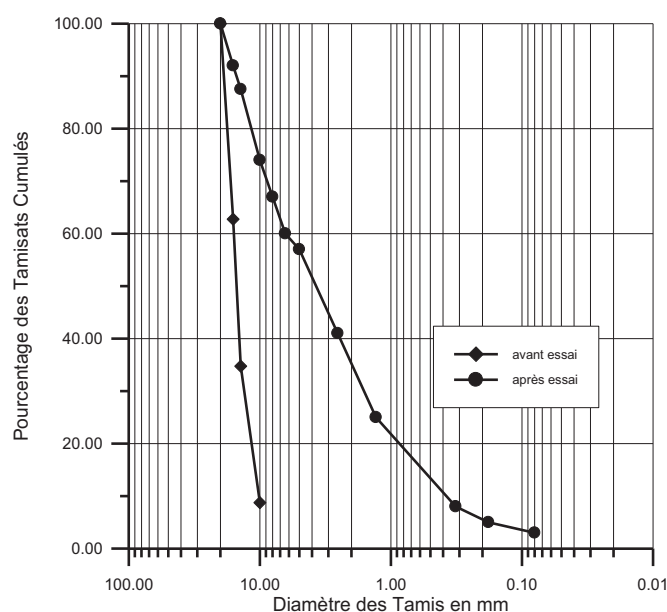
4. ESSAI ŒDOMÉTRIQUE

Les essais œdométriques sont effectués sur les trois granulométries citées ci-dessus du matériau pegmatite. Le matériau est mis en place par déversement sans compactage et se trouve ainsi dans un état lâche. Une deuxième série d'essais a été réalisée à l'état dense ; le matériau est mis en place avec un léger compactage à l'aide d'une dame permettant un meilleur réarrangement des grains. Et une troisième série, où le matériau est mis en place avec une teneur en eau optimale et avec une densité optimale, a aussi été réalisée.

Pour tenir compte de la grosseur des grains, essentiellement pour les classes granulaires 6/10 et 10/14, nous avons confectionné des moules œdométriques de grande dimen-

Essais	Micro-Deval		Los-Angeles	
	Matériau saint	Matériau altéré	Matériau saint	Matériau altéré
4 - 6.3	45%	79%	43%	64%
6.3 - 10	44%	77%	39%	60%
10 - 14	32%	48%	28%	45%

Tableau 4 : Résultats des essais Micro-Deval et Los-Angeles.



sion. Nous avons donc augmenté le diamètre de 5 à 7,5 cm et la hauteur de 2 à 3 cm, tout en gardant le même élanement.

Ces essais œdométriques, à huit paliers de chargement (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 et 128 kg), ont pour objectif de simuler l'histoire des différentes éprouvettes aux trois états étudiés et pour obtenir des valeurs plus fiables de la compressibilité de ce matériau. En fait cette compressibilité n'est que le résultat de la densification des échantillons qui entraînent suivant les contraintes appliquées des modifications plus ou moins importantes de la structure telles que :

- le serrage des grains les uns contre les autres, surtout pendant la phase initiale de chargement ;
- le glissement relatif des grains ;
- et aussi, la fragmentation des grains surtout aux points de contact lorsque l'échantillon est soumis à de contraintes élevées.

4.1. Courbes de chargement-déchargement obtenues

Dans un premier temps, nous avons effectué des essais à plusieurs cycles de chargement-déchargement. Les trois cycles sont réalisés respectivement au troisième puis au cinquième et enfin au dernier palier. Les courbes de compression œdométrique obtenues sont présentées sur les figures 5 et 6. On constate que le comportement du sol n'est pas réversible lors du déchargement, cependant dans

la phase de recharge, le chemin est très peu différent du chemin de charge et retrouve la courbe initiale au point où l'on a amorcé la décharge pour le premier cycle. Plus on passe aux cycles suivants plus l'irréversibilité s'accroît. Une évolution de la déformation axiale $[\Delta h/h]$ en fonction de l'augmentation de la granulométrie, a été constatée. Plus le matériau est dense, plus cette déformation diminue. La différence entre les indices des vides des trois granulométries est très grande avant les différents essais. Après les cycles de chargement déchargement, la différence des valeurs de ces indices est de l'ordre du millièm ; soit des indices des vides très proches.

Les essais cycliques de la figure 7, mettent en évidence un accroissement de la déformation axiale $[\Delta h/h]$ tout à fait significatif. C'est l'état dense qui donne la plus petite déformation axiale des échantillons. Les essais réalisés avec les classes granulaires 6/10 et 10/14 ont montré que le tassement évolue avec la taille des grains : plus la taille est importante, plus le tassement est important.

4.2. Effet du temps

Pour tous les échantillons, on peut distinguer deux phases de fluage : la première transitoire, a duré à peu près une semaine et a engendré une déformation moyenne importante ; la seconde, phase de fluage amorti, a duré jusqu'à la fin de l'essai, soit 128 jours, durant laquelle les échantillons ne se sont déformés que très peu à une vitesse qui semble constante.

