

Le bridage des éléments massifs en béton étudié dans le cas des bajoyers d'écluse

Ing. E. TALBOT
Dr Ir Ph. BOERAEVE
GRAMME – Liège

Le travail consiste en l'étude du bridage des bajoyers, les murs latéraux d'une écluse. Ces murs épais sont conçus en béton et subissent donc une série de retrait (hydraulique, chimique et thermique). Toutefois, étant donné que tout mouvement est empêché par un encastrement au niveau de la base, des contraintes apparaissent dans l'élément. Ces tensions engendrées par un retrait empêché sont la source de fissurations du mur. L'étude vise à minimiser le nombre de joints de dilatation, étant donné leur dégradation qui induit des coûts de remplacement importants.

Mots-clefs : béton armé, béton de masse bridé, retrait, effets thermiques, fissuration, joints, bajoyers, modélisation 2D.

This work deals with the phenomenon of cracking in mass concrete linked to sluices, i.e the lateral walls of a lock which can undergo restrained volumetric changes as a result of either drying, autogenous shrinkage or thermal effects. The target is thus to reduce as much as possible the amount of expansion joints given the important maintenance costs induced by damage.

Keywords : reinforced concrete, restrained mass concrete, shrinkage, thermal effects, cracking, expansion joints, sluices, 2D model.

1. Introduction

Une nouvelle écluse sera construite prochainement à Lanaye, à l'entrée du canal Juliana, dans le bassin de la Meuse. Elle permettra aux bateaux de surmonter une hauteur de chute de 13,7 mètres. La Région Wallonne a décidé de construire cet ouvrage dans le but de soulager le passage dense de bateaux transitant par Lanaye. Elle est essentielle pour le port de Liège qui se situe à la deuxième place dans le classement des ports intérieurs d'Europe les plus importants. C'est le bureau d'études Greisch qui a obtenu la mission d'études de cette écluse. Dans un premier temps, un avant-projet a été réalisé et la phase de projet est en cours. Si tout se déroule comme prévu, la quatrième écluse de Lanaye devrait être opérationnelle pour 2009.

La particularité de la construction réside dans sa massivité imposée par des efforts de sollicitation importants. C'est le cas des bajoyers, le nom donné aux murs latéraux de l'écluse. Ceux-ci sont particulièrement épais (environ 3 mètres) et ils appartiennent donc à la catégorie des bétons de masse¹. C'est pourquoi leur analyse est complexe à traiter vu la multitude de phénomènes s'y produisant et leur connaissance partielle.

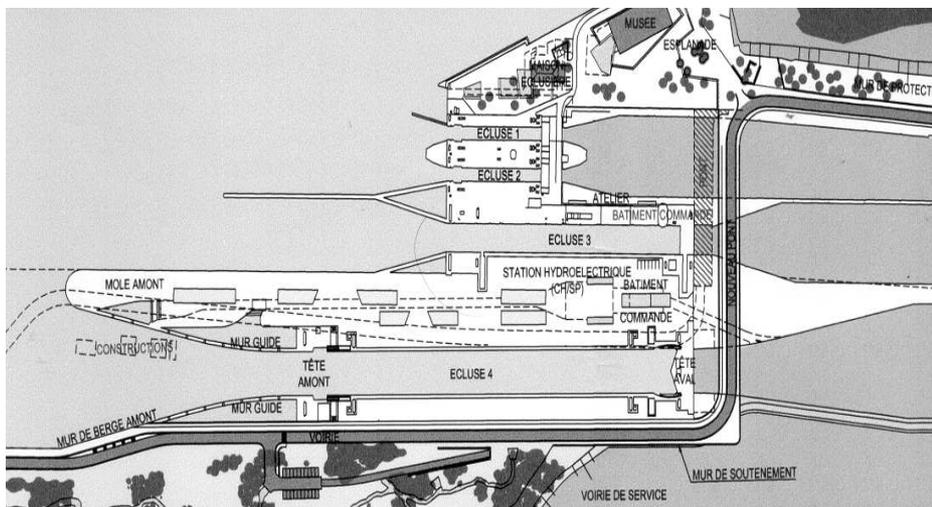


Figure 1 : Vue aérienne de la future écluse 4 de Lanaye (Source : bureau d'études Greisch)

¹ On parle de bétons de masse dès que l'épaisseur dépasse 80 cm.

2. But du travail

Etant coulés sur les bassins latéraux, les bajoyers ne peuvent ni se dilater, ni se rétracter. Cet empêchement de déformation est appelé bridage, il est la source de contraintes dans le béton et celui-ci risque de subir une fissuration de peau. Ainsi, en cas d'une variation de température, par exemple, des tensions sont générées si l'élément étudié est solidaire à un élément préexistant stable sur lequel il est coulé. Un exemple courant est celui d'un ouvrage coulé sur sa fondation. Mais c'est aussi le cas de levées successives pour la construction d'ouvrages élevés, tels des pylônes.

