

Le recalcul de structures dans une démarche d'expertise

I. Introduction

Le diagnostic d'un ouvrage affecté par une réaction de gonflement interne fait appel à deux grands types de moyens d'investigation :

- Le suivi in situ du gonflement de la structure et de sa fissuration dans le temps
- L'analyse en laboratoire d'échantillons prélevés sur l'ouvrage.

Compte tenu du coût de ces différentes techniques et sachant que le gonflement est un phénomène qui évolue en général assez lentement, il convient d'adopter une démarche progressive en fonction de l'état apparent de l'ouvrage et de la vitesse d'évolution de ses désordres. Ainsi, le guide technique « Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne » (LCPC 2003) propose une stratégie d'intervention divisée en plusieurs étapes, à savoir : hiérarchisation des priorités, évaluation initiale, suivi de l'ouvrage, recherche des causes de désordre, pronostic d'évolution. Toutes ces étapes sont étroitement liées, et le passage entre deux étapes successives est dicté par l'évolution du gonflement dans la structure.

Le recalcul d'ouvrage s'inscrit dans l'étape pronostic d'évolution, il est destiné à fournir aux ingénieurs un résultat quantitatif de l'évolution de la dégradation. Ce recalcul permet d'abord de vérifier la sécurité au stade actuel d'évolution (Calcul état limite ultime (ELU)), de vérifier ensuite l'aptitude au service au stade actuel (calcul des flèches et des contraintes à état limite de service (ELS)), de vérifier la durabilité notamment en s'assurant du contrôle de l'ouverture des fissures, puis d'estimer pendant combien de temps on aura des marges suffisantes (ou non) vis-à-vis de ces différents états limités, et enfin de concevoir d'éventuelles méthodes de réparation. Dans ce qui suit, on détaillera les différentes parties du recalcul d'ouvrage, en s'intéressant aux différentes données nécessaires pour effectuer le calcul en détaillant la méthode de calage de la loi d'avancement, la méthode de calage du potentiel de gonflement, pour finir avec l'organisation des calculs.

II. Analyse des informations collectées

1) Suivi du gonflement structurel

Cette opération vise à évaluer les déformations globales de la structure et leur évolution dans le temps en l'équipant avec des bases de mesure dimensionnelle. Les informations recueillies permettront de confirmer le diagnostic de la RGI en vérifiant qu'il y a bien un gonflement de la structure. Elles permettent aussi de renseigner sur la vitesse d'évolution du phénomène, ce qui permet d'orienter le choix de la technique de traitement de l'ouvrage. Ces données sont également indispensables pour vérifier le calage des paramètres en prédisant l'état actuel, avant de simuler les évolutions.

Deux types de suivi peuvent être réalisés. Premièrement, le suivi de certaines zones fissurées ou mesure de l'indice de fissuration (IF) méthode (LPC n°47 1997) : ce suivi présente l'avantage d'être peu onéreux et facile à réaliser, et de donner une information en « valeur absolue » (c'est-à-dire que l'on mesure un cumul d'ouvertures de fissures représentatif du gonflement de la structure depuis sa construction, en supposant qu'il n'y avait pas de fissure à la mise en service). Le suivi de fissuration par IF est généralement fait lorsqu'on a une fissuration dense multidirectionnelle (faïençage). Dans le cas d'une fissure isolée on fait le suivi par mesure direct d'ouverture.

Deuxièmement, un suivi dimensionnel du gonflement par distancemétrie. Ce suivi qui se fait sur de grandes distances, est plus difficile à réaliser et plus onéreux ; il donne une information en « valeur relative » (c'est-à-dire que l'on mesure le gonflement à partir du moment où le système de mesure est mis en place sur l'ouvrage), et présente le grand avantage d'intégrer le gonflement total et véritable de la structure, c'est-à-dire le cumul d'ouverture de toutes les fissures plus l'expansion du béton situé entre les fissures. On le représente par $d_s(t)$, pour une période $[t_{s0}, t_{s1}]$ allant de la première mesure structurelle à la date actuelle.

