

Chapitre II

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU FLUAGE DU BETON

II.1. INTRODUCTION

Le béton subit dès son jeune âge des mécanismes physiques et chimiques complexes qui jouent un rôle déterminant dans son comportement à court et à long terme. Le processus d'hydratation du béton, sa microstructure, et les conditions thermo hydromécaniques auxquelles il est soumis constituent les principaux ingrédients de ses phénomènes de vieillissement, de fluage, et de retrait. L'eau dans le béton et les échanges hydriques avec le milieu ambiant pilotent en grande partie ces phénomènes. Les fissurations excessives et les fissurations constatées sur un certain nombre d'ouvrages sont souvent liées à la sous-estimation des effets différés couplés.

L'objectif de ce chapitre est de décrire le phénomène du fluage du béton, il comporte une description de la structure morphologique du béton, des états de l'eau et de ses localisations, afin de mieux comprendre les phénomènes physico-chimiques agissant à l'échelle de la microstructure. Ensuite, une brève étude de fluage a permis de comparer plusieurs approches qualitatives proposées dans la littérature.

II.2. STRUCTURE ET MORPHOLOGIE DU BETON

La microstructure et la morphologie poreuse du béton sont reliées à la quantité d'eau qui l'imprègne. L'eau réagit avec le ciment pour former principalement le gel C-S-H (Silicate de calcium hydrate) qui est à l'origine du durcissement et du pouvoir adhérent avec les autres composants du béton. Le gel C-S-H a une structure en feuillet formée de petits cristaux mal cristallisés, avec une surface spécifique très élevée. La cohésion des C-S-H est due en partie aux forces de VanderWalls entre ces particules colloïdales. Selon Clark et al. (1999), le processus chimique d'hydratation est divisé en cinq étapes (Figure II-1).

La structure finale de la pâte de ciment contient des grains de ciment partiellement hydratés, des espaces capillaires remplis partiellement ou complètement d'eau, et des hydrates (principalement des C-S-H et de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ces derniers remplissent graduellement les espaces entre les grains de ciment.

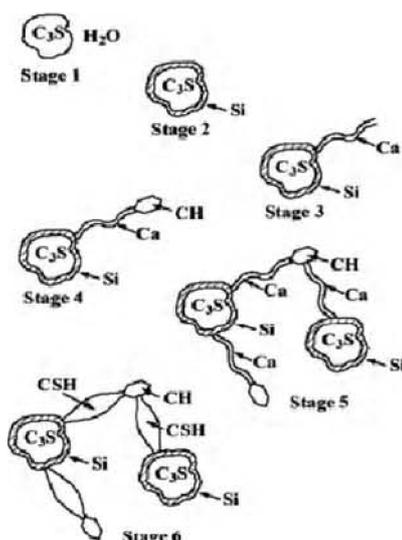


Figure II-1 Processus d'hydratation. D'après Clark et *at.* (1999).

La porosité de la pâte est classée suivant deux catégories :

- la porosité capillaire, vestige de la porosité initiale du clinker, avec une dimension caractéristique située dans la plage 0,01 -50 µm.
- la porosité du gel C-S-H avec une dimension caractéristique de l'ordre du nanomètre. Ces pores présentent 28% du volume total des hydrates.

Cette structure de base est en grande partie responsable des propriétés physico-chimiques du béton.

II.2.1. L'eau dans la pâte de ciment

L'eau agit différemment dans les phénomènes différenciés du béton suivant sa localisation et son état (figure II-2). Cette eau est généralement classée suivant la nature de sa liaison avec la pâte de ciment. Ainsi on distingue :

- L'eau combinée chimiquement : cette eau est une partie intégrante des feuillets C-S-H. Son départ n'est possible qu'à très haute température par décomposition des particules de gel C-S-H.
- L'eau zéolitique (interfeuille) : cette eau est retenue entre les feuillets de C-S-H par des liens hydrogènes sans qu'elle soit combinée chimiquement. Son évaporation commence à des taux d'humidité inférieurs à 30%.
- L'eau adsorbée : cette eau forme des couches d'une à six molécules liées physiquement par des ponts hydrogènes. Les forces d'attraction assurant la liaison sont de faible intensité. Ainsi une grande partie de cette eau peut être libérée si le taux d'humidité est inférieur à 50%.
- L'eau capillaire : il s'agit du surplus d'eau qui n'a pas participé à la réaction d'hydratation. Cette eau est classée en eau libre ou non libre en fonction de l'importance des forces de surface. L'eau libre est contenue principalement dans les pores capillaires de dimension

supérieure à 10 pm. Son départ n'induit pas un retrait important dans la pâte de ciment. L'eau non libre est retenue par des tensions capillaires dans les pores de dimension inférieure à 0,05 pm. Son départ, active pour des taux d'humidité inférieurs à 90%, influence d'une manière importante le retrait de la pâte de ciment.

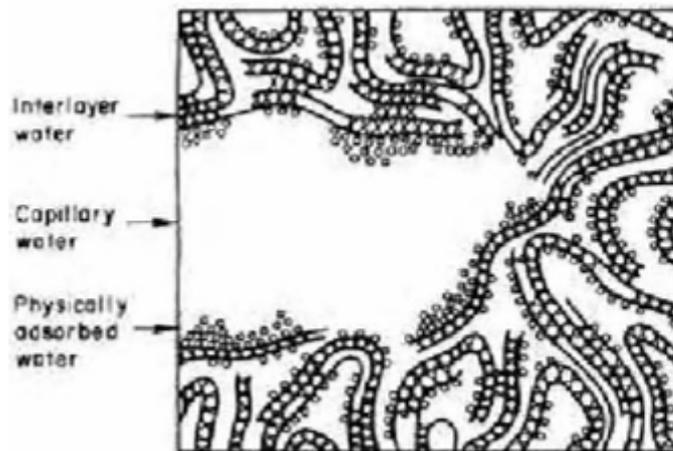


Figure II-2 Représentation schématique des C-S-H et de l'état de l'eau qui y est associé, d'après Feldman et Sereda (1970).