Afin d'éviter une ouverture de fissure excessive, tout ingénieur doit prévoir, dès la conception de l'ouvrage, des moyens de protection. La valeur limite stipulée par l'Eurocode 2 est de 0,3 mm et il existe une restriction pour les ouvrages en contact avec l'eau². En veillant à vérifier cette grandeur, un fonctionnement conforme du béton est garanti. Au contraire, si l'ouverture des fissures devient trop importante, le béton perd de son efficacité suite à une diminution de ses caractéristiques et sa durabilité est réduite suite au passage de substances provoquant la corrosion des armatures. C'est pourquoi des études ont été menées dans le but de connaître l'origine du retrait et afin de savoir comment le limiter.

La solution utilisée couramment pour limiter cette fissuration, provoquée par des phénomènes hydriques et thermiques dans l'élément, est l'utilisation de joints de retrait ou de dilatation. Le bridage conditionne donc le nombre de joints à placer dans les éléments. Toutefois, ces joints en élastomère sont inévitablement soumis à une dégradation. Par conséquent, ils nécessitent un remplacement régulier et coûteux. Ceci explique pourquoi les ingénieurs visent à réduire au maximum leur utilisation. Un article abordant la conception de grandes écluses en Allemagne³ va dans ce sens. Il explique le désir de minimisation des joints par la recherche de méthodes de construction « monolithique » des écluses. A terme, en tenant compte de la construction et de la maintenance, on espère augmenter la rentabilité en supprimant les désavantages de l'utilisation de joints.

² L'ouverture des fissures maximale recommandée w_{max} est donnée dans le tableau 7.1N du paragraphe 7.3 de l'Eurocode 2.

³ KUNZ, C., Enseignement des constructions récentes de grandes écluses en Allemagne, 2006, 1-5.

Dans le cas des éléments fins tels que les dalles en béton, une série de règles de bonne pratique permettent de réduire le retrait, ce qui minimise leur fissuration. En respectant ces règles d'art basées sur l'expérience d'années de pratique, il est possible de contrôler les effets du retrait dans les ouvrages simples. Par contre, pour des ouvrages plus complexes, il est intéressant d'étudier les différents phénomènes se produisant à l'intérieur du massif si on désire une réalisation la plus économique possible.

De cette manière, tout surdimensionnement est évité grâce à une minimisation des quantités d'armatures et du nombre de joints.

3. Définitions

3.1 Le bridage

Le Petit Larousse illustré (2002) définit le verbe « brider » comme le fait « d'empêcher de se manifester ; de contenir ; de refréner. » Dans le secteur de la construction, on parle de béton bridé lorsqu'une déformation indépendante des sollicitations est empêchée (totalement ou en partie) dans un ouvrage solidaire à un élément stable ou stabilisé. On parle donc de bridage si le béton a à la fois tendance à se déformer et que cette déformation est entravée.

3.2 Les sollicitations traitées

Parmi les sollicitations provoquant des contraintes dans le béton bridé, on distingue différents types de retraits empêchés (de type chimique, hydrique et thermique). Or, cette contraction du béton n'est pas homogène lors de l'analyse des éléments massifs. Ceci s'explique par un comportement différent des molécules selon leur proximité avec l'air ambiant.

La déformation ε sera toujours calculée comme si elle était provoquée par une variation négative de la température. Elle dépend donc du coefficient de dilatation thermique du matériau α [$^{\circ}\text{C}^{-1}$] et son évolution obéit à la loi suivante :

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T.$$

Lorsqu'on est confronté à un ouvrage bridé, cette déformation est gênée partiellement ($0 < k_{\text{brid}} < 1$) ou totalement ($k_{\text{brid}} = 1$). La réduction du volume

étant empêchée, le béton est soumis à des contraintes de traction proportionnelles au module du matériau suivant la loi de Hooke :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_{\text{empêché}} .$$

4. Méthodes de protection

D'une part, les moyens de prévention tels que la cure du béton visent à réduire les différents retraits. D'autre part, il existe des méthodes permettant une protection contre les contraintes élevées, comme par exemple le placement de barres en acier horizontales. La technique consistant en une coupure de l'élément par des joints de retrait vise à diminuer le bridage. En voici d'autres :

- une isolation thermique des zones de faible épaisseur permet de diminuer le gradient thermique et la fissuration qui en résulte (pas le cas du bajoyer) ;
- lors du choix de béton, opter pour un ciment possédant un dégagement de chaleur aussi faible que possible (en grandeur et en vitesse). Il est possible de jouer sur la nature du ciment, sur les adjuvants et aussi sur la température du béton frais (idéalement une dizaine de °C). En agissant de la sorte, on réduit l'augmentation de température lors de l'hydratation ;
- éviter les coffrages en bois car ils sont trop isolants. Sinon, il faut les démonter après avoir attendu la baisse de température du centre du massif. De cette manière, on évite les déséquilibres importants et on diminue par conséquent le gradient thermique ;
- prévoir des armatures supplémentaires afin de réduire l'ouverture des fissures. Des fissures apparaissent en l'absence d'armatures dès que σ atteint la contrainte limite du béton f_{ct} . Mais le placement d'armatures n'empêche pas le béton de se fissurer par gradient thermique. En effet, leur coefficient de dilatation thermique est environ identique à celui du béton ($12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Le but est plutôt d'augmenter le nombre de fissures, ce qui permet par conséquent de réduire leur ouverture.