Les mesures de distancemètre sont très influencées par les conditions environnementales et surtout par les variations de température saisonnières et diurnes auxquelles l'ouvrage est exposé, pour cela il est nécessaire de faire une correction des mesures par rapport à ces variations thermiques.

2) Suivi d'expansion résiduelle

Le suivi du gonflement résiduel consiste à prélever une ou plusieurs éprouvettes dans une carotte préalablement extraite d'une partie de l'ouvrage, à équiper ces carottes de plots de mesure extensométrique et à relever pendant au moins un an l'évolution de la longueur de la carotte stockée en ambiance saturée en humidité ($h_0=100\%$) ou dans l'eau dans un conteneur maintenu à une température contrôlée, $\theta_0=20^\circ\text{C}$ ou 38°C . Ces mesures permettront de calculer une déformation chimique résiduelle ε_{c} pendant la durée $[t_{c0}, t_{c1}]$ avec t_{c0} représente le temps d'extraction de l'échantillons de la structure et t_{c1} représente le temps pour lequel le gonflement est asymptotique. Cet essai donne localement des informations sur le potentiel d'expansion du béton susceptible de se développer encore. Les détails de cette méthode sont présentés dans le guide méthode (LPC N°47 1997) pour la RAS et méthode (LPC N°66 2008) pour la RSI. Cette donnée est associée à un suivi massique permettant d'interpréter la contribution d'un apport d'eau au développement de la réaction, et détecter d'éventuels artefacts. La donnée est par ailleurs sensible aux conditions de conservation des éprouvettes depuis le carottage (Multon et al 2008)

3) Suivi du gonflement du béton reconstitué

La composition du béton reconstitué doit approcher au mieux la composition réelle du béton dans la structure. Pour cela une analyse chimique approfondie d'un échantillon de l'éprouvette est nécessaire afin de déterminer la bonne composition à utiliser, à moins qu'il

soit possible de revenir au dossier de l'ouvrage pour connaître la composition du béton utilisé lors du coulage. Le procédé de mesure d'expansion est le même que celui utilisé pour le suivi d'expansion résiduelle méthode (LPC N°66 2008).

Le calibrage des paramètres sur des courbes d'expansion obtenues sur un béton reconstitué donne une meilleure précision des paramètres que le calage sur des essais de gonflement résiduel puisqu'on élimine l'inconnue sur la valeur du gonflement qui s'est déjà produit. Mais, l'essai de gonflement sur béton reconstitué demande plus d'informations sur la composition de béton et un temps de suivi éventuellement plus important que celui du suivi du gonflement résiduel. En outre, il peut être difficile de garantir que (en cas de τ_l élevé) les matériaux utilisées sont identiques (variations de composition du ciment notamment).

4) Données sur les conditions environnementales durant la vie de l'ouvrage

La connaissance de l'ambiance hydro-thermique interne de la structure nécessite trois types de données : d'abord, les conditions environnementales, i.e. la température et l'humidité du milieu ambiant $\theta_{am}(t)$, $h_{am}(t)$. Ensuite, il faut bien localiser les sources thermo-hydriques ponctuelles, par exemple le contact permanent avec l'eau liquide. Enfin la connaissance de l'état hydro-thermique initial. Ces connaissances aboutissent, à travers les calculs thermiques et hydriques de la structure, à la reconstruction du champ thermo-hydrique complet de l'ouvrage (Li et al. 2004) (LCPC 2003).

5) Données sur les conditions du coulage et de la prise du béton.

Dans le cas de la RSI, la connaissance de l'évolution de la température au jeune âge est nécessaire pour connaître le potentiel de gonflement de la structure. Ainsi il est primordial d'avoir connaissance de la température extérieure de la structure dans la période de coulage, du type de coffrage utilisé ainsi que des dates de décoffrage. Dans le cas d'un phasage lors du coulage du béton il est important de connaître les dimensions de chaque levée ainsi que leurs dates respectives.

