

ANALYSE DU PHENOMENE DES DEFORMATIONS DIFFEREES DU BETON (FLUAGE ET RETRAIT)

N. BELARIBI BELAS
T. KADRI
I.G.C
Centre Universitaire de
Mostaghanem

RÉSUMÉ

Tout au long de sa durée de vie, le béton subit des déformations dimensionnelles non négligeables au jeune âge mais qui se stabilisent à long terme. Ces déformations, telles que le retrait, sont dues à l'hydratation du ciment et les échanges d'eau avec l'atmosphère indépendamment de toute sollicitation mécanique externe. Celles du fluage résultent de l'application d'une charge stationnaire permanente dès les premiers jours de durcissement.

Durant cette analyse, nous allons décrire, après un aperçu sur les recherches dans le domaine des déformations différées, les différents retraits et fluage ainsi que les facteurs généraux qui influent le comportement différé.

MOTS CLÉS

Retrait • fluage • béton • dessiccation • autodessiccation • contraintes • hygrométrie • effet d'échelle.

1. Introduction

Le béton est un matériau utilisé depuis plus d'un siècle mais la connaissance de certains des paramètres influents sur son comportement n'est pas encore maîtrisée de nos jours. Son comportement à long terme demeure l'une des préoccupations des constructeurs notamment en terme de déformations différées. En effet, le problème est de comprendre les phénomènes qui interviennent afin de prévoir ce comportement et essayer d'étudier tous les paramètres qui peuvent l'influencer. On peut citer, entre autres, les caractéristiques microstructures et hydriques du béton qui ont un effet direct sur le comportement mécanique et la durabilité des structures. Les mouvements d'eau en phase liquide et gazeuse au sein du réseau poreux liés au séchage du béton vont, en particulier, engendrer des déformations différées (retrait, fluage) et d'éventuelles fissurations.

Le phénomène des déformations différées du béton est très complexe, cependant les recherches effectuées dans ce domaine contribuent suffisamment à la connaissance du comportement à long terme d'un matériau composite tel que le béton.

2. Historique des études sur les déformations différées

Les recherches sur les déformations différées ont été entreprises depuis plusieurs dizaines d'années déjà. La première étude sur le fluage est celle que publia Woolson en 1905 sur des ponts en béton armé. Mais dans le même temps, la circulaire de 1906, premier règlement français de béton armé postulait un comportement parfaitement élastique du béton.

C'est à Freyssinet [9], en 1912, que revient le mérite d'avoir remis en cause le dogme de la constance du module de Young, ses premières affirmations publiques de l'existence d'une variation considérable du module de déformations en fonction de la durée de chargement, se heurtèrent à une incompréhension totale.

En (1933) Freyssinet a été le premier à émettre une théorie tendant à expliquer le fluage: la dépression capillaire, qui est fonction de la courbure des ménisques de séparation eau-

vapeur (loi de Laplace), est considérée comme responsable de la déformation due au chargement. La formation de ces ménisques, qui dépend de l'humidité relative (loi de Kelvin), est conditionnée aussi par la contrainte appliquée.

Pour Freyssinet, le fluage n'est autre qu'un retrait amplifié par le chargement qui augmente la vitesse et la quantité d'eau évaporée.

L'Hermite a poursuivi certaines recherches sur ce sujet pendant plus de 30 ans et en a rapporté les résultats dans plusieurs communications et des publications où le nom de Mamillan se trouve souvent associé. En 1957, il présente les différents facteurs intervenants dans le déroulement du fluage en compression stationnaire :

- La durée du chargement,
- L'intensité de la contrainte appliquée,
- L'âge du béton au chargement,
- Le mode de conservation,
- La composition du béton,
- Le volume sollicité.

Mamillan a établi en 1960 que le mouvement de l'eau contenue dans le béton serait la cause principale du fluage et, plus précisément, sa vitesse de déplacement à l'intérieur du matériau hydraté.