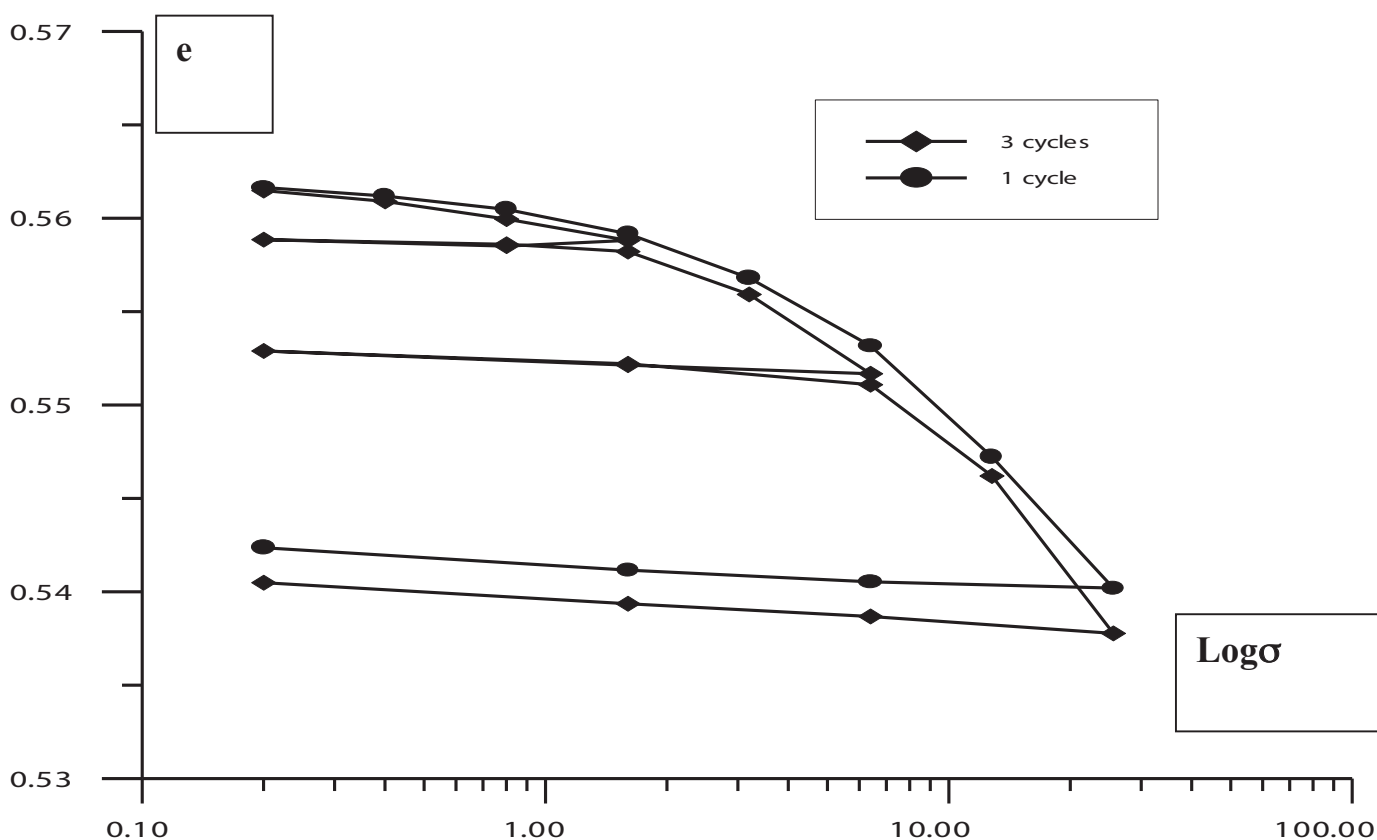
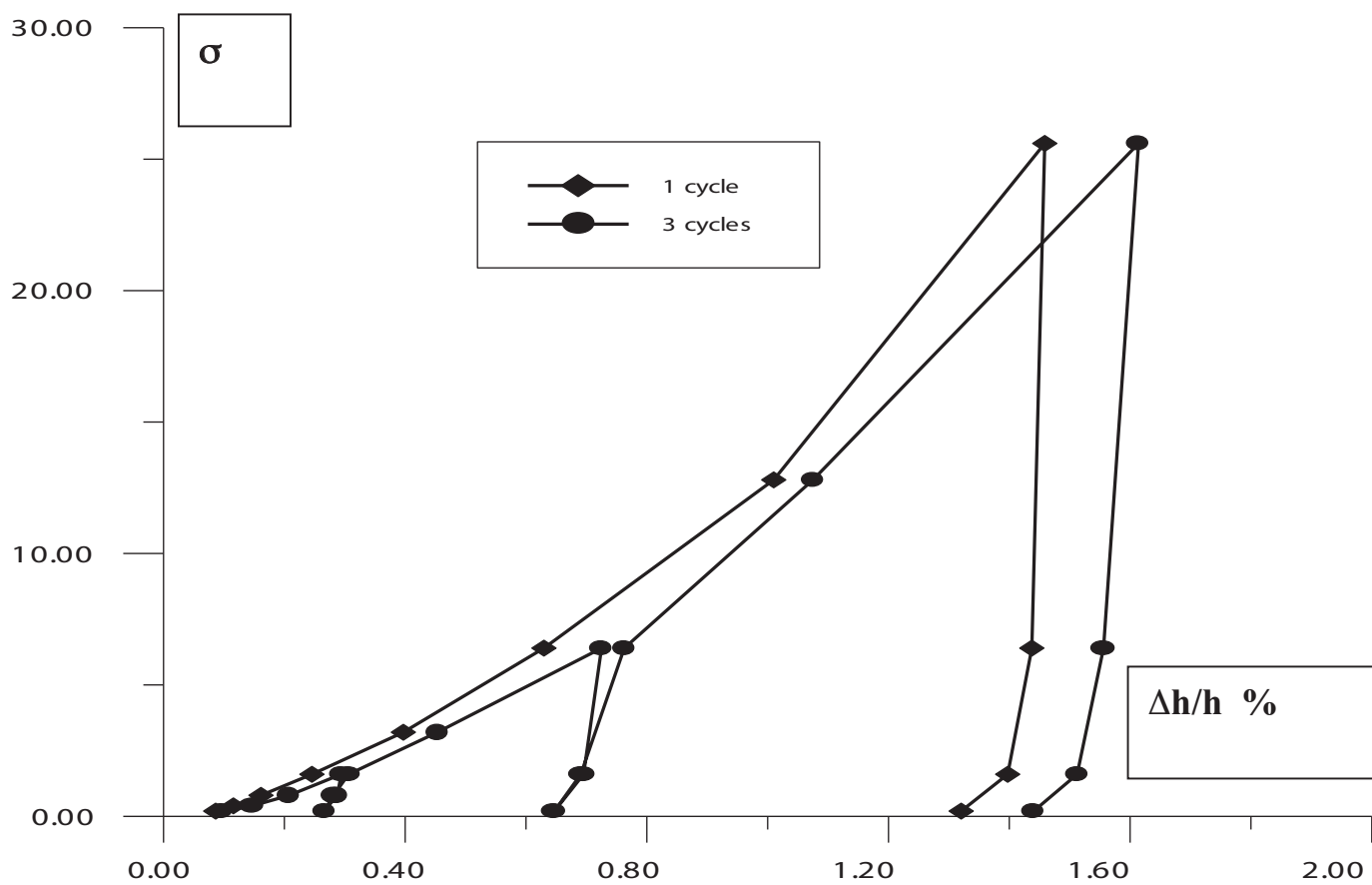
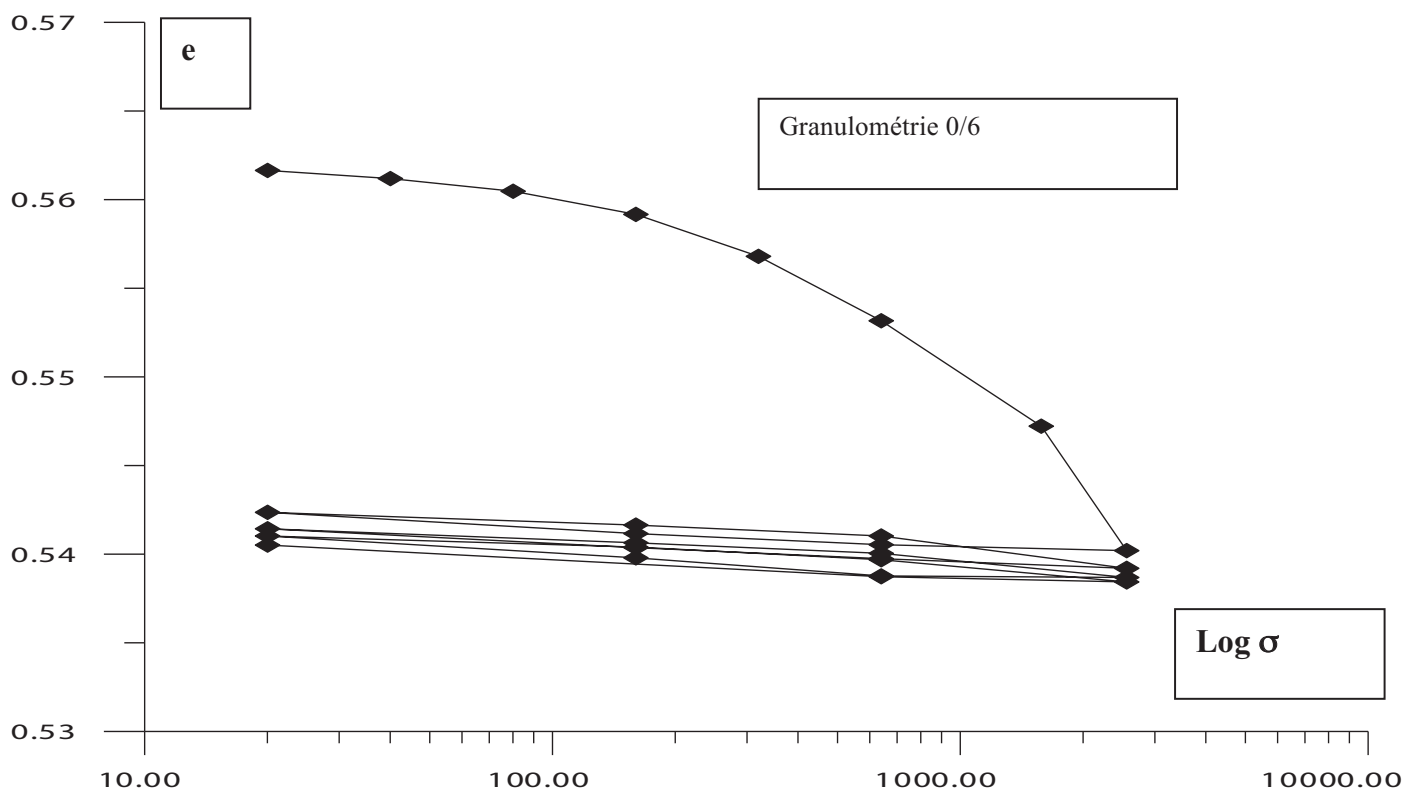