5. Calcul des bajoyers de l'écluse de Lanaye

Habituellement, on interrompt les bajoyers environ tous les 15 mètres pour y insérer des joints devant garantir l'étanchéité. Mais le grand désavantage de cette technique réside dans les surcoûts de fabrication et de maintenance. 20% des joints de retrait deviennent perméables après une durée de fonctionnement de 25 ans. Ce problème est également rencontré pour 80% des joints de dilatation⁴. De plus, si les joints sont abîmés, la durabilité sera fortement réduite.

Une solution envisagée pour réduire ces coûts de maintenance est la construction monolithique de l'écluse. Les deux points à prendre en compte pour le dimensionnement de ces ouvrages sont, d'une part, la contrainte précoce lors de la dispersion de la chaleur d'hydratation dans le bajoyer bridé et d'autre part, les contraintes tardives causées par des variations de la température. Par exemple, l'écluse double de Hohenwarthe, dans l'Elbe-Havel-Kanal, a été élaborée avec un radier monolithique car une méthode utilisant des joints de dilatation entraînait des déformations trop élevées. Par contre, les bajoyers ont été interrompus par des joints.

5.1 Dimensions de l'écluse

La coupe forme un demi cadre en béton armé destiné à la reprise des charges des eaux et du sol de façon efficace. Des bassins d'épargne et un système de pompage sont construits pour faire varier le niveau d'eau.

⁴ Kordina K., Behälter in Massivbauweise, Bautechnik 73, (1996), H.5

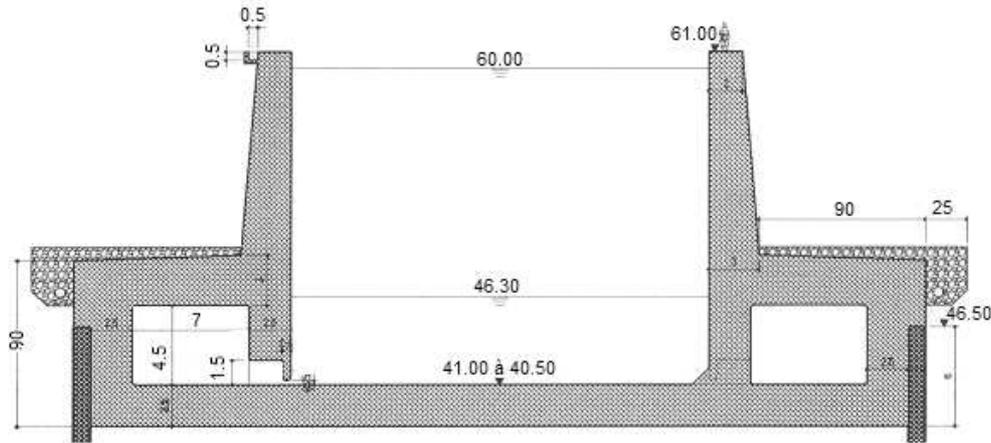


Figure 2 : Coupe de l'écluse ; plan d'avant-projet (niveaux en mètres)

5.2 Justification des épaisseurs de béton

L'écluse est soumise à différentes sollicitations qui engendrent une série d'efforts (flexion M , cisaillement V et compression N), entre autres dans les bajoyers. Ces efforts peuvent être calculés précisément grâce à un programme de modélisation par éléments finis tel que OSSA2D (programme développé par l'ULg et le bureau d'études Greisch.). D'abord, on y dessine une coupe de l'écluse à l'aide de barres dont on définit les caractéristiques géométriques (aire, inertie) et les propriétés physiques (poids volumique, module de Young).

Ensuite, on applique à la structure les différents cas de charges :

- le poids propre de la structure : calculé à partir du poids volumique du béton armé:

$$\rho_{b.a.} = 25 \text{ [kN/m}^3\text{]} ;$$

- le poids propre du sol : des essais géotechniques (forages et essais de pénétration) ont été effectués par le MET ; ils ont permis de connaître les densités des différentes couches de sol ainsi que leur raideur ;
 - poids volumique du sol sec $\rho_{\text{sec}} = 18 \text{ [kN/m}^3\text{]} ;$
 - poids volumique du sol humide $\rho_{\text{humide}} = 21 \text{ [kN/m}^3\text{]} ;$
 - poids volumique du sol déjàugé $\rho_{\text{déj}} = 11 \text{ [kN/m}^3\text{]} ;$

- les poussées exercées par le sol avec différents niveaux de la nappe phréatique : les contraintes horizontales à une certaine profondeur sont fonction de la pression verticale en ce même point. On a :

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v + \frac{c}{\operatorname{tg}\varphi} \left[\frac{1 \mp \sin \varphi}{1 \pm \sin \varphi} - 1 \right]$$

- où σ_A = contrainte de poussée active [Mpa] ;
 σ_P = contrainte de poussée passive (butée) [Mpa] ;
 K représente le coefficient de poussée, de butée ou de repos ;
 c représente la cohésion du sol (qui peut être négligée dans ce cas) ;
- la poussée exercée par l'eau dans le sas ($K = 1$) ;
 - les surcharges d'exploitation.