Powers (1966) [17] considère que, sous l'action de la charge extérieure, l'énergie libre de l'eau absorbée change et met l'eau en mouvement, provoquant une modification de distribution des gradients hydriques.

Bazant et Chern (1985) expliquent le fluage par l'évolution des couches d'eau absorbée, c'est-à-dire par la diffusion de l'eau et du solide dissout.

Depuis les premières constatations pratiques de Freyssinet, les recherches sur les déformations différées n'ont donc pas cessé d'évoluer.

3. Les déformations différées en l'absence de charges extérieures

La pâte de ciment manifeste des variations dimensionnelles en l'absence de chargement. Les déformations résultantes sont des contractions appelées retraits. Elles sont surtout en relation avec sa dessiccation par échange d'eau avec le milieu ambiant et son autodessiccation par hydratation du ciment lors de la structuration de la

pâte.

On peut attribuer le retrait des bétons à trois phénomènes :

Le premier est thermique. La réaction d'hydratation est fortement exothermique, ce qui conduit à des élévations de température. Dans les pièces massives, la prise se fait alors à chaud et des gradients de contraintes se développent au cours du refroidissement.

Le second est chimique. Il est dû à la contraction selon Le Chatelier (1900)[11], le retrait ainsi causé résulte d'une autodessiccation de la pâte due à la poursuite de l'hydratation.

Le troisième est hydrique. Le séchage naturel entraîne des variations dimensionnelles considérables de la pâte de ciment durcie, difficiles à déterminer directement à cause de la lenteur du processus.

3.1 Phénomène thermique

La réaction d'hydratation du ciment est exothermique, elle s'accompagne d'un dégagement de chaleur de 150 à 400 Joules par gramme de ciment [1] et le béton s'échauffe de 40 à 65°C au dessus de la température initiale en conditions adiabatiques. Au fur et à mesure de l'avancement de l'hydratation, le dégagement de chaleur ralentit et le béton refroidit, la durée de refroidissement étant une fonction du carré de l'épaisseur de la pièce considérée ; la contraction du matériau due à ce refroidissement est appelée retrait thermique.

Lorsque cette chaleur n'est pas rapidement évacuée dans des structures massives, la température au cœur des pièces est plus élevée qu'en peau. Les écarts de température entre le cœur et la peau, ainsi que le retrait thermique sont susceptibles d'entraîner, lors du redroidissement, l'apparition de contraintes de traction résiduelles et éventuellement une fissuration.

3.2 Phénomène chimique

Lors de l'hydratation, l'eau de gâchage est progressivement consommée pour former des hydrates. Cette hydratation présente un bilan volumique négatif : le volume des hydrates est inférieur à la somme des volumes des constituants (eau et ciment anhydre) consommés.

Cette diminution de volume est très impor-

tante puisqu'elle est de l'ordre de 10% du volume de l'eau et du ciment anhydre [Buil, 1990]. Les produits d'hydratation occupent un volume plus faible que les réactifs. Ce retrait d'origine chimique expliqué par la contraction. Le Chatelier [11] est d'abord libre : il continue tant que les ponts formés entre les hydrates ne constituent pas un squelette suffisamment solide pour s'opposer au rapprochement relatif des grains hydratés, tant que la prise n'a pas eu lieu. Ensuite, il se trouve gêné par le squelette de plus en plus rigide. Le liquide ne pouvant plus occuper tout le volume qui lui est offert, il y a alors apparition de bulles d'air dans la phase liquide. L'eau progressivement mise en extension se vaporise, conduisant à l'apparition d'un réseau poreux et donc à des tensions capillaires. Plus la vaporisation progresse et plus l'humidité relative interne diminue. Il y a alors autodessiccation.

Les tensions qui existent dans la phase liquide capillaire doivent être équilibrées mécaniquement par une contraction de la matrice minérale. Ceci se traduit à l'échelle de l'éprouvette par un raccourcissement qui constitue le retrait endogène ou d'autodessiccation.