Figure 5 : Comparaison des courbes œdométriques à 3 cycles et à un seul cycle pour la granulométrie 0/6 à l'état dense.



L'étalement granulométrique résultant de l'écrasement des grains et les propriétés de fluage ont été évalués en fonction des efforts verticaux s'étendant de 100 à 12800 kPa. Cet étalement détermine le nombre de contacts entre grains qui varie selon la forme et la compacité du matériau dans les cellules œdométriques. En effet, la rupture des grains est importante au début du chargement pour un échantillon peu dense puis devient semblable à celui d'un échantillon dense. Bard (1993) a montré, à partir des résultats d'essais œdométriques sous fortes contraintes sur un sable quartzique, que le tassement est une fonction linéaire du logarithme du temps, ce résultat a été confirmé par Leung et al (1996) en travaillant sur un essai centrifugé d'un groupe de pieux. Une des explications donnée à ce phénomène est que si un

grain casse, l'équilibre du milieu n'est plus assuré, il faut un certain temps pour que le milieu retrouve une nouvelle position d'équilibre. Les grains avoisinants doivent alors reprendre une partie des efforts que supportait le grain avant rupture. Cet accroissement de contraintes peut provoquer la rupture de nouveaux grains qui nécessitera une nouvelle recherche d'état d'équilibre.

Dans cette étude, les résultats ont montré que le degré d'écrasement, au cours de nos différents essais œdométriques, évoluent non seulement en fonction de l'augmentation de la charge (figure 9), mais aussi avec le temps pour un chargement donné (figure 8). L'écrasement des grains est ainsi mesuré en comparant les courbes granulométriques avant et après chaque essai œdométrique.

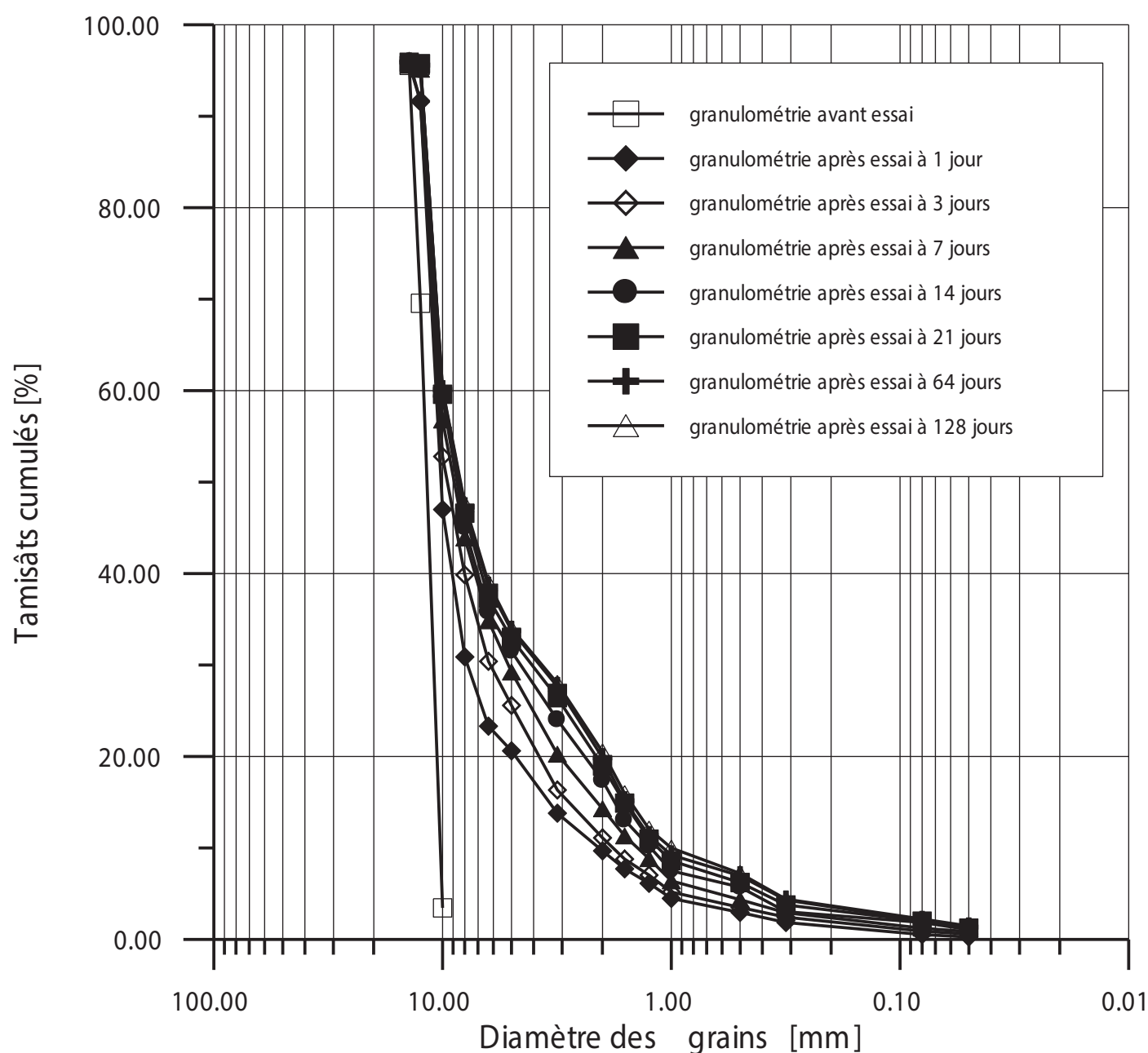


Figure 8 : Évolution de l'écrasement des grains en fonction du temps pour la granulométrie 10/14 du matériau pegmatite sous une charge de 64 Kg.