II.3. FLUAGE DU BETON

Depuis les premiers travaux sur le béton précontraint avec Freyssinet en 1908, les ingénieurs ont pu constater l'importance de l'effet du fluage sur le comportement des structures. En effet, la durabilité et l'état de service des ouvrages en béton dépendent en grande partie de la prise en compte de ce phénomène.

Malgré les nombreuses études réalisées sur ce sujet, les modèles de Fluage utilisés dans le dimensionnement sont basés sur l'extrapolation des résultats obtenus à partir d'essais à court et à moyen terme. Ces essais effectués en laboratoire restent limités au niveau des conditions d'expérimentation, de la durée d'essai, et de la taille des éprouvettes examinées.

Ces facteurs génèrent bien plus que des effets secondaires puisqu'ils agissent directement sur l'amplitude et la cinétique du fluage, et sur son interaction avec d'autres effets différés. Les fonctions réglementaires utilisées pour prendre en compte le fluage dans le dimensionnement des structures fournissent différentes estimations globales selon les paramètres considérés par chaque fonction (caractéristique mécanique du béton, humidité ambiante moyenne, rayon moyen de la section, temps de chargement ...). En général, plus le nombre de paramètres est important, plus les résultats sont précis. Néanmoins, les fonctions utilisées considèrent une déformation de fluage uniforme dans la section, ce qui ne traduit pas la réalité de ce phénomène. En effet, le fluage est fortement dépendant de l'état hydrique du béton qui est loin d'être uniforme, surtout dans le cas des grandes sections où le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre hydrique est du même ordre de grandeur que la durée de

service de la structure. Cet état hydrique variable constitue le moteur de plusieurs phénomènes physico-chimiques ainsi que d'autres effets de structure.

Pour les grands ouvrages dont la durabilité et l'état de service constituent un enjeu important au niveau de la sécurité publique et au niveau économique, il est nécessaire de se baser sur des approches physiques solides pour déduire des lois de comportement pertinentes qui prennent en compte la spécificité de ces structures. Ainsi, il serait possible de donner une estimation locale et globale des effets différés dans le temps.

La communauté scientifique reconnaît qu'il existe deux phénomènes physico-chimiques distincts l'origine du fluage du béton : le fluage propre, et le fluage de dessiccation.

II.3.1. Le fluage propre

La déformation du fluage propre est définie comme étant la déformation mesurée dans le temps d'une éprouvette chargée à l'instant t_0 en partant d'un état hydrique et thermique uniforme garde constant tout au long de l'essai. Cette déformation est proportionnelle à la contrainte appliquée pour des niveaux de chargement inférieurs à 50% de la charge ultime.

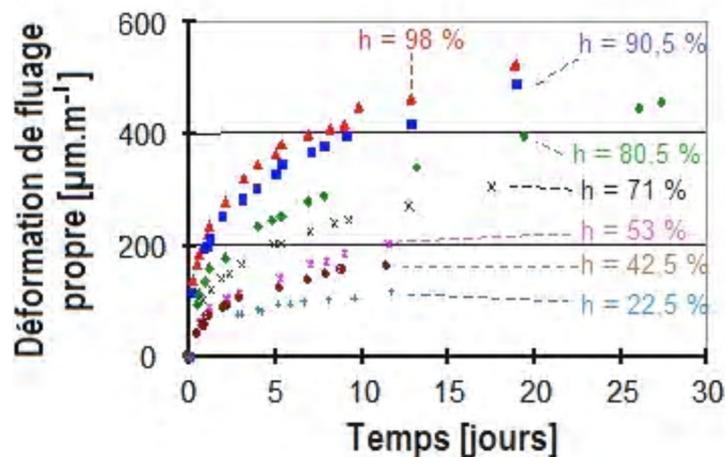


Figure II-3 Effet de l'état hydrique interne sur l'évolution du fluage propre [Wit 70].

L'eau joue un rôle essentiel dans le mécanisme de fluage propre comme on peut le voir sur la figure ci-dessus. Les différents essais de fluage propre montrent une réponse quasi proportionnelle à l'état hydrique uniforme de l'éprouvette (Figure II-3). Plus l'humidité relative uniforme d'un béton préalablement sèche est basse, plus sa déformation de fluage propre est faible. Acker (1988) montre que pour une éprouvette séchée à 105°C le fluage est quasi nul.

II.3.1.1. Origine physico-chimique du fluage propre

L'analyse du phénomène de fluage propre sur des pâtes de ciment et de béton met en évidence deux régimes cinétiques distincts, ce qui appuie l'hypothèse qu'ils sont issus de deux mécanismes physiques différents.

- **Un mécanisme a court terme**

On trouve dans la littérature plusieurs descriptions de mécanismes supposés à l'origine du fluage propre à court terme. Nous présentons ici le mécanisme qui semble le plus probable et qui a été proposé par Ruetz (1966) et repris ensuite par Wittmann (1982) et Ulm et al. (1999). Ces auteurs attribuent ce mécanisme à la diffusion de l'eau adsorbée dans la porosité capillaire. Cette diffusion est induite par les efforts extérieurs transmis à l'échelle microscopique à travers l'interface des hydrates entourant les pores capillaires (Figure II-4a).