Le béton est toujours en contact avec le milieu extérieur. On peut considérer qu'il est isolé à partir d'une distance de quelques centimètres de la surface.

L'importance de l'autodessiccation, exprimée en terme d'abaissement de l'humidité interne, dépend beaucoup du rapport eau/ciment (E/C). Elle reste faible pour des E/C supérieurs à 0,35 environ (correspondant à la teneur en eau en dessous de laquelle toute l'eau de capillarité est consommée par l'hydratation). En dessous de cette valeur, l'humidité interne diminue jusqu'à une valeur limite de 75% en humidité relative en dessous de laquelle l'hydratation du ciment est bloquée).

Copeland [8] et Bragg [8] et Wittman ont enregistré l'humidité relative dans une enceinte fermée contenant une éprouvette de pâte de ciment durcissante. La figure 1 nous donne l'évolution de l'humidité relative d'équilibre d'une éprouvette protégée pour différents rapports E/C.

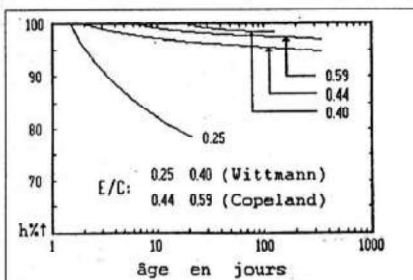


Figure 1 : Mise en évidence de l'effet d'autodesiccation.

L'hydratation des grains de ciment est très faible, voire s'arrête, dès que l'humidité relative interne, qui baisse avec l'autodesiccation, devient inférieure à une certaine valeur limite de 75% [16].

L'autodesiccation conduit à la disparition d'une partie de phase liquide, ce qui signifie, que l'on aura, par exemple, une faible quantité d'eau congelable, une meilleure résistance aux cycles gel - dégel ce qui est favorable à la durabilité.

3.3 Phénomène hydrique

Lors du séchage du béton, le départ d'eau dans la matrice de ciment provoque un retrait appelé retrait de dessiccation dû à un déséquilibre hydrique entre le béton et l'air ambiant. Ce retrait est la réponse mécanique du matériau soumis au séchage.

Les gradients d'humidité dans le matériau génèrent des gradients de déformations qui le soumettent à des autocontraintes de traction induisant une fissuration superficielle.

A l'échelle mésoscopique, dans le béton, les variations dimensionnelles liées à la modification des caractéristiques physiques locales (teneur en eau) de la pâte de ciment durcie sont gênées par la présence des granulats. Elles provoquent donc un champ de contraintes à l'échelle des inclusions. On observe ainsi une déformation apparente de la structure en béton, inférieure à la même structure en pâte de ciment durcie ; elle n'est donc pas une caractéristique intrinsèque du matériau.

A l'échelle macroscopique, il se produit une superposition des champs de contraintes locaux avec un champ de contrainte macroscopique. Les gradients de teneur en eau (très forts au voisinage des surfaces d'échange avec le milieu ambiant) créent des retraits différentiels dans la structure et donc des gradients de contraintes "effet de structure".

Le retrait dû au séchage étant lié au départ d'eau par évaporation, il est intéressant de tenter d'expliquer les différences de retrait entre la surface et le cœur du béton. C'est pourquoi, [15] ont mesuré la quantité d'eau globale restante dans les échantillons suivant leurs dimensions

ainsi que la répartition de cette eau en fonction de la distance à la face soumise à l'évaporation. Ils arrivent aux conclusions suivantes :

Dans une pièce en béton et après une observation de 700 jours, l'eau de gâchage ne s'évapore que sur l'épaisseur limitée à quelques centimètres au delà du parement (3 à 5cm). Il s'ensuit deux conséquences fondamentales :

- le retrait est très différent entre le parement et le cœur du béton ; il est 2 à 3 fois supérieur en surface ;
- le béton mieux hydraté a une qualité supérieure, il est donc plus compact et moins poreux au delà de l'épaisseur affectée par les départs d'eau.