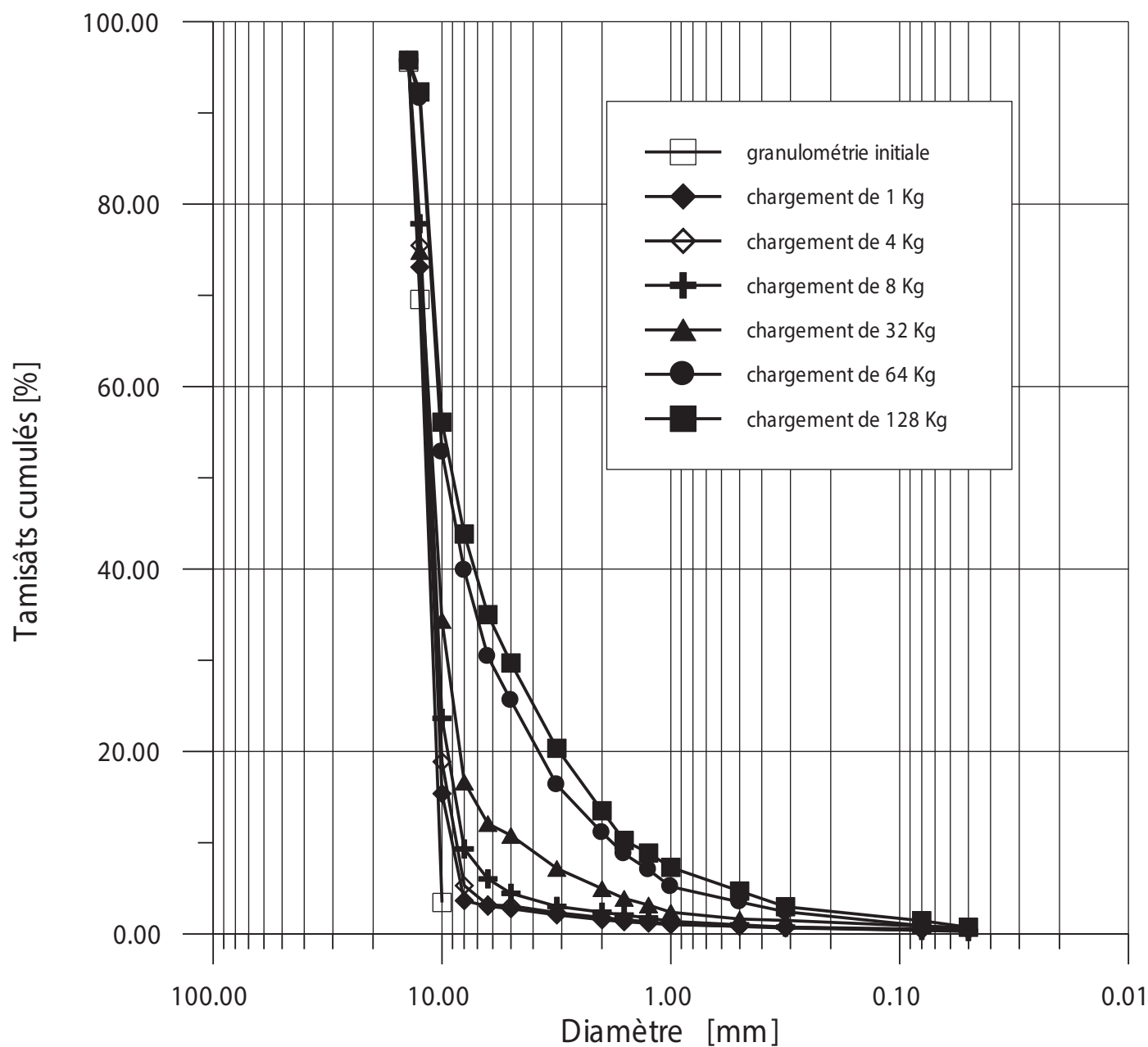


Figure 9 : Évolution de l'écrasement des grains en fonction de la charge pour la granulométrie 10/14 du matériau pegmatite à l'état sec lâche.

4.3. Quantification de la rupture des grains

Pour quantifier la rupture des grains de pegmatite aux essais oedométriques, deux paramètres ont été retenus :

4.3.1. Le coefficient d'uniformité « Cu »

Le coefficient d'uniformité est défini par la formule (1) ci-dessous.

$$Cu = (D_{60} / D_{10}) \quad (1)$$

D_{60} : c'est le diamètre correspond à 60% du tamisât cumulé.

D_{10} : c'est le diamètre correspond à 10% du tamisât cumulé.

4.3.2. Facteur « B_{10} »

Lade et Yamamuro (1996), ont déterminé le paramètre B_{10} défini par la formule (2) :

$$B_{10} = 1 - (D_{10f} / D_{10i}) \quad (2)$$

Avec :

D_{10i} : c'est le diamètre correspondant à 10% du tamisât cumulé avant essai.

D_{10f} : c'est le diamètre correspondant à 10% du tamisât cumulé après essai.

$$0 \leq B_{10} \leq 1 :$$

Plus B_{10} se rapproche de 1, plus il y a rupture.

Les résultats sont présentés sous forme de graphes donnant Cu et B_{10} en fonction de la charge et du temps.

Quel que soit la classe granulaire, l'étalement granulométrique croît avec la charge ou la contrainte appliquée (figure 9). Plus la taille des grains augmente (cas de la 6/10 et 10/14), plus la cassure des grains devient franche. Cet écrasement des grains évolue avec le temps comme le montre la figure 8.

L'état humide donne des écrasements plus conséquents qu'à l'état sec lâche ; l'eau a tendance à favoriser l'effritement des grains. En fait, l'écart entre les courbes pour les états sec lâche ou humide est assez important, ce qui justifie que la présence d'eau a une influence sur la cassure des grains.