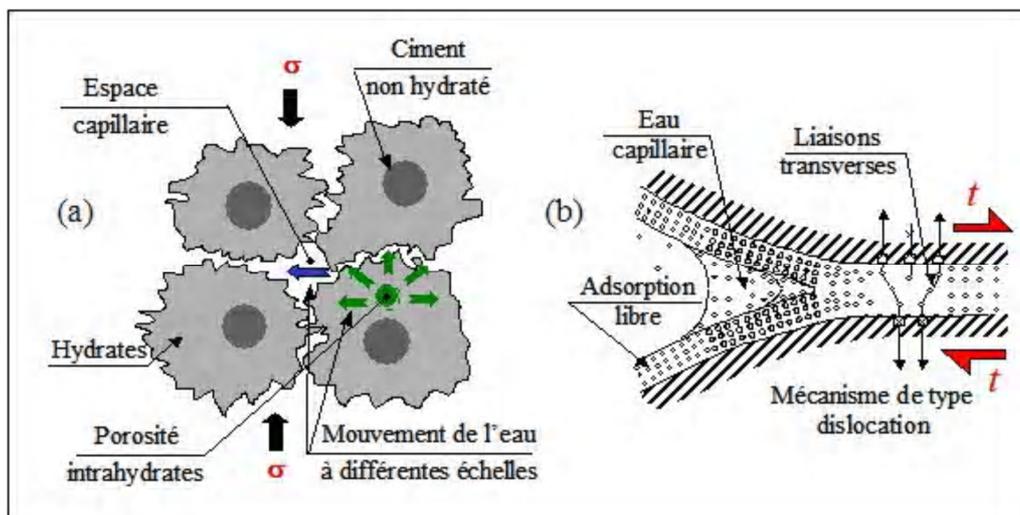


Figure II-4 Mécanismes physiques à l'origine du fluage propre à court terme (a) et à long terme (b),

D'après Ulm et al. (1999). [Figure tirée de Benboudjema 2002]

- **Un mécanisme a long terme**

Bazant et al. (1997) ont proposé une explication de l'origine de ce phénomène basée sur un mécanisme de glissement des feuillets C-S-H (Figure II-4b). Ce processus mécanique de « quasi-dislocation » résulte de la relaxation des micro-précontraintes à l'échelle des nanopores. Ces micro-précontraintes sont générées par la pression de disjonction dans les zones d'adsorption empêchée. Plusieurs observations expérimentales sont compatibles avec cette approche. En effet, Ulm et al. (1999) notent que la cinétique du fluage à long terme semble indépendante du rapport E/C. Cela appuie l'hypothèse que ce mécanisme se produit à l'échelle des nanopores de la pâte de ciment dont la structure est indépendante de la formulation du béton.

II.3.1.2. Facteurs susceptibles d'influencer le fluage propre

Le fluage propre est très vieillissant. Il dépend fortement de l'âge du béton lors du chargement (Figure II-5). Cette dépendance reste assez importante même au-delà d'un an, ce qui signifie que cet effet à long terme est indépendant de l'avancement de la réaction d'hydratation qui tend à se stabiliser après 90 jours.

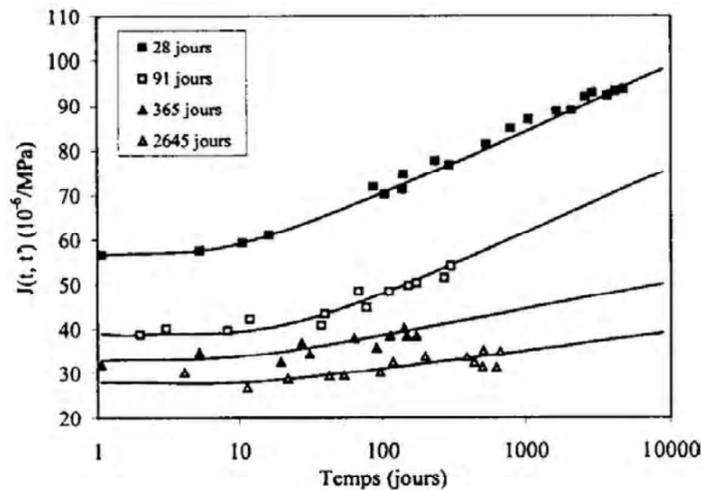


Figure II-5 Fonctions de fluage pour différents instants de chargement, d'après Bazant.

En outre, la composition du béton influence significativement la déformation de fluage. A part l'influence de la quantité d'eau utilisée dont on a soulignée précédemment, on note l'effet du pourcentage des granulats qui s'opposent à la déformation de fluage de la pâte de ciment constituant le siège des déformations différées. En plus, le type de ciment et les types de liant utilisés affectent la déformation de fluage. Mais vu leurs grandes variétés, il est difficile de trouver des explications à ces effets surtout qu'ils ne sont pas directement liés à la résistance ou à la finesse du liant utilisé.

II.3.2. Fluage de dessiccation

Ce phénomène traduit l'excès de fluage, constate lors du séchage d'une éprouvette chargée, par rapport à la somme des déformations d'une éprouvette protégée soumise au même chargement et des déformations de retrait de dessiccation d'une éprouvette non chargée subissant le séchage (Figure II-6). Cet excès de déformation a été évoqué en premier par Pickett, d'où le nom attribué à cet effet "Pickett effect".

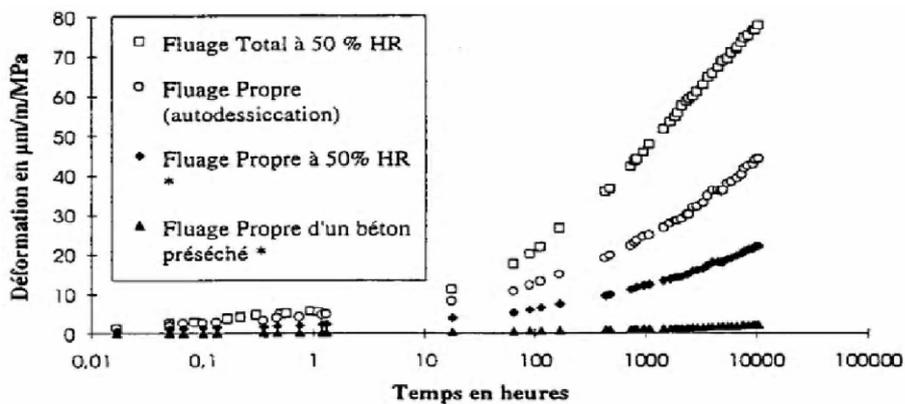


Figure II-6 Représentation du paradoxe de Pickett.