Le calcul de l'échauffement interne du béton au jeune âge nécessite une information sur son exothermie à partir de la formule de Waller (Acker et al.2004) ou par des essais QAB sur des éprouvettes en béton reconstitué. Ces essais consistent à mettre des éprouvettes en béton au jeune âge dans une enceinte adiabatique et enregistrer l'évolution de la température dans cet échantillon. Ces différentes données permettront, par le biais d'un calcul de diffusion, de construire l'histoire thermique au jeune âge de tout point de l'ouvrage (Piau 1991)(Acker et al. 2004)

III. Procédure de calage du modèle

Les informations collectées à l'échelle de la structure vont servir au calage du modèle présenté dans la partie 2. La prise en compte des spécificités d'une formule de béton, en termes de caractéristiques chimiques, se traduit par le calage de trois lois, à savoir : la loi d'avancement, la loi du potentiel de gonflement et la loi de la variation de l'endommagement en fonction du gonflement observé. On pourra en effet supposer, au moins en première approximation, que les autres couplages sont raisonnablement approchés avec des paramètres « standards » ou associés aux caractéristiques mécaniques usuellement connues de l'ingénieur. Dans la suite on détaillera les méthodes de calage de ces trois lois.

1) Calage de la loi d'avancement

L'objectif de cette opération de calage est de déterminer les paramètres ε_{∞}^0 , τ_{∞}^0 , τ_l^0 , φ^0 et δ^0 de la loi de gonflement (l'indice 0 désigne le paramètre de gonflement d'une éprouvette en expansion résiduelle ou en béton reconstituée). Ces paramètres sont déterminés à partir des essais faits sur éprouvettes représentatives extraites de l'ouvrage ou sur éprouvettes de béton

reconstitué. Si on dispose des résultats de gonflement d'un béton reconstitué, la démarche est assez simple, elle consiste à ajuster la loi de gonflement sur la courbe d'expansion à l'aide d'une méthode classique, comme le gradient conjugué ou une méthode de plus profonde descente (Ciarlet 2006).

En l'absence de béton reconstitué, la méthode à suivre est plus compliquée. En effet dans ce cas la vie d'une éprouvette se divise en deux parties : une partie *in situ*, $0 \leq t \leq t_{c1}$, du coulage de la structure jusqu'à l'extraction de la carotte, pendant laquelle on ignore en général l'histoire de son gonflement ; et la partie en laboratoire, pour $t_{c1} \leq t \leq t_{c2}$; durant laquelle son expansion résiduelle $\varepsilon_{r,ss}(\bar{t})$ est mesurée à partir de $\varepsilon_c(t = t_{c1})$ (valeur du gonflement au début de l'essai, *a priori* inconnue). Ainsi l'histoire du gonflement est partiellement connue :

$$\varepsilon_c(\bar{t}) = \begin{cases} \text{inconnue} & 0 \leq t \leq t_{c1} \\ \varepsilon_c(t_{c1}) + \varepsilon_{r,ss}(\bar{t}) & t_{c1} \leq t \leq t_{c2} \end{cases} \quad (6.1)$$

La difficulté de ce calibrage réside dans le fait que ni l'expansion résiduelle de l'éprouvette ni le suivi distance-métrique structurel ne fournissent les valeurs initiales $\varepsilon_c(t_{c1})$, $d_s(t_0)$. Dans ce cas la démarche à suivre est celle présentée par (LCPC 2003)(Li et al. 2003) qui consiste à enchaîner le travail sur deux étapes : d'abord, une étape matériau qui consiste à faire tourner des calculs sur une éprouvette soumise aux conditions hydrique et thermique de la carotte extraite de l'ouvrage, cette étape permettra de trouver le groupe de paramètres $(\varepsilon_{\infty}^0, \tau_c^0, \tau_i^0, \varphi^0, \delta^0)^{(k)}$ susceptible d'approcher au mieux la phase d'expansion résiduelle $\varepsilon_{r,ss}(\bar{t})$ déjà connue. Ensuite, intervient une étape de calcul de la structure qui consiste à utiliser le groupe de paramètres $(\varepsilon_{\infty}^0, \tau_c^0, \tau_i^0, \varphi^0, \delta^0)^{(k)}$ dans un calcul aux éléments finis sur la structure. Ainsi on sélectionnera le jeu (k) de paramètres qui approxime le mieux le suivi dimensionnel de la structure $d_s(t)$.