NB: on distingue le coefficient de poussée active et le coefficient de poussée passive (butée). Ils dépendent de l'angle de frottement du sol ($\varphi = 30^\circ$) :

– coefficient de poussée : $K_a = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$

– coefficient de butée : $K_p = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$

– coefficient de repos : $K_o = 1 - \sin \varphi = 0,5$ (si élément rigide)

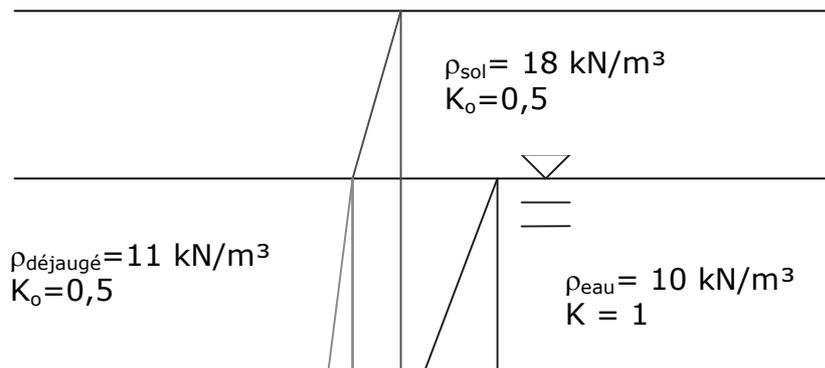


Figure 3 : Diagramme des poussées dues au sol et à l'eau sur le bajoyer.

Le sol peut être modélisé par une série de bielles espacées d'1 m. Leur section est déterminée de manière à obtenir une réaction équivalente à celle d'1 m² de sol. Formule utilisée :

$$E_{\text{sol}}^* \cdot A_{\text{sol}} = \frac{E_{\text{bielle}} \cdot A_{\text{bielle}}}{L_{\text{bielle}}}$$

où E^* représente la raideur du sol estimée à $10 \text{ kg/cm}^3 = 10^5 \text{ kN/m}^3$,
 E est le module de Young choisi pour les bielles (en kN/m^2).

Des combinaisons de cas de charge (ELU et ELS) ont été définies avec les coefficients appropriés. Finalement, le programme calcule les efforts dans le bajoyer :

$$M_{\text{max}} \approx 4500 \text{ kNm} \quad \text{et} \quad T_{\text{max}} \approx 1100 \text{ kN}$$

Afin de justifier l'épaisseur de bajoyer, on calcule le coefficient d'utilisation du béton μ . Celui-ci est connu grâce à la formule suivante :

$$\mu = \frac{M_{\text{Sd}}}{b \cdot d^2 \cdot \alpha \cdot f_{\text{cd}}}$$

Dans cette formule,

- M_{Sd} représente le moment sollicitant de calcul (à l'état limite ultime) ;
- b vaut 1 m (largeur d'ouvrage collaborante) ;
- d est la distance entre le centre de gravité des armatures et la face de béton comprimée ;
- pour du béton C30/37,

$$\alpha \cdot f_{\text{cd}} = \frac{\alpha \cdot f_{\text{ck}}}{\gamma_c} = \frac{0,85 \cdot 30}{1,5} = 17 \text{ MPa}$$

Lors d'un dimensionnement économique, on veille à atteindre une proche de 0,2. Or dans cet exemple, le coefficient est bien inférieur à 0,2. L'épaisseur moyenne de 2,5 m choisie pour le bajoyer est donc raisonnable. De plus, il reste une marge de sécurité dans le cas de chocs de bateaux, par exemple.

5.3 Estimation des armatures verticales

Des armatures sont placées dans le sens de la hauteur afin de reprendre l'effort de traction induit par le moment de flexion M_{Sd} dans le bajoyer.

Connaissant le diagramme enveloppe du moment de sollicitation, on obtient la section d'armatures totale pour les deux couches externes. Des étriers ne sont pas nécessaires car l'effort tranchant sollicitant de calcul V_{Sd} est bien inférieur à l'effort tranchant résistant de calcul V_{Rd1} .

5.4 Analyse des retraits activés

Retrait endogène

D'une part, on assiste à un retrait chimique par contraction de Le Chatelier qui consiste en une diminution du volume des hydrates formés par rapport au volume des réactifs (le ciment et l'eau). D'autre part, la contraction du béton s'explique par une tension capillaire qui croît lorsque les pores se vident, provoquant la compression du squelette solide.