La quantification du taux d'écrasement des grains est évaluée par les paramètres C_u et B_{10} . Ces deux paramètres n'évaluent pas de la même façon le problème d'écrasement

des grains (B_{10} est borné entre 0 et 1 ; alors que C_u ne l'est pas et peut prendre des valeurs élevées). La figure 10 montre que plus C_u est élevé, plus le degré d'écrasement est important. On constate que C_u évolue jusqu'à 64 kg à l'état sec lâche puis tend à se stabiliser. Par contre à l'état humide, l'écart se creuse entre les deux états à partir de 64 kg.

Les courbes C_u en fonction du temps montrent bien le décalage entre l'état sec et l'état humide. Ce qui justifie que la dégradation des grains évolue avec le temps et elle est d'autant plus importante que le matériau est humide (figure 11). À l'état sec lâche, C_u augmente jusqu'au 32^e jour puis tend à se stabiliser. Par contre à l'état humide, l'écart se creuse entre les deux états en fonction du temps.

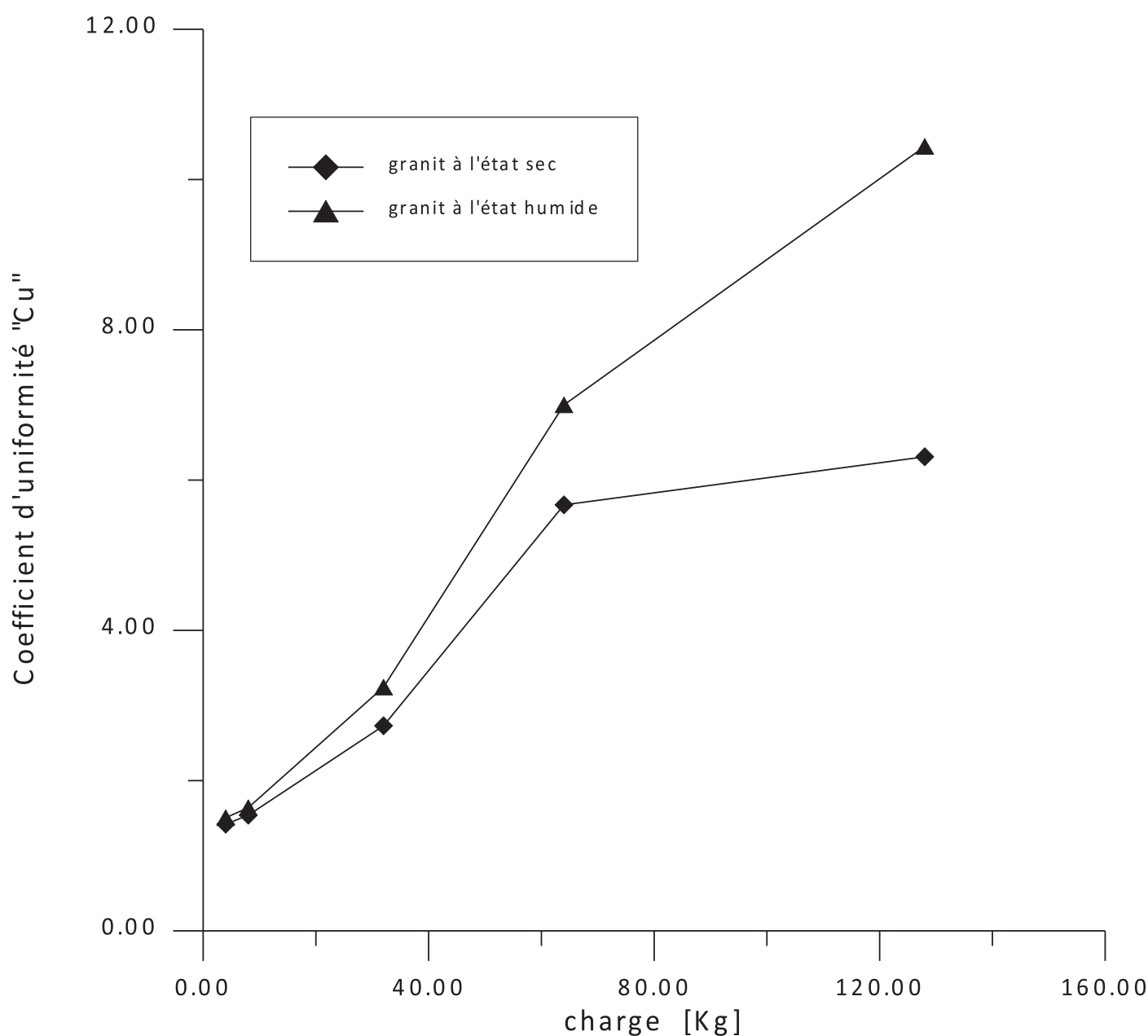


Figure 10 : Évolution du coefficient C_u en fonction du chargement du matériau pegmatite de classe granulaire 10/14.

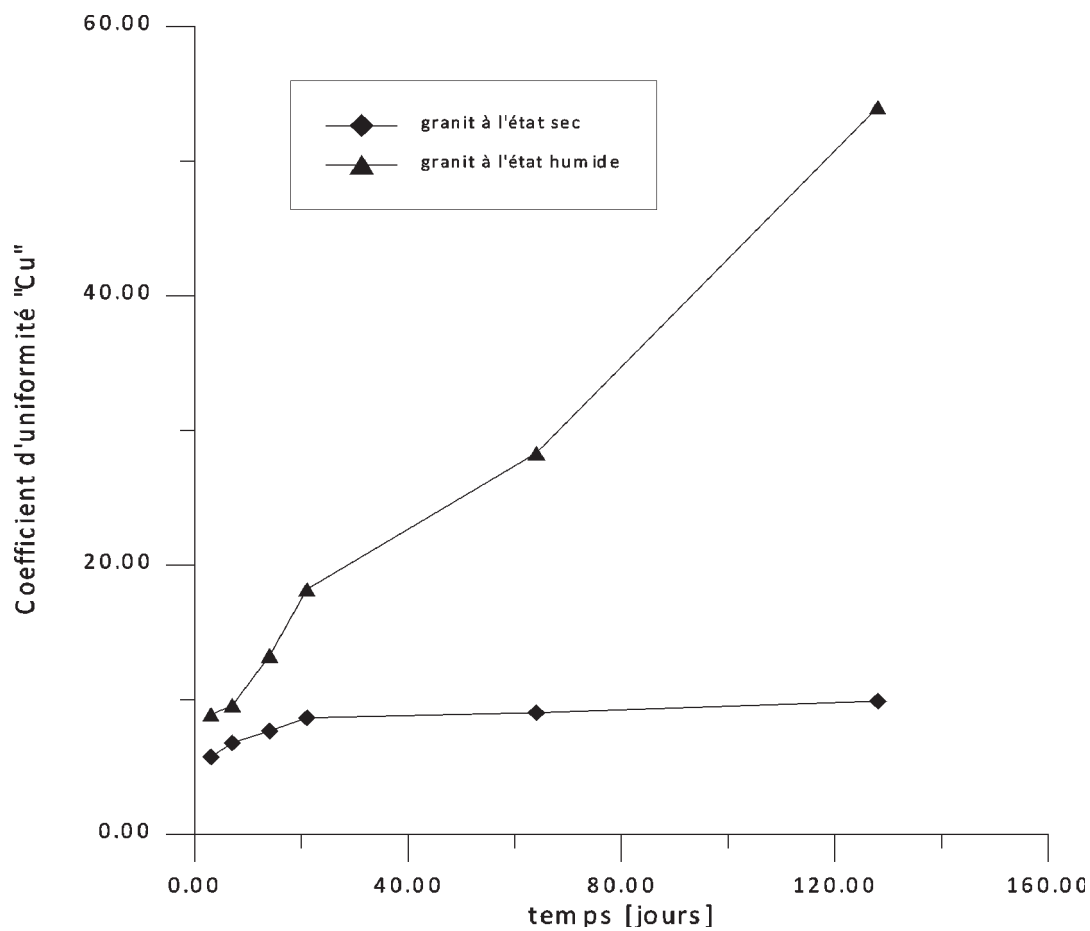


Figure 11 : Évolution du coefficient C_u en fonction du temps du matériau pegmatite de classe granulaire 10/14.