Avant de découvrir l'interaction entre le fluage et les variations hydriques, on aura pu s'attendre une atténuation du fluage suite au séchage, vu les précédentes constatations concernant la proportionnalité entre le fluage propre et l'humidité relative interne du béton. Or la déformation de fluage qui résulte des effets simultanés de chargement et de séchage peut atteindre 4 fois la déformation du fluage propre. Ce phénomène, appelé fluage de dessiccation, est similaire au phénomène mecanosorptif définissant l'effet hydromécanique couplé dans le bois. Bažant a noté cette ressemblance en soulignant deux principales caractéristiques communes aux deux matériaux comme la structure poreuse et le caractère hydrophile.

II.3.2.1. L'origine du fluage de dessiccation

Les causes supposées à l'origine du fluage de dessiccation semblent être diverses. Les différentes explications trouvées dans la littérature sont regroupées suivant deux aspects principaux qui sont le fluage de dessiccation relié à un effet de structure et le fluage de dessiccation intrinsèque.

II.3.2.2. Approches explicatives proposées dans la littérature

- **Le fluage de dessiccation relié à un effet de structure**

Le phénomène de séchage décrit précédemment génère des déformations empêchées et peut induire des fissurations suivant l'échelle de la structure. Par ailleurs, le retrait mesuré sur des grandes éprouvettes de béton non comprimées est inférieur au retrait potentiel du matériau (Concreep 1986, Acker 1988). L'application d'une charge de compression peut induire une fermeture totale ou partielle des fissures et augmenter ainsi la déformation totale. Bažant et Wu (1974) estiment que cet excès de déformation provient du comportement non linéaire des zones susceptibles d'être fissurées. Wittmann et Roelfstra montrent par un calcul éléments finis que la contribution des fissurations induites par le séchage est la cause principale du fluage de dessiccation. Ces hypothèses supposent que la modélisation de ce fluage ne nécessite pas le développement d'une loi de comportement et que ce n'est autre qu'une conséquence des conditions aux limites et des effets de structure. Cet effet de structure est décrit à l'échelle de l'éprouvette. D'autres explications présentent l'effet structural à l'échelle du granulats. Dans ces cas, le béton est considéré comme un matériau hétérogène où les granulats, beaucoup moins sensibles aux effets différés, viennent s'opposer aux déformations hydroviscoélastiques de la pâte de ciment, ce qui génère des contraintes internes et des microfissurations. On retrouve ainsi, comme à l'échelle de l'éprouvette, l'effet des contraintes externes de compression qui permettent de mobiliser une plus forte portion du retrait de dessiccation de la pâte.

- **Fluage de dessiccation intrinsèque**

L'explication du fluage de dessiccation par les effets de structure n'est pas suffisante pour couvrir l'amplitude de l'excès de déformation constatée expérimentalement (Bažant et al.). Cela est mis en évidence par des essais menés sur des petites éprouvettes en pâte de ciment de faible

épaisseur (1,9 mm). Ces essais montrent une importante déformation de fluage de dessiccation, malgré que l'effet de structure soit très réduit.

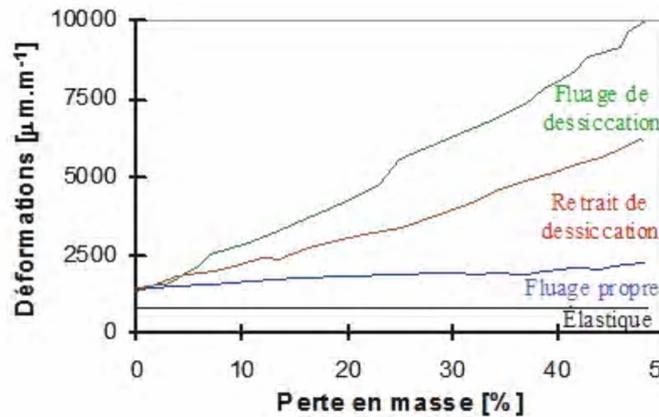


Figure II-7 Déformation différée mesurée sur des petites éprouvettes de 1,9 mm d'épaisseur, d'après Day et al (1984).

Cette constatation confirme la nécessité d'expliquer l'origine du fluage de dessiccation par un mécanisme physico-chimique intrinsèque au matériau béton. Plusieurs approches ont été proposées pour donner une réponse qualitative et quantitative à ce phénomène. Pickett suppose que l'excès de fluage est dû à une relation non linéaire entre le fluage et l'état de contrainte. Cependant cette supposition néglige d'autres mécanismes plus significatifs.

Ruetz propose un phénomène de consolidation en supposant que la charge de compression accentue le départ de l'eau, induisant ainsi une contraction de la pâte. Cette théorie a été ensuite abandonnée puisque, d'une part les résultats expérimentaux ne montrent pas un effet de chargement sur la perte d'eau, et d'autre part il est difficile d'expliquer comment une bonne partie des efforts appliqués sont transmis à l'eau sachant que sa compressibilité est 20 fois supérieure à celle du béton.

Wittmann suppose que les tensions surfaciques générées par le séchage au niveau des pores de la pâte de ciment augmentent la compression du squelette solide. Ceci produit une augmentation non linéaire du taux de fluage en fonction de la contrainte. Mais cette hypothèse n'est pas adaptée dans le cas d'un chargement de traction ou de cisaillement.