Ce retrait est important pour des bétons à hautes performances alors qu'il reste faible pour des bétons ordinaires (rapport E/C > 0,45)⁵. En effet, le retrait endogène (ou retrait d'autodessiccation) est fonction de la résistance du béton. Ainsi, pour du béton C30/37 utilisé dans la construction de l'écluse de Lanaye, la valeur finale (uniforme dans tout l'élément) vaut

$$\varepsilon_{ca,f} = 2,5.(f_{ck} - 10).10^{-6} = 50.10^{-6}.$$

Il évolue rapidement suivant la formule

$$\varepsilon_{ca}(t) = (1 - e^{-0,2\sqrt{t}}).\varepsilon_{ca,final}$$

On en tiendra donc compte en appliquant une variation de température de 5°C lors du calcul des contraintes de bridage car :

$$\varepsilon = \alpha.\Delta T = 50.10^{-6} \Leftrightarrow \Delta T = 5^{\circ}\text{C}.$$

Retrait de dessiccation

Le départ d'eau par évaporation vers l'extérieur génère une contraction. Etant fonction de la migration de l'eau au travers du béton durci, la déformation due au retrait de dessiccation évolue lentement vu l'épaisseur de 2,5 m. En fait, c'est le rayon moyen, rapport entre le double de l'aire transversale de béton et le périmètre exposé à la dessiccation, qui influence ce retrait.

De plus, il dépend fortement de l'humidité relative (80% pour des constructions extérieures). Il ne concerne qu'une certaine couche proche de l'atmosphère et vu les variations du degré de séchage, il est la source d'un gradient d'humidité induisant des « autocontraintes » (traction au niveau de la peau et compression du cœur du massif). Par conséquent, si l'atmosphère

⁵ Le rapport E/C indique quelle est la proportion d'eau (E) par rapport à celle de ciment (C)

n'est pas saturée, on assiste à une fissuration de peau. Il est toutefois possible d'appliquer une cure afin de réduire l'importance du phénomène.

Mais, étant donné l'extrême lenteur du départ d'eau, on peut considérer que la réhumidification apportée par les précipitations et par l'eau de l'écluse annule ce retrait (en fonction de la durée avant la mise en service).

Retrait thermique

Les réactions d'hydratation des composants du ciment sont exothermiques, elles s'accompagnent d'un dégagement de chaleur (environ 300 J/g selon le type les proportions utilisées). On assiste par conséquent à une augmentation de la température moyenne, suivie d'un refroidissement par échange de chaleur après le décoffrage.

Les contraintes de compression apparaissant lors de l'augmentation de température ne sont pas préjudiciables vu que le module de Young du béton est encore faible lors de la prise (loi de Hooke : $\sigma = E \cdot \epsilon$). Par contre, le retrait empêché lors du refroidissement, lorsque la rigidité a augmenté, génère des contraintes de traction σ_z qui peuvent provoquer une fissuration de l'élément si elles dépassent la résistance limite en traction du béton ($f_{ctm} \approx 2,9 \text{ N/mm}^2$).

Le gradient thermique

La peau du bajoyer, proche de l'air ambiant, refroidit rapidement, au contraire du cœur du bajoyer. Cette différence de vitesse de refroidissement induit une distribution plus ou moins parabolique des contraintes σ_z à l'intérieur de la section de béton. La peau, « bridée » par le centre du massif, voudrait se rétracter plus rapidement. Par conséquent, elle est soumise à de la traction. Le cœur, quant à lui, subit une compression.

En conclusion, ce gradient de température peut être à l'origine d'une fissuration de la peau, même si l'élément n'est pas bridé et que la résultante des contraintes est nulle.

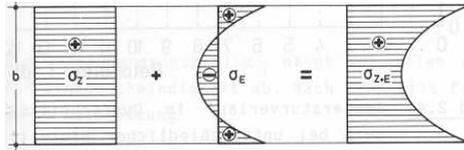
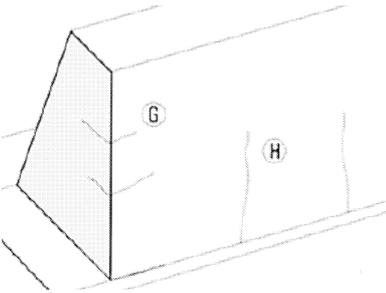


Figure 4 : Contraintes de bridage (σ_z) et autocontraintes (σ_E) dans un élément massif bridé soumis au retrait thermique

5.5 Modes de fissuration

Dans le cas des voiles épais coulés sur une fondation, on assiste à deux types de fissuration :



- des fissures verticales apparaissent du fait que le retrait est empêché par la condition d'encastrement rencontrée à la base (si $L/H > 2$, ces fissures peuvent atteindre le sommet du bajoyer).
- comme expliqué auparavant, une fissuration de la peau par gradient de contraintes est possible.

Des armatures au niveau des couches externes permettent une répartition en microfissures non préjudiciables. Ce ferrailage doit être placé dans le sens de la longueur, il s'additionne donc à celui imposé par les sollicitations d'exploitation.