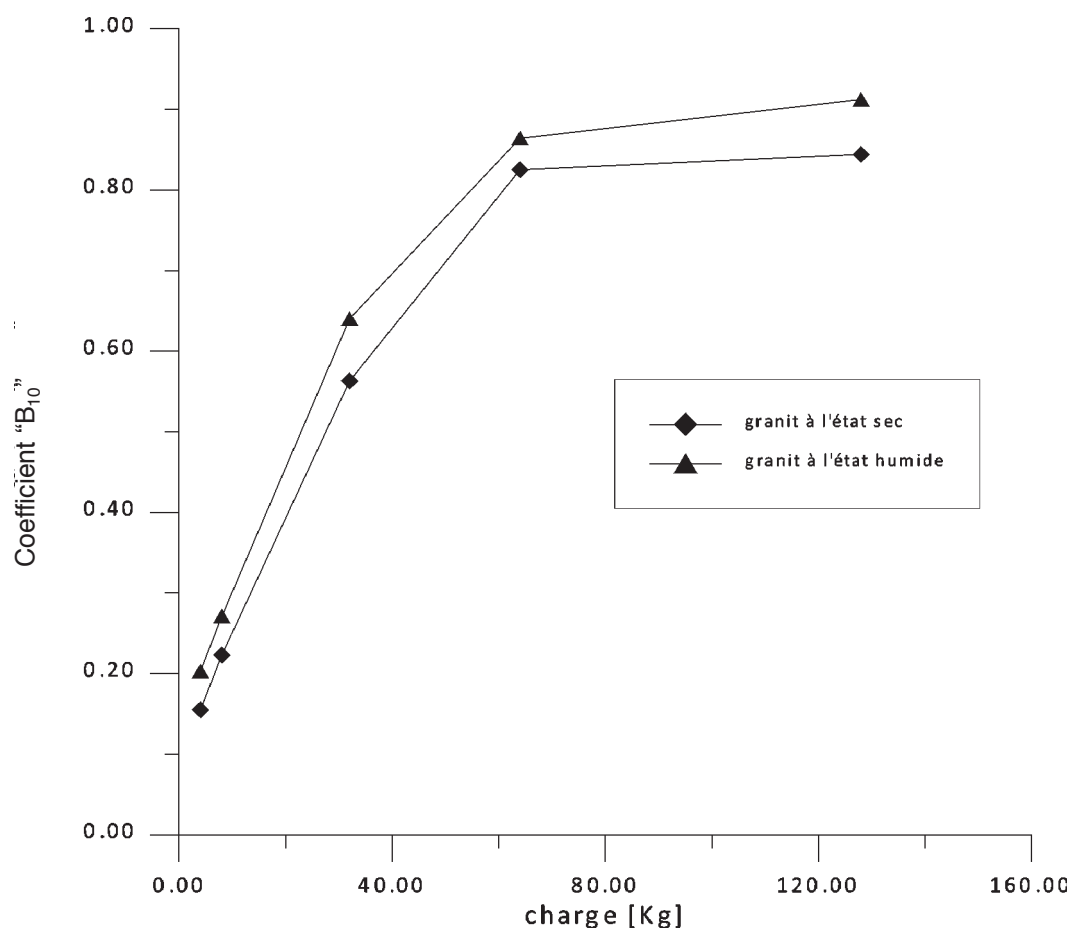


Figure 12 : Évolution du coefficient B_{10} en fonction du chargement du matériau pegmatite de classe granulaire 10/14.