La zone située en bordure des surfaces d'échange (appelée «peau du béton») est donc soumise à des contraintes de traction très importantes (retrait gêné), alors que le cœur de la structure est en compression. Ces tractions sont bien supérieures à la résistance en traction du béton. Il va en résulter une fissuration superficielle du béton.

3.4 Comparaison entre la dessiccation et l'autodesiccation

Le retrait d'autodesiccation serait d'origine analogue à celle du retrait de dessiccation car ces deux retraits concernent le même phénomène : la croissance des volumes gazeux dans les systèmes concernés [10]. Pour le retrait d'autodesiccation, cette croissance des volumes gazeux est due à la contraction [11], tandis que pour le retrait de dessiccation elle est due au départ d'eau vers l'extérieur.

En effet, l'autodesiccation peut être appelée aussi dessiccation provoquée par l'hydratation du ciment se traduisant par la contraction. [11], [6], toutefois, il faut toujours tenir compte des particularités du retrait d'autodesiccation :

L'autodesiccation n'existe qu'au cours de l'hydratation, donc pour étudier le retrait d'autodesiccation, il faut tenir compte à la fois de la variation des volumes gazeux et de la variation de la microstructure. Ce double effet de l'autodesiccation est schématisé par la figure 2.

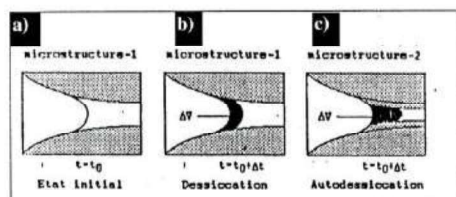


Figure 2 : Comparaison entre la dessiccation et l'autodesiccation [10].

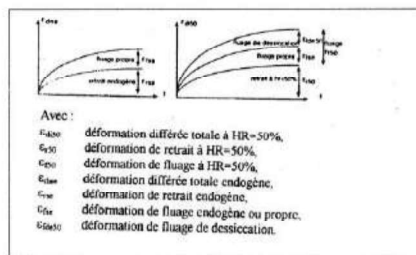


Figure 3 : Définition des fluages.

Pour une même variation de volume gazeux ΔV , l'autodesiccation a un double effet (Figure 2c) et la dessiccation a un simple effet (Figure 2b). Ce double effet dû à l'autodesiccation ΔV engendrera une variation de contrainte plus forte que celle provoquée par la dessiccation ΔV si nous partons de la même microstructure 1 (Figure 2a).

L'autodesiccation ne se manifeste qu'à humidité relative très élevée, car l'hydratation exige l'existence de l'eau libre. Autrement dit au-dessous d'une humidité relative critique (75%), l'hydratation ne peut plus continuer, par conséquent l'autodesiccation s'arrête.

4. Les déformations différées sous chargement stationnaire

Si l'on applique une charge constante de compression à une éprouvette de béton, on constate que si l'on maintient cette charge, la déformation du matériau évolue en fonction du temps. Conventionnellement, la déformation totale d'une éprouvette chargée est prise égale à la somme du retrait depuis l'état zéro des mesures, de la déformation instantanée au moment de l'application de la charge et de la déformation de fluage.

4.1 Les différentes déformations de fluage

On distingue deux sortes de fluage : le fluage propre ou endogène observé en l'absence de tout échange hydrique avec le milieu ambiant et le fluage de dessiccation : part de déformation différée qui s'y ajoute en cas d'échange. En supposant arbitrairement l'indépendance des phénomènes, la déformation totale différée d'un béton chargé et soumis à la dessiccation à un degré d'hygrométrie de 50% serait la somme de trois déformations élémentaires : la déformation de retrait en dessiccation $\epsilon_{r,50}$, la part de fluage propre $\epsilon_{f,50}$ et la part de dessiccation $\epsilon_{fde,50}$ (Figure 3).