5.6 Estimation des armatures horizontales

La considération de l'entièreté de la section de béton amène à la nécessité d'un « ferrailage prohibitif »⁶. De même, la fédération de l'industrie cimentière affirme que « l'utilisation d'armatures ne résout pas économiquement le problème de la fissuration. »

C'est pourquoi l'institut des constructions massives de l'université de Darmstadt affirme que le gradient de contrainte est déterminant pour le

⁶ ACKER, P., Retraits et fissurations du béton, Association Française Pour la Construction, Documents scientifiques et techniques, 1992.

ferrailage minimal. Lorsqu'on étudie le bridage par des éléments externes, il est permis de ne considérer que deux couches extérieures. La FEBELCEM préconise la prise en compte de deux tranches d'épaisseur valant 30 cm. Celles-ci constituent un « corset » durci renforcé par des barres en acier.

Distribution interne des contraintes

Pour différentes épaisseurs de mur, l'évolution des contraintes par gradient de température a été calculée sur base de la conductivité du béton⁷. Des nombres sans dimension ont été introduits afin de faciliter le calcul des applications pratiques. Ces chiffres dépendent des caractéristiques géométriques de l'élément (épaisseur b) et des propriétés thermiques du béton (conductivité $\lambda \approx 1,75 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Grâce à leur connaissance, on peut se servir de courbes basées sur des calculs et sur des expériences pour la détermination des inconnues (évolution de la température et des contraintes à l'intérieur du massif en fonction du temps).

Ainsi, on a le nombre de Biot

$$Bi = \frac{p \cdot b}{\lambda}$$

où p [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$] indique la quantité de chaleur transférée par la surface extérieure vers l'atmosphère.

Afin de déterminer l'épaisseur de la couche externe soumise à de la traction, on étudie le diagramme des contraintes dues au gradient thermique. On y considère la profondeur r de la zone fissurée étant soumise à une tension supérieure à la limite en traction.

Après avoir calculé le nombre de Biot, fonction de l'épaisseur de l'ouvrage et de la lenteur du transfert de chaleur, des abaques permettent d'estimer la valeur de la contrainte de peau maximale (environ 3 N/mm^2) et l'instant auquel celle-ci apparaît.

A ce moment, la température moyenne n'a pas encore beaucoup diminué et les contraintes de bridage externe restent faibles. A partir des contraintes de traction, il est aisé de calculer la section d'acier nécessaire.

⁷ HENNING, W. et ROSTASY, F., Zwang und Rissbildung in Wänden auf Fundamenten, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1990, n°407.

D'abord, la résultante normale N est estimée en multipliant les contraintes par la section fissurée : $N = \sigma_t \cdot A_{\text{fissuré}}$

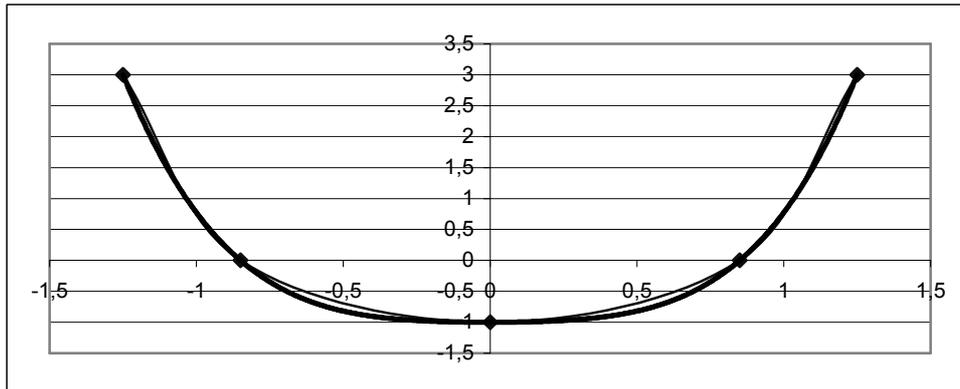


Figure 5 : Estimation de l'évolution des contraintes afin de connaître la profondeur de fissuration r (courbe réalisée à l'aide d'Excel)

Par après, cet effort normal est divisé par la résistance élastique de l'acier afin d'obtenir le ferrailage minimal nécessaire.

Contraintes de bridage

La contrainte auquel est soumis le béton de la base du bajoyer est connue :

$$\sigma = k_{\text{brid}} \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

avec $k_{\text{brid}} = 1$ (parfaitement encastré), $\alpha = 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ car :

- $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ pour une modélisation du retrait endogène ;
- $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ pour une modélisation du retrait thermique.

Cette valeur a été estimée en se basant sur la variation de température calculée dans des conditions adiabatiques ($\Delta T_{\text{ad}} \approx 37^\circ\text{C}$). Celle-ci dépend du dosage et du type de ciment. Mais il se produit un transfert de chaleur qui dépend de la durée de coffrage et de l'épaisseur, d'où l'estimation de la valeur de 30°C .

L'utilisation d'un programme de modélisation par éléments finis tel que FINELG permet de connaître la répartition des contraintes de bridage σ_w dans le bajoyer. Elles atteignent leur valeur maximale après une trentaine de jours, lorsque le gradient de contrainte est presque nul.

Une modélisation 2D a été jugée suffisante étant donné les hypothèses de calcul établies. Après avoir défini le maillage, les appuis, les caractéristiques du béton, les cas de charge ainsi que les combinaisons, le programme calcule la déformée et les contraintes normales grâce auxquelles le ferrailage nécessaire est déterminé.