L'analyse thermodynamique de Powers (1968) indique que les molécules d'eau dans les zones d'adsorption empêchées sont capables de transmettre d'importantes pressions à l'état d'équilibre. Ainsi, la diffusion de ces molécules lors du séchage est responsable de ce fluage de dessiccation. Cependant, Bažant (1975) note que cette supposition n'est pas compatible avec plusieurs caractéristiques du phénomène de fluage. En 1985, il reprend cette hypothèse en différenciant entre la macrodiffusion au niveau des macropores et la microdiffusion au niveau des micropores. Il

considère que seule la microdiffusion est responsable de l'excès de fluage et modélise ce phénomène par du retrait induits par des contraintes internes "stress-induced shrinkage".

Brooks (2001) présente une explication proche de la théorie de consolidation de Ruetz. Il suppose que les contraintes macroscopiques, réparties entre le squelette solide et l'eau présente dans les pores de gel, sont reprises par le squelette solide après le départ de l'eau, ce qui fait augmenter le fluage.

II.3.2.3. Conclusion

Les diverses approches présentées ci-dessus n'identifient pas un mécanisme physico-chimique commun capable de décrire qualitativement le phénomène de fluage de dessiccation intrinsèque. En plus, il paraît très compliqué de traduire ces approches à l'échelle microscopique par une modélisation quantitative afin de vérifier leur pertinence. La validation expérimentale des mécanismes de fluage intrinsèque du béton reste aussi une opération délicate. Cela est principalement dû à la difficulté de réaliser des essais sur des éprouvettes ayant un volume représentatif du matériau sans se confronter aux effets d'échelles.

La lenteur du séchage ne permet pas d'étendre facilement l'analyse expérimentale en effectuant plusieurs configurations hydromécaniques (différents types et niveaux de chargement, différentes vitesses de séchage, chargement cyclique, variation hydrique cyclique, ...). Ces types de sollicitations peuvent activer de nouveaux mécanismes non identifiés à ce jour.

Tous ces aspects expliquent le manque de consensus sur l'origine du fluage de dessiccation intrinsèque.

II.3.3. Le vieillissement

Plus le béton est chargé jeune plus sa déformation différée est grande. Ce phénomène trouve son origine, en partie, dans l'évolution des caractéristiques physico-chimiques du béton au cours de la réaction d'hydratation. La déposition du gel C-S-H au cours de la maturation du béton entraîne une amélioration de la rigidité et de la résistance du matériau. Cependant, le caractère vieillissant du fluage ne se résume pas à la réaction d'hydratation. En effet, les propriétés mécaniques et physiques du béton tendent à se stabiliser au bout de 90 jours, tandis que l'effet du vieillissement reste relativement significatif (Figure II-8). Bažant et al. attribuent cet effet à la relaxation des microprécontraintes dans les zones d'adsorption empêchée.

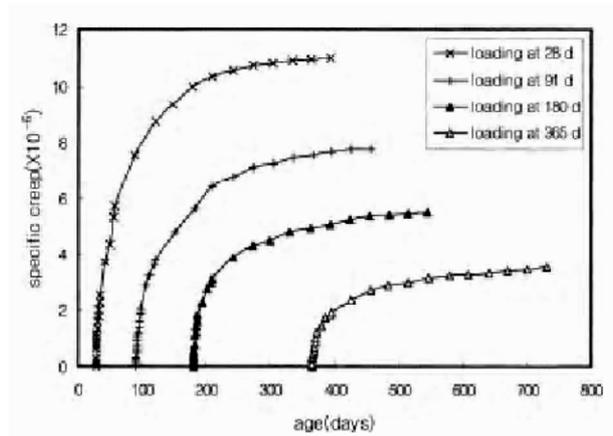


Figure II-8 Effet de l'âge du béton à l'instant du chargement sur le fluage, d'après Song et al. 2002.

Le vieillissement semble être une caractéristique unique du fluage propre. Cela est justifié par le fait que les paramètres gouvernant le transport d'eau et le retrait de dessiccation deviennent quasi indépendants de l'âge du béton après 90 jours de sa confection (Benboudjema 2002).

II.4. FLUAGE ET FISSURATION

Sous chargement constant, le phénomène de fluage peut évoluer suivant trois phases : primaire, secondaire et tertiaire (Figure II-9). Cette évolution est principalement fonction du niveau et de la durée de chargement. Dans la première phase, la vitesse de déformation décroît avec le temps, ainsi le fluage primaire tend à se stabiliser après une certaine durée de temps de chargement. Dans la deuxième phase, la vitesse de déformation reste constante, ce qui caractérise le fluage secondaire. Dans la phase de fluage tertiaire, la déformation évolue avec une vitesse croissante entraînant la rupture imminente de la structure chargée.

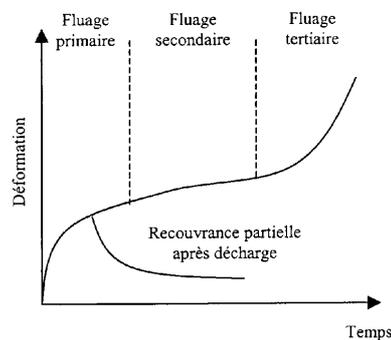


Figure II-9 Schéma des trois phases de fluage, d'après Witasse (2000).

II.4.1. Observations expérimentales

Les travaux expérimentaux de Rusch (1960) ont permis de définir, pour un béton chargé en compression, une limite de rupture par fluage en fonction du niveau de chargement. Ce phénomène de rupture est mis en évidence à partir de 80% de la limite de rupture comme indique la figure ci-dessous.