«La linéarité de la déformation de fluage» en fonction de la contrainte appliquée est constatée expérimentalement lorsque le chargement de fluage est modéré. Pour un taux de charge permanente supérieur au seuil fixé par le règlement

(40% de la contrainte de rupture BPEL, 1991), elle n'est plus fonction linéaire de la contrainte.

4.2 Fluage propre

Le fluage propre ($\epsilon_{f,50}$) désigne la différence entre la déformation de l'éprouvette chargée en équilibre hygrométrique et celle de l'éprouvette similaire, mais non chargée.

L'hydratation du ciment est une réaction chimique thermo-activée (les vitesses de dégagement de chaleur sont accélérées aux points les plus chauds, ralenties aux points les plus froids). Ainsi, au jeune âge, une température élevée provoque deux effets contraires au niveau du fluage propre du béton, soit :

- augmentation du fluage due à l'élévation de température,
- diminution du fluage due à l'augmentation du degré d'hydratation.

L'importance relative à chacun de ces effets ne semblent pas bien connue à ce jour.

4.3 Fluage de dessiccation

La déformation de fluage de dessiccation ($\epsilon_{fde,50}$) est obtenue, à partir de la déformation différée totale, en appliquant le principe de la superposition entre le retrait et le fluage (cf. figure 3). En comparant la déformation différée à $hr = 50\%$ à la somme des déformations de retrait à $hr = 50\%$ et du fluage propre, la première est supérieure à la seconde : la différence est le fluage de dessiccation.

Lorsqu'on effectue un essai de fluage, on applique un champ de contrainte de compression uniforme sur l'éprouvette. Si elle est en cours de dessiccation, ce champ se superpose au champ induit par le retrait de dessiccation qui vient s'opposer aux contraintes de traction qui règnent en peau et réduisent l'effet de la fissuration et donc augmenter la déformation due au retrait.

Le fluage de dessiccation est dû en partie à une accélération des mouvements d'eau sous la combinaison de l'évaporation et de la compression.

La déformation de fluage de dessiccation trouve ses origines dans un certain nombre de phénomènes :

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. ACKER : «Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique», Rapport de recherche LPC n°152, 1988.
- [2] N. BELARIBI : «Analyse microstructurale du comportement différé des bétons : influence de la composition», Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 1997.
- [3] N. BELARIBI, G. PONS, B. PERRIN «Delayed behaviour of concrete : influence of additions and aggregate characteristics in relation with moisture variations», Cement and Concrete Research, Pennsylvania, Etat Unis, 1997.
- [4] L. CHEMLOUL, N. BELARIBI, B. PERRIN, G. PONS «La gammamétrie destinée à la mesure de l'humidité et de la densité des matériaux à base de liants hydrauliques», Revue Française de Génie Civil, (1997).
- [5] M. BUIL «Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante», Rapport de recherche LPC n°92, 1979.
- [6] M. BUIL : «Les retraits du béton», Journées de physiques des Arcs, Laboratoire des ponts et Chaussées 1987.
- [7] M. BUIL : «Comportement physico-chimique du système ciment - fumée de silice», Annales ITBTP, N°483, 1990.
- [8] L.E COPELAND, R.H BRAGG : «Self-desiccation in Portland cement pastes», Research and development laboratories of the P.C.A Research dept., bulletin n°52, Feb 1955.

→→→

[9] E. FREYSSINET : «Relation entre les déformations et la constitution des ciments et des matériaux de structure colloïdaux». Idées et voies nouvelles, Sciences et Industrie n°1, 1933.

[10] C. HUA : «Analyses et modélisations du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante». Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, 1995.

[11] H. LE CHATELIER : «Sur les changements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments». Bull. Société de l'encouragement pour l'industrie nationale, 5ème série, tome 5, 1900.