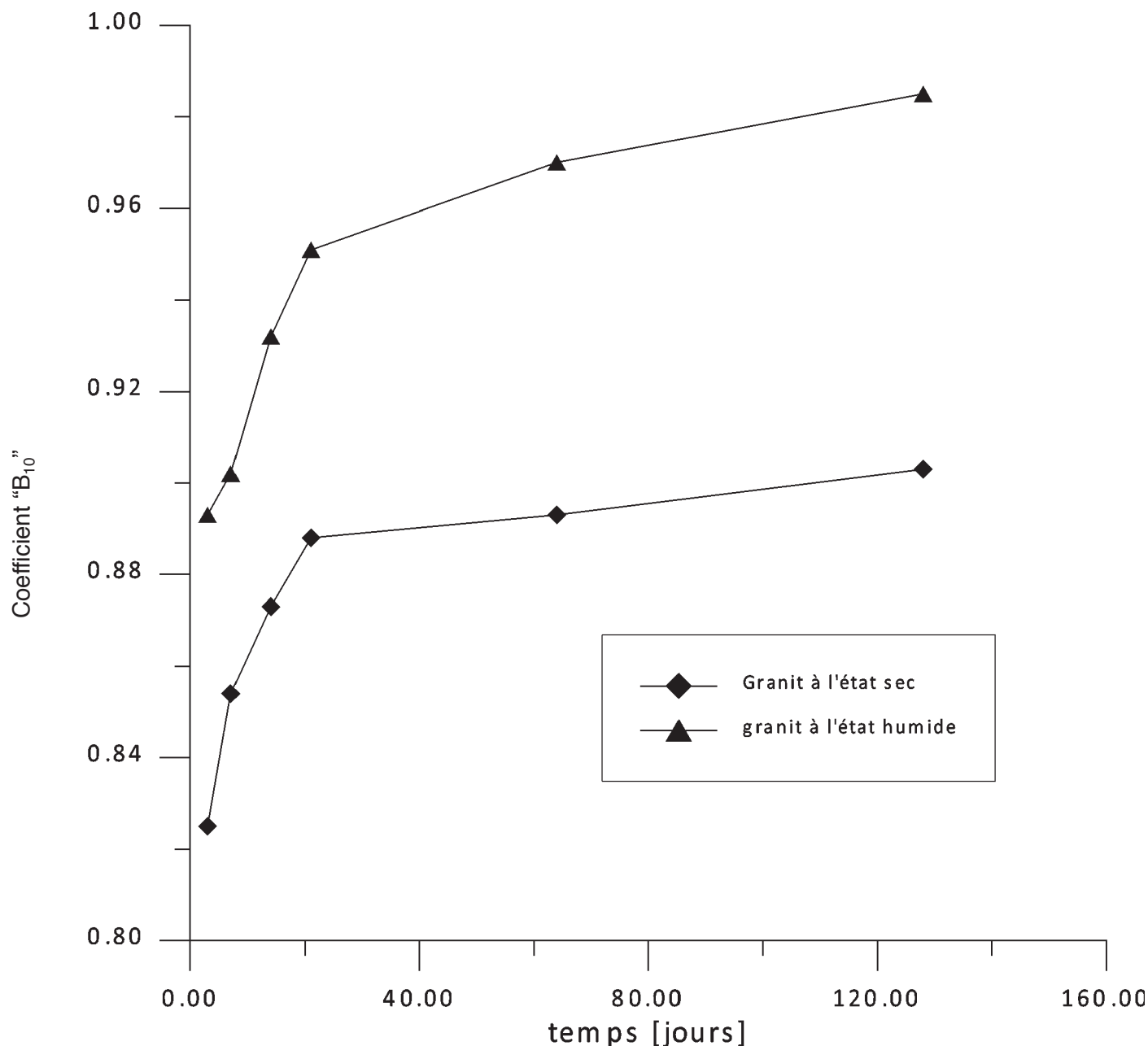


Figure 13 : Évolution du coefficient B_{10} en fonction du temps du matériau pegmatite de classe granulaire 10/14.

Concernant le paramètre B_{10} , les courbes de la figure 12 montrent que l'écrasement augmente jusqu'à 64 kg puis tend à se stabiliser que se soit pour l'état sec lâche que pour l'état humide. Ce paramètre montre un léger décalage entre les deux états.

On constate sur la figure 13 que les courbes du paramètre B_{10} en fonction du temps montrent un grand décalage entre l'état sec lâche et l'état humide. L'eau joue donc un rôle important dans la rupture des grains. Cette évolution de B_{10} est assez brutale jusqu'à 21 jours tant pour l'état sec lâche que pour l'état humide, puis elle tend à se stabiliser. En effet, l'eau a tendance à fragiliser les parties superficielles des grains qui s'effritent au bout de 21 jours pour atteindre ensuite les noyaux durs de ces derniers qui sont assez résistants.

4.4. Influence de la teneur en eau

Pour des contraintes courantes et des contraintes élevées qui ont permis de comparer les différents comportements observés pour les états secs lâches, saturés ou à teneur en eau optimale. Nous avons constaté que le comportement des échantillons partiellement saturés, compactés autour de l'optimum Proctor de teneur en eau, diffère peu de celui des échantillons saturés. Par contre, les essais réalisés sur des échantillons secs montrent une rupture des particules moins importante que l'état partiellement saturé (figure 15). L'immersion des échantillons secs étudiés peut induire de grandes déformations résultant de l'effondrement de l'état de ces matériaux sur leur surface limite. Le décalage entre l'état sec et l'état humide augmente en fonc-

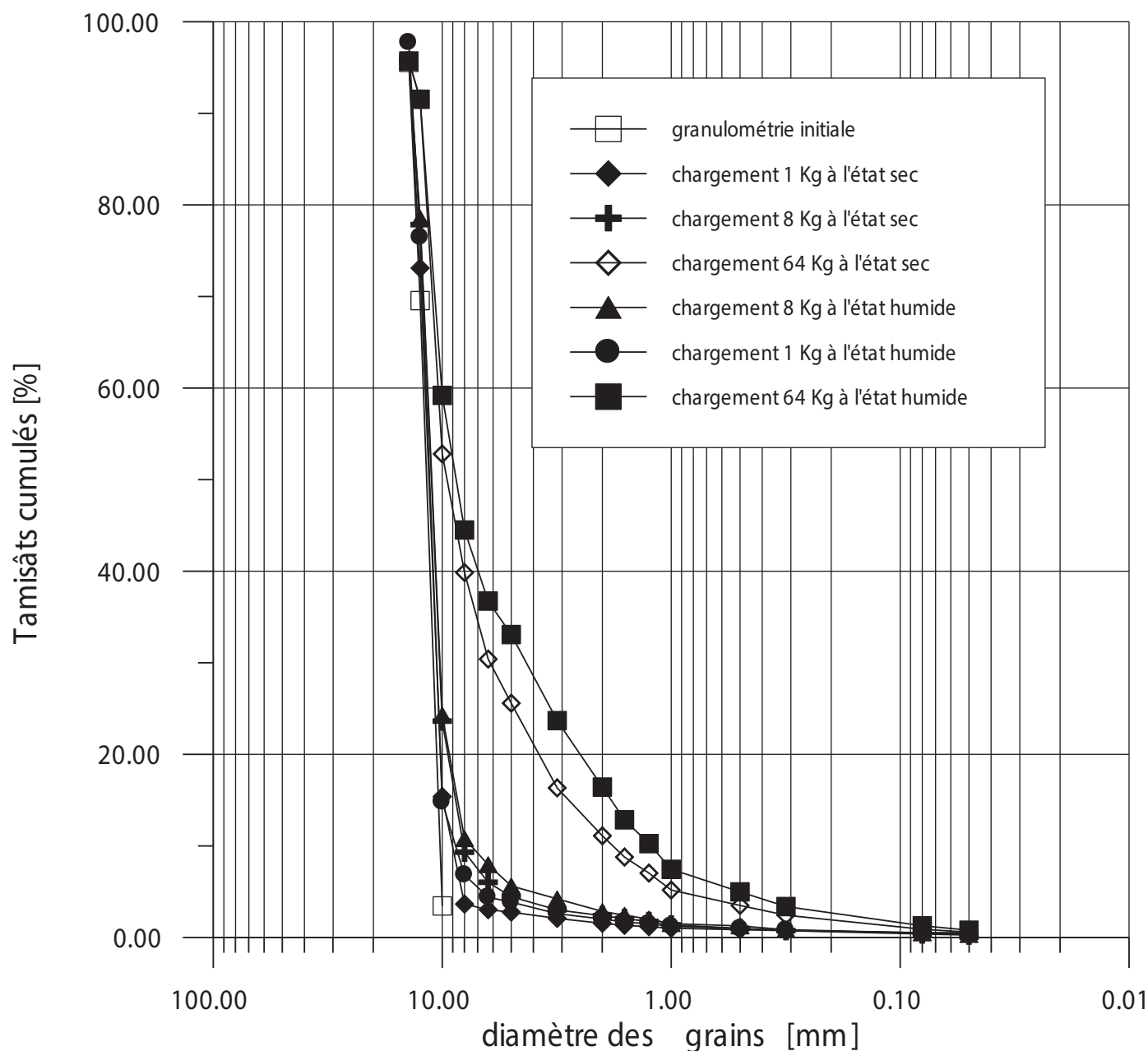


Figure 14 : Évolution de l'écrasement en fonction de l'état du matériau et de la charge appliquée pendant 21 jours.

tion du temps (figure 14). Les résultats obtenus confirment ceux de Lee et Coop (1995).