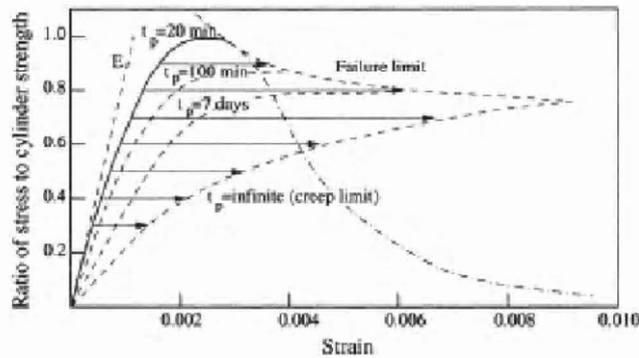


Figure II-10 Rupture par fluage pour des niveaux de contrainte élevés, d'après Rusch (1960).

Béres (1969) a souligné l'importance du phénomène d'altération de la macrostructure du béton soumis à des sollicitations de longue durée. En effectuant des séries d'essais à court et à long terme, il démontre que le processus de désagrégation peut être défini par deux valeurs de contraintes caractéristiques σ_{cr}^i et σ_{cr}^s . Ces valeurs correspondent respectivement au point d'inflexion constaté sur le diagramme contrainte-variation de volume, et à la valeur extrême définie au point d'intersection de la courbe et de l'axe de contrainte (Figure 11-13). Béres conclut que σ_{cr}^i coïncide avec la limite supérieure du fluage linéaire et que σ_{cr}^s coïncide avec la limite du fluage ou de résistance durable.

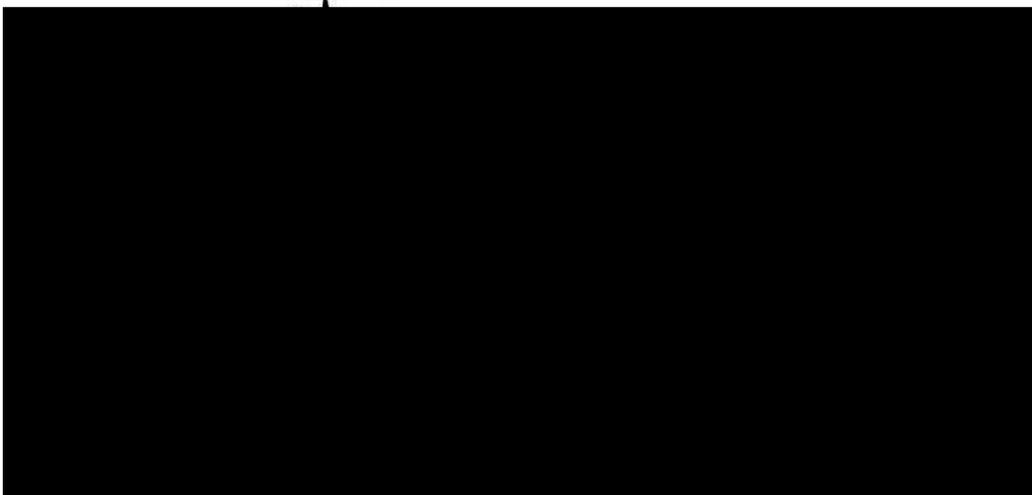


Figure II-11 Détermination des contraintes caractéristiques, d'après Béres (1969).

L'intérêt de cette approche repose sur la facilité d'identification des niveaux de contraintes caractéristiques à partir d'essais à court terme et de les considérer comme des caractéristiques intrinsèques du matériau.

Pour des sollicitations de traction, le phénomène de rupture par fluage est détecté sur des durées de chargement plus courtes qu'en cas de compression. Dans la figure ci-dessous, nous présentons les résultats d'essais réalisés par Al-Kubaisy et Young (1975) sur des éprouvettes cylindriques.

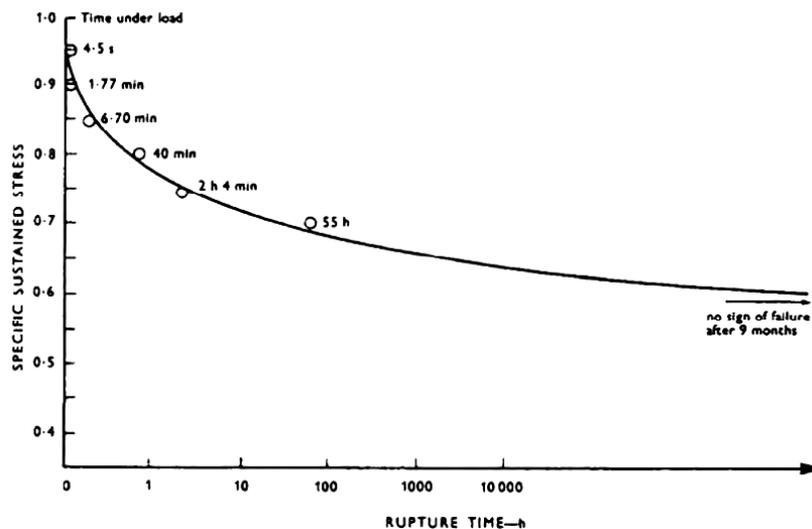


Figure II-12 L'influence du niveau de contrainte sur le temps de rupture, d'après AL-Kubaisy et Young (1975).

On remarque que pour un niveau de chargement supérieur à 70%, la rupture est inévitable. Cet aspect de rupture par fluage, présent aussi dans d'autres matériaux comme le bois, a des conséquences importantes sur le comportement différé du béton.

Les charges de service correspondent à un niveau de chargement inférieur à 50% de la charge ultime, ce qui est au-dessous de l'enveloppe de rupture constatée expérimentalement. Cependant, vu la faible résistance en traction du béton, des niveaux de contrainte relativement élevés sont facilement atteints. C'est le cas lors du séchage non uniforme du béton ou les faces exposées sont soumises à des contraintes de traction élevées. De même, à l'échelle de la structure, les conditions aux limites peuvent bloquer, dans certains cas, les déformations libres (expansion thermique, retrait, ...) générant ainsi des contraintes internes assez importantes. Cet aspect concerne principalement les structures mixtes (bois-béton, acier-béton, béton-béton...) ou le comportement différé des matériaux constitutifs génère des contraintes internes et des redistributions de contraintes qui peuvent induire des fissurations et des désordres structuraux dans le temps. Le fluage permet d'une part de relaxer une partie de ces efforts internes mais d'autre part il peut conduire à un phénomène de rupture différée.