[12] Y. MALIER : «Action de la température sur les propriétés des bétons durcis». Le béton hydraulique presses ENPC, Paris, 1982.

[13] M. MAMILLAN : Evolution du fluage et des propriétés du béton». Annales de l'ITBTP, n°154, 1960.

[14] M. MAMILLAN, A. BOUINEAU : «Influence de la dimension des éprouvettes sur le retrait». Annales de l'ITBTP, n°270, 1970.

[15] M. MAMILLAN et R. L'HERMITE : «Répartition de la teneur en eau dans le béton durci». Annales ITBTP n°309-310, 1973.

[16] O. MEJLHEDE JENSEN : «Thermodynamic limitation of self-desiccation». Cement and Concrete Research, Vol. 25, n°1, 1995.



- Activation du processus d'hydratation par application de la contrainte de chargement ; par exemple, par une plus grande solubilité des composants du ciment pas encore hydratés,
- Augmentation de l'évaporation de l'eau des pores sous chargements par une élévation de la température qui rend la diffusion plus aisée et par une pression sur les parois des capillaires qui expulse ainsi l'eau emprisonnée. Les capillaires vides offrent de nouveaux espaces à la progression de l'hydratation entraînant une variation supplémentaire du volume,
- Réarrangement de la structure sous la contrainte appliquée, entraînant une plus grande compacité par rétrécissement des pores de la matrice.

En l'état actuel des connaissances, nous ne pouvons pas privilégier un phénomène par rapport à un autre, mais chacun de ces phénomènes explique une part du fluage de dessiccation.

Après avoir défini les différents retraits et fluages, nous décrivons dans les paragraphes suivants les facteurs qui entrent en jeu dans le comportement mécanique instantané et le comportement vis-à-vis du fluage et du retrait tels que les conditions hygrométriques et la nature des composants du béton.

5. Facteurs généraux influençant le comportement différé

Suite à un grand nombre de recherches, deux aspects majeurs du phénomène des déformations différées ont été mis en évidence : l'influence prépondérante de l'hygrométrie et un important effet d'échelle.

5.1 Hygrométrie

L'hygrométrie est vite apparue comme ayant une très forte influence sur les résultats des essais de fluage.

Lorsqu'il n'y a pas d'échange d'eau avec l'extérieur, le fluage appelé alors fluage propre, est à peu près proportionnel à la teneur en eau évaporable. Ainsi un béton préalablement séché à 105°C ne flue pratiquement pas. Le fluage du béton en échange hydrique avec le climat ambiant est important, deux à trois fois supérieur au fluage propre [1] (Figure 4).

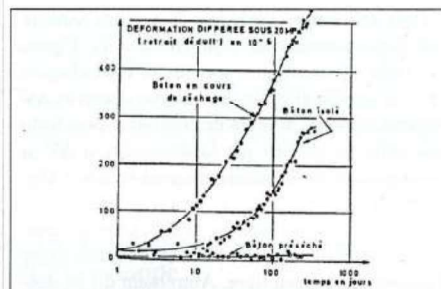


Figure 4 : Déformations différées de trois éprouvettes de béton*[1]

* Ils sont de même fabrication chargées à 42 jours sous 20 MPa, qui sont respectivement :

- non traitée (séchage naturel à 20°C et 50% HR)
- rendue étanche dès le démoulage par enduction de résine
- séchée pendant 35 jours à 40°C et rendue étanche avant essai.

5.2 Effet d'échelle

La comparaison des résultats obtenus dans les différents laboratoires ont montré que les différentes caractéristiques physiques et mécaniques mesurées sont plus ou moins dépendantes de la taille des éprouvettes [1]. Les explications ne manquaient pas (effets de bord, frottement des faces d'appui, hétérogénéité, rôle des défauts...). Alors que cette dépendance est modérée pour la plupart des caractéristiques mécaniques du matériau (10 à 30% pour les résistances), celle-ci est considérable dans le cas du fluage et du retrait.