La figure 6 illustre les deux instants critiques :

- 1) autocontraintes maximales et contraintes de bridage négligeables ;
- 2) contraintes de bridage maximales et autocontraintes négligeables

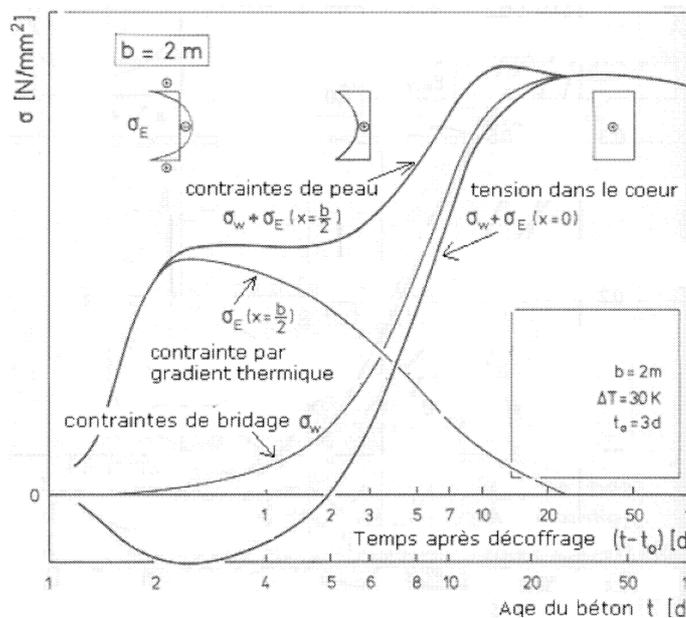


Figure 6 : Allure des contraintes par gradient thermique et des contraintes de bridage externe à la base d'un mur de 2m d'épaisseur. ($b = 2$ mètres et $x = 0$ au centre du mur) (Source : Rostacy, Henning)

6. Résultats et conclusions

Résultats

Ce sont les contraintes normales suivant la direction de l'axe longitudinal qui déterminent le ferrailage nécessaire.

Voici le diagramme des contraintes pour une longueur de bajoyer de 50 m :

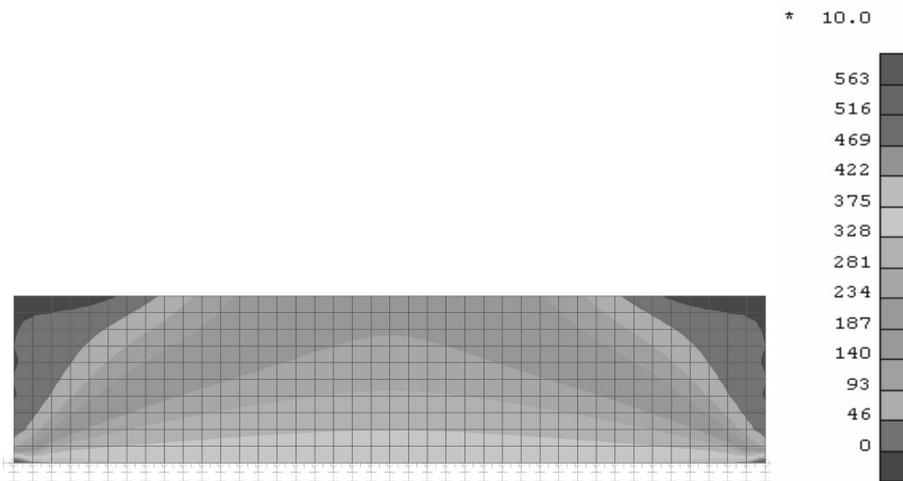


Figure 7 : Courbes des contraintes normales [kN/m²] calculées par le programme de calcul par éléments finis FINELG et affichées à l'aide de DESFIN.

La valeur au niveau de la base correspond bien à celle attendue pour un bridage total ($\sigma \approx 1.E.\alpha.\Delta T = 3850 \text{ kN/m}^2$). Par contre, les tensions sont beaucoup plus faibles pour les couches supérieures vu leur blocage moindre. Voici quelques graphiques visant à illustrer comment une augmentation de l'écartement des joints modifie la quantité d'acier à utiliser.

Influence sur les contraintes de bridage extérieur

Le graphique de la figure 8 montre les sections d'acier à prévoir pour reprendre les contraintes de bridage. Il ne tient pas compte du gradient thermique lorsque le béton est jeune.