II.5. PARAMETRES AFFECTANT LE FLUAGE

Le fluage du béton et la vitesse de son développement dans le temps sont influencés par plusieurs paramètres liés à la composition du béton, aux conditions ambiantes et aux conditions de chargement. Ces paramètres sont les suivants:

II.5. 1. Influence de la contrainte et de la résistance

Il y a une proportionnalité directe entre le fluage et la contrainte appliquée, il n'y a pas de limite inférieure à cette proportionnalité du fait que le béton subit un fluage sous de très faibles contraintes, alors que la limite supérieure de la proportionnalité est atteinte lorsque se développe une importante microfissuration.

Le fluage augmente avec la contrainte à une vitesse croissante. Le fluage augmente la déformation totale jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur limite qui correspond à la déformation ultime du béton considéré. La résistance du béton a une influence majeure sur le fluage.

II.5. 2. Influence des propriétés du ciment

Le type de ciment influence le fluage dans la mesure où il a un effet sur la résistance du béton au moment de l'application de la charge. La finesse du ciment affecte le développement de la résistance au jeune âge et influence même le fluage. Il est possible que la structure du ciment hydraté en présence de différents matériaux cimentaires puisse influencer le fluage; par exemple, l'utilisation de laitier de haut fourneau réduit le fluage propre mais, augmente le fluage de séchage car les différents matériaux cimentaires ont des vitesses d'hydratation différentes et par conséquent, de gain de résistance alors que le béton est sous charge.

Les essais réalisés par Buil, et Acker, donnent un exemple de l'influence de l'hydratation sur le fluage, ils ont trouvé que la fumée de silice n'a pas d'effet sur le fluage propre, mais réduit de façon significative le fluage de séchage. L'explication tient probablement au fait que les réactions d'hydratation de la fumée de silice réduisent la quantité d'eau disponible pour les mouvements d'eau hors du gel.

Dans un grand nombre d'études, les différences de fluage observées sont de même ordre de grandeur que la dispersion des résultats pour une seule série d'essais. Il n'est donc pas raisonnable de considérer ces différences comme significatives et elles ne peuvent pas être utilisées comme base d'estimation.

II.5. 3. Influence de l'humidité relative

L'humidité relative de l'air ambiant est l'un des paramètres externes qui a le plus d'influence sur le fluage. Le fluage pour un béton donné est d'autant plus important que l'humidité relative est basse. L'influence de l'humidité relative est beaucoup plus faible, voire nulle, dans le cas d'une

éprouvette ayant atteint l'équilibre hygrométrique avec le milieu ambiant avant l'application de la charge la (Figure II-13.) illustre le comportement d'éprouvettes mûries à une humidité relative de 100% puis chargées et exposées à différents taux d'humidité.

En conséquence, ce n'est pas tant l'humidité relative qui influence le fluage que le processus de séchage, c'est à dire l'élément qui provoque le fluage de séchage. Day et Illson ont également trouvé que de très petites éprouvettes de pâtes de ciment hydraté étaient sujettes au fluage de séchage et ont conclu que le fluage de séchage est une propriété intrinsèque de la pâte de ciment hydraté.

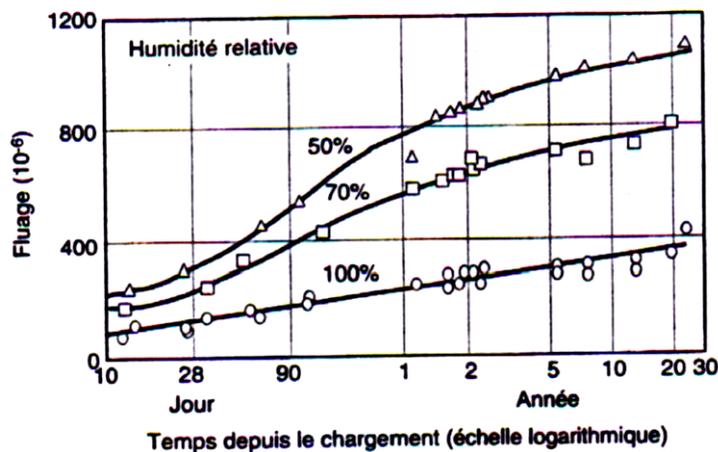


Figure II.13. Fluage de bétons mûris dans une chambre humide pendant 28 jours Puis chargés et conservés à différents degrés d'humidité relative

II.5. 4. Influence de la température

L'influence de la température sur le fluage présente un grand intérêt dans le cas de certains types de structures, tel que les ponts, les enceintes nucléaires, le taux de fluage augmente avec la température jusqu'à environ 70°C . On pense que ce comportement est dû à la désorption de l'eau à la surface du gel, de sorte que le gel devient lui même progressivement la seule phase ou une diffusion moléculaire et un écoulement visqueux se produisent, causant alors une diminution du taux de fluage.

Il est aussi possible qu'une partie de l'augmentation du fluage du béton chargé à haute température soit due à la plus faible résistance du béton à température élevée. La plupart des résultats d'essais sur le fluage ont été obtenus sous une contrainte maintenue constante, mais dans quelque cas, la charge réelle oscillait entre certaines limites.

Il semble que le chargement cyclique induit un taux de fluage plus élevé à court terme et conduit à des valeurs supérieures à long terme. La (Figure II-14.) illustre le cas où la charge

oscillait à l'intérieur d'un rapport contrainte / résistance compris entre 0.35 et 0.05, tandis que la charge statique avait un rapport contrainte/ résistance de 0.35.