Dans le cas du retrait, l'effet d'échelle indique la présence d'un gradient d'humidité induisant des autocontraintes. L'effort de traction interne développé en périphérie est équilibré par la compression du reste de la section. Si la section des éléments en béton augmente, l'intensité de l'autocontrainte de compression diminue en même temps que la déformation de la partie centrale de l'élément, dont l'intensité se rapproche de celle du retrait endogène.

En débutant dès que possible les mesures de retrait du béton durci, nous constatons que la déformation en surface se stabilise rapidement

vers une valeur constante quelle que soit la taille des éprouvettes [14]. Par contre comme le montre la figure 5, celle que l'on mesure au centre décroît linéairement avec le logarithme de la dimension du côté. La stabilisation de l'hygrométrie interne est de plus très lente : sur le béton considéré, elle fut acquise après 1500 jours sur les prismes de 5cm de côté, âge auquel la déformation de retrait paraît homogène dans la section de l'élément.

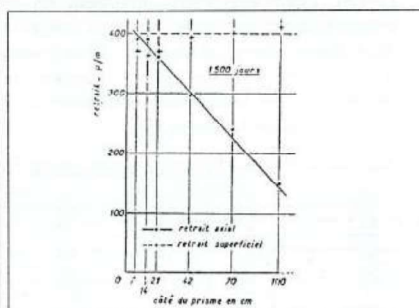


Figure 5 : Retrait à 1500 jours suivant la dimension des éprouvettes [Mamillan et al., 1970]

Thiel [18] en 1960, a montré suite à son étude sur l'influence de la dimension de l'éprouvette sur les déformations de fluage, que celle-ci diminuait avec l'accroissement de la dimension de l'éprouvette. En effet, les fluages des éprouvettes de 20x20x60cm et de 10x10x60cm soumises à une contrainte de 100 kg/cm² ont été comparés avec le fluage d'une éprouvette de 7x7x28cm confectionnée et conservée dans les mêmes conditions, et chargée à la même contrainte. Les résultats trouvés et présentés par la figure 6, montrent nettement pendant une durée de 230 jours la diminution du fluage avec l'augmentation de la dimension de l'éprouvette.

Il faut préciser qu'il ne s'agit là que d'un problème de cinétique lié à la faible durée d'expérimentation. En pratique, pour un temps infini, les déformations de fluage devraient être identiques.

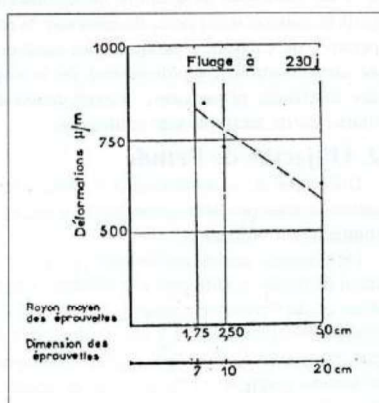


Figure 6 : Fluage en fonction de la dimension de l'éprouvette [Thiel, 1960]

6. Conclusion

Durant cette étude nous avons rassemblé quelques connaissances sur le comportement du béton vis-à-vis du fluage et du retrait et sur les facteurs hygrométrie et effet d'échelle influant sur ce comportement. Le domaine des études sur les déformations différées s'est beaucoup élargi. A présent les regards se sont orientés vers l'étude de l'effet de la composition de la matrice du béton sur le fluage et le retrait [2], [3]. Aussi d'autres techniques de mesures de retrait se sont développées telle que la gammaden-simétrie [4] ■

[17] T.C. POWERS : «Some observations on the interpretation of a creep data», Matériaux de construction, Bull. Rilem n°33, 1966.

[18] M.K. THIEL : «Influence de la dimension de l'éprouvette sur le retrait, le fluage et le module d'élasticité du béton», Annales de L'ITBTP, n°154, 1960.