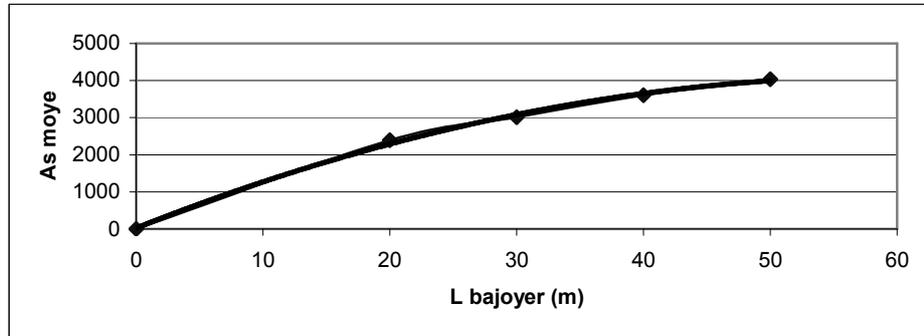


Figure 8 : Sections d'acier à prévoir pour reprendre les contraintes de bridage

- Les points correspondent aux sections d'acier calculées (en mm²/m).
- La courbe consiste en un lissage à partir des points calculés.

Influence sur la section d'acier moyenne

Le graphique suivant montre les sections d'acier à prévoir pour reprendre les contraintes dues aux effets cités auparavant cumulés.

Il est à remarquer que même pour des longueurs de bajoyer très faibles, il faut déjà utiliser un ferrailage non négligeable étant donné la répartition interne des contraintes dans les éléments massifs.

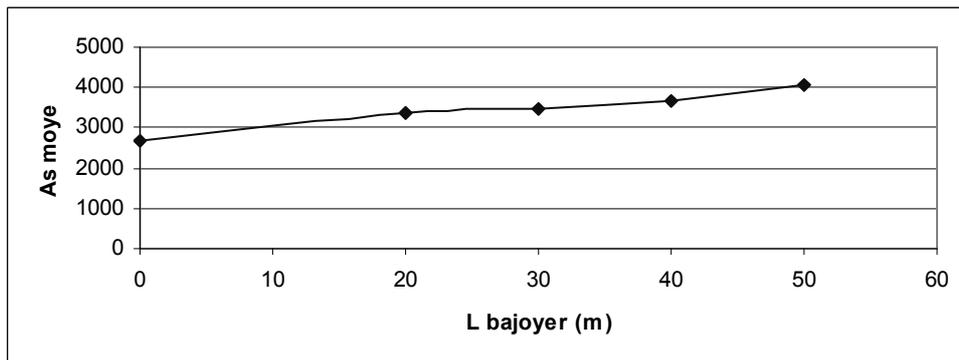


Figure 9 : Sections d'acier à prévoir pour reprendre les contraintes cumulées

Conclusions

Rappelons que le problème de la détermination des armatures pour la reprise des efforts de bridage dans les éléments massifs tels que les bajoyers d'écluse se résolvait dans le passé en réduisant la longueur de ces éléments par insertion de joints de retrait. Ces coupures diminuent le degré de bridage extérieur k mais elles présentent l'inconvénient d'une dégradation des joints impliquant des coûts de maintenance.

L'apport du travail de fin d'études réalisé peut se résumer au travers des considérations suivantes :

- Pour le calcul des armatures horizontales dans les voiles épais, on étudie d'abord la répartition des contraintes dues à un gradient thermique apparaissant dans les premières heures suivant le décoffrage.
- Ensuite, pour l'estimation des efforts de traction maximaux générés par le bridage extérieur, une épaisseur réduite a été considérée (30 cm). La validité du ferrailage obtenu a été vérifiée en estimant l'ouverture moyenne des fissures, celle-ci ne pouvant pas dépasser une valeur de 0,2 mm lorsqu'on étudie des ouvrages en contact avec l'eau.

Cette méthode de calcul permet d'augmenter l'écartement des joints insérés dans le bajoyer, sans toutefois utiliser des quantités excessives d'acier.

En ce qui concerne le cas concret de l'écluse de Lanaye, une division du bajoyer en cinq parties d'une longueur de 45 m chacune semble pouvoir être rentable. L'écartement des joints serait ainsi multiplié par trois par rapport à celui qui était préconisé dans le passé (environ 15 m). De plus, l'augmentation de la section d'acier imposée par le bridage extérieur, par rapport à celle définie pour la reprise du gradient de contraintes, n'est pas trop élevée si on tient compte uniquement des deux tranches extérieures de 30 cm. Vu que l'ouverture des fissures moyenne est inférieure à la limite permise, une réduction reste envisageable.

7. Références bibliographiques

ACKER, P., *Effets thermiques dans les bétons en cours de fabrication et application aux ouvrages d'art*, Cahiers de l'A.F.P.C., Février 1986, n°241, 63-76.

ACKER, P., *Retraits et fissurations du béton*, Association Française Pour la Construction (A.F.P.C.) - Documents scientifiques et techniques, 1992.

EUROCODE 2, *Calcul des structures en béton, Section 2 : Bases de calcul*, NF EN 1992-1-1, 2005.

EUROCODE 2, *Calcul des structures en béton, Section 3 : Matériaux*, NF EN 1992-1-1, 2005.

FEBELCEM (Fédération de l'industrie cimentière), *Les bétons de masse*, fichier .pdf, 1981, 1-6.

KUNZ, C., *Enseignement des constructions récentes de grandes écluses en Allemagne*, fichier .pdf, 2006, 1-5.

HENNING, W. et ROSTACY, F., *Zwang und Rissbildung in Wänden auf Fundamenten*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1990, 9-41.