Au plus tout ce qui précédé faisait référence à une compression uniaxial, mais le fluage se produit également dans d'autres cas de charge et les informations relatives au fluage dans ces autres conditions sont particulièrement utiles pour comprendre la nature du fluage mais malheureusement , les résultats expérimentaux sont peu nombreux et dans plusieurs cas, il n'est pas possible de faire d'évaluation quantitative ni de pouvoir résoudre certains problèmes de conception.

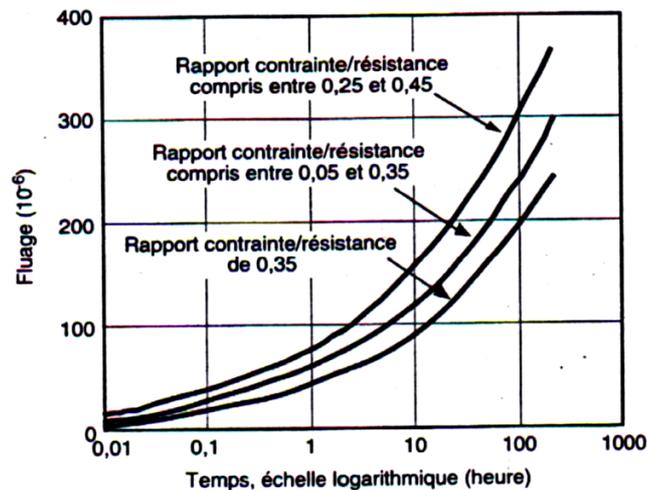


Figure II.14. Fluage sous chargement alterné et sous chargement constant

II.6. EFFET DU FLUAGE SUR LES STRUCTURES EN GENERAL

➤ Le fluage affecte principalement les flèches des éléments des structures libres de bouger alors qu'il affecte la distribution des contraintes dans celles où les mouvements sont empêchés. Ces effets sont considérables car l'augmentation de la déformation causée par le fluage, durant la première année de service, peut atteindre deux à trois fois celle causée par la déformation élastique. Le fluage n'affecte cependant pas la résistance du béton, à moins que la structure soit soumise à des contraintes soutenues très élevées, soit de l'ordre de 85 à 90% de la résistance ultime (Neville, 1996).

➤ Le fluage peut donc entraîner des déformations excessives dans les éléments structuraux (principalement les poutres) rendant ainsi l'utilisation des structures inconfortable pour les usagers. De plus, il peut amener d'autres problèmes d'utilisation, plus principalement dans les bâtiments multi-étagés et les ponts de longues portées.

➤ Toutefois, dans les structures statiquement indéterminées, le fluage est en mesure de soulager les contraintes internes induites par le retrait, les changements de température ou Les mouvements des supports. Dans toutes les structures, le fluage réduit les contraintes internes causées par le retrait non-uniforme, de sorte qu'il y a diminution de la fissuration.

➤ En béton précontraint, le fluage causera des pertes de précontrainte, phénomène qui n'est pas désiré.

➤ Plus particulièrement, le fluage aura comme effet de transférer graduellement la charge du béton vers l'armature dans les colonnes en Mon armé- Mors, une fois l'armature plastifiée, toute augmentation de charge sera prise par le béton, de sorte que la résistance complète de l'acier et du béton est développée avant la rupture- Néanmoins, dans le cas où les colonnes sont chargées excentriquement, il y aura une augmentation de la flèche, ce qui peut amener une instabilité, c'est-à-dire le flambement de la colonne .

➤ Le fluage peut sembler être nuisible mais, de façon générale, le fluage, contrairement au retrait, est bénéfique, surtout en ce qui a trait au soulagement des concentrations de contraintes. D'ailleurs, le fluage a contribué fortement au succès du béton comme matériau structural.

CONCLUSION

De façon générale, le fluage est défini comme étant une augmentation de la déformation dans le temps lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte soutenue. Son siège est la pâte de ciment hydraté et le fluage est lié au mouvement interne de l'eau adsorbée ou de l'eau intra-cristalline. Remplis et on peut spéculer que ce sont les vides dans le gel qui gouvernent à la fois la résistance et le fluage. Le vide peuvent donc être liés à la percolation interne de l'eau. Evidemment le volume des vides est fonction du rapport eau/ciment et influencé par le degré d'hydratation. Cependant, du fluage a été mesuré après plus de 30ans, en conséquence, il est probable que la partie lente et à long terme du fluage est due à d'autres causes que la percolation, mais que la présence d'eau évaporable demeure indispensable pour que la déformation puisse se développé , ceci supposerait un écoulement visqueux ou un glissement entre les particules du gel.

De tels mécanismes sont compatibles avec l'influence de la température sur le fluage et peuvent également expliquer le caractère largement irréversible du fluage à long terme. Alors que d'autre résultats expérimentaux sur le fluage en traction et en compression supposent que le comportement est mieux expliqué par une combinaison des théories de la percolation et du glissement visqueux.

Tout cela étant dit, on doit admettre que le mécanisme exact du fluage demeure mal connu. Il est donc fort difficile de raisonner à l'échelle de l'infiniment petit ou les transpositions de phénomènes et des lois habituelles deviennent hasardeuses.

Aucune vérification directe n'est possible si ce n'est par voie de conséquence . C'est pourquoi on a préféré s'en tenir au simple point de vue phénoménologique sans chercher à trop

approfondir le mécanisme intime au delà de ce que l'observation nous avait permis de constater et de mesurer.

Expliquer physiquement le phénomène du fluage dynamique serait certainement plus complexe que le fluage statique. Ceci nous a amené à utiliser le modèle rhéologique à nombre d'élément variable, proposé pour le fluage dynamique uniaxial et pour poutre en béton à l'étude du comportement rhéologique de béton précontraint soumis à l'action simultanée des charges statiques et dynamiques.