5. CONCLUSION

Une forte corrélation existe entre la durée de vie (ou le paramètre temps) en fatigue et l'état d'écrasement des grains. En effet, les principaux résultats obtenus montrent que :

- Le matériau ainsi étudié est une pegmatite à micas avec un pourcentage assez important de quartz. C'est un matériau peu sensible à l'eau, peu dégradé avec une résistance à l'usure assez importante si ce nouveau matériau n'est pas altéré ;
- Le mode de compactage influe sur le degré d'écrasement des grains ;

- La rupture des grains augmente avec la taille des grains, avec l'augmentation de la charge et en fonction du temps ;
- La présence d'eau rend très vulnérable le matériau pegmatite et surtout en fonction du temps. Les paramètres C_u et B_{10} confirment ce résultat ;
- Plus le matériau est dense, plus le temps de dégradation est long ;
- Avec l'ajout de l'eau, l'écrasement des grains se trouve accentué avec un temps plus court.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Brossière, Distinction d'un socle et d'une couverture au sein du massif ancien de Grande Kabylie. (Algérie, C. R. Acad. Sci., Paris, t. 273, pp. 1547-1548. (1971).

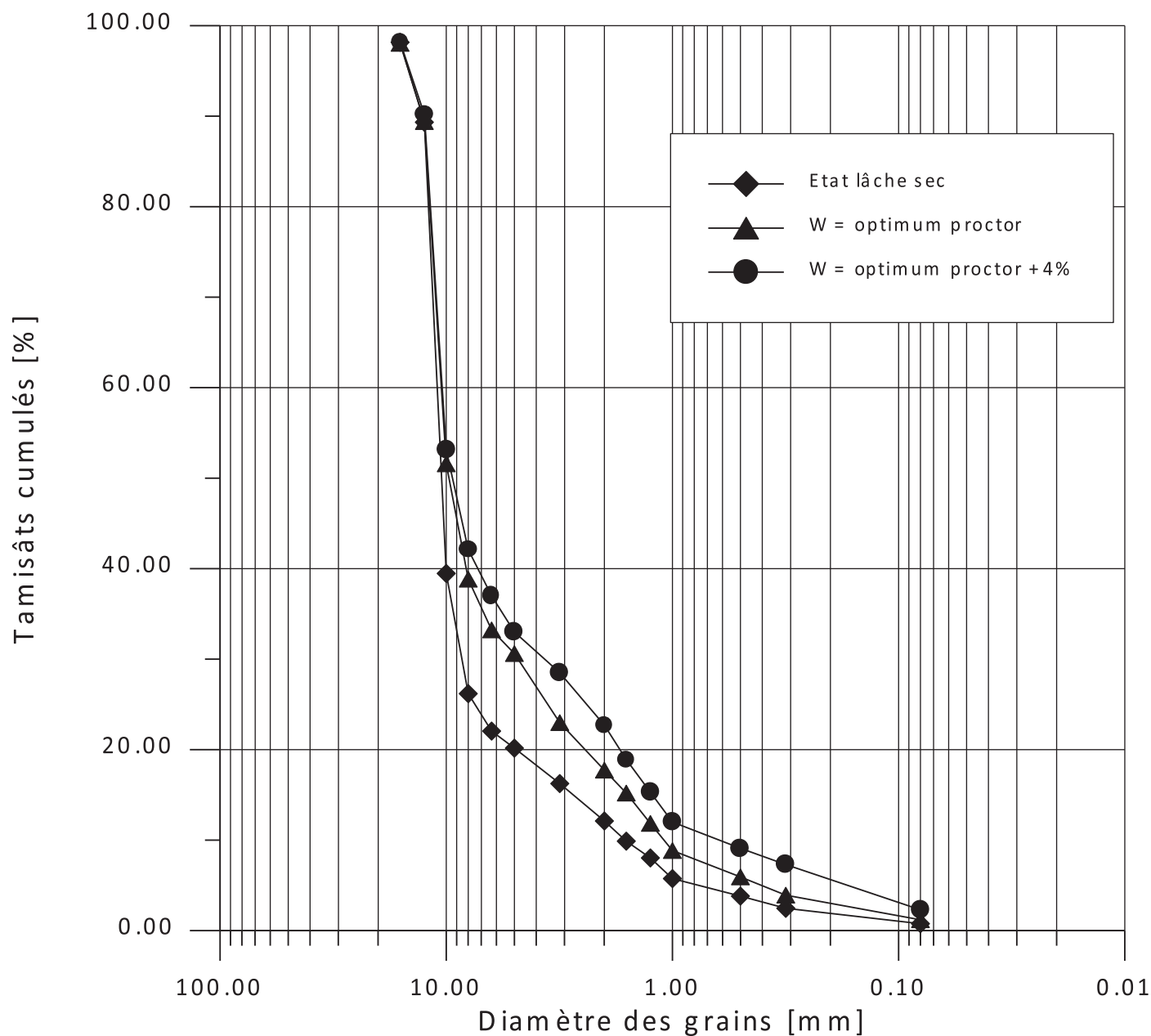


Figure 15 : Évolution de l'écrasement en fonction de la teneur en eau pour une charge de 128 kg pendant 21 jours.

- [2] G. Brossière. et A. Gromov, Morphologie et mode de mise en place des corps pegmatitiques du massif cristallophyllien de grande Kabylie (Algérie), *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord. Alger*, t.64, fasc. 3 et 4, 1973.
- [3] B. Melbouci. et J.C. Roth, Identification du matériau pegmatite de la région de Kabylie, *Revue Algérie Équipement* N°36 Décembre 2002.
- [4] B. Melbouci. et J.C. Roth, Étude du comportement des matériaux concassés à l'écrasement, *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, N° 3, juin 2006, pp. 37-50.
- [5] E. Guyon. et J.P. Troadec, Du sac de billes au tas de sables, Éditions Odile Jacob, Sciences, 1994.
- [6] P. V. Lade, J. A. Yamamuro et al., Significance of particle crushing in granular materials, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 122, N° 4, 1996 pp. 3109-3116.
- [7] I. K. Lee et M. P. Coop, The intrinsic behaviour of a decomposed granite soil, *Geotechnique* 45, N°1, 1995, pp. 117-130.
- [8] E. Bard, Comportement des matériaux granulaires secs et à liant hydrocarboné, Thèse École Centrale de Paris, 1993.
- [9] C. F. Leung et Al, The role of particle breakage in pile creep in sand, *Can. Geotech. J.* 33; 888-898, (1996).
- [10] Normalisation Française :
 - * Granulats : essai d'usure Micro-Deval, P18-572, octobre 1978
 - * Granulats : éléments pour l'identification des granulats, P18-557, décembre 1980
 - * Granulats : mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, P18-554, décembre 1979
 - * Granulats : mesure du coefficient de friabilité des sables, P18-576, octobre 1978
 - * Granulats : analyse granulométrique par tamisage, P18-560, septembre 1990
 - * Granulats : essai Los-Angeles, P18-573, octobre 1978