2) Calage de la loi du potentiel de gonflement

Le calage de la loi du potentiel de gonflement consiste à déterminer le paramètre α puisqu'on considère par hypothèse que l'énergie d'activation E et la température seuil T_0 sont constantes non seulement pour un béton donné mais aussi en général, puisqu'il s'agit du mécanisme commun de déstabilisation de l'ettringite. Cette hypothèse simplificatrice utilisée dans l'état actuel des connaissances pourra être remise en cause, étant donné que des études expérimentales montrent que le seuil T_0 dépend de la composition du ciment et surtout du taux d'alcalins.

La première étape consiste toujours à exploiter les résultats trouvés sur éprouvette. Dans le cas d'un béton reconstitué, on fait un calage de la courbe d'expansion et on détermine le potentiel de gonflement ε_{∞}^0 sachant que les conditions de traitement thermique sont contrôlées et connues. En revanche dans le cas d'une donnée d'expansion résiduelle on fait une reconstruction de la courbe d'expansion par la méthode déjà présentée dans la section précédente et on fait par la suite le calage afin de déterminer le potentiel de gonflement ε_{∞}^0 .

La deuxième étape consiste à faire un recalcul thermique, on peut reconstruire l'histoire thermique au jeune âge de la structure et en particulier au point où on a fait l'extraction de l'éprouvette. Cette histoire thermique nous permet de trouver la valeur de I_0 . Cette valeur est la contribution de l'histoire thermique au potentiel de gonflement ε_{∞}^0 . Ce potentiel s'écrit sous la forme suivante :

$$I_0 = \int_{T(\bar{t}) \geq T_0} e^{-\left(\frac{E}{R(T^{\#}(\bar{t}) - T_0)}\right)} dt \quad (6.2)$$

$T^{\#}(\bar{t})$: L'histoire thermique reconstituée par calcul thermique au jeune âge.

Le coefficient α s'écrit alors sous la forme:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{\infty}^0}{I_0} \quad (6.3)$$

Le calcul de α est nécessaire au processus de calibrage du modèle. En effet, il constitue l'unique paramètre qui reflète la composition du béton puisque sa détermination est issue des résultats sur éprouvette. Par suite, on peut déterminer le potentiel en différents points de la structure. Ce potentiel s'écrit de la façon suivante:

$$\varepsilon_{\infty} = \frac{\varepsilon_{\infty}^0}{\frac{I_0}{\alpha}} I \quad (6.4)$$

$$\text{Avec } I = \int_{T(t) \geq T_0} e^{-\left(\frac{E}{R(T(t)-T_0)}\right)}$$

3) Calage de la loi d'endommagement en fonction du gonflement observé

La variation du module d'Young dépend par hypothèse du gonflement observé dans la structure selon la loi suivante :

$$E = E_0(1 - d) \quad (6.5)$$

Avec

$$d = d_{max}(1 - \exp(-\omega \langle \varepsilon_{\infty} t - \varepsilon_0 \rangle^+)) \quad (6.6)$$

Les paramètres de cette description sont au nombre de quatre :

- E_0 est le module d' Young initial du béton
- d_{max} représente l'endommagement maximal enregistré sur une éprouvette en fin d'expansion (essai d'expansion résiduelle ou suivi sur béton reconstitué) d_{max} peut être évalué par suivi sonique.
- ω : est un paramètre qui représente la pente de l'évolution du gonflement, ce paramètre est considéré constant
- ε_0 : est un seuil d'expansion à partir duquel on a de l'endommagement
- $\langle \rangle^+$: désigne la partie positive d'une grandeur.

Le module d'Young initial E_0 peut être déterminé lors d'un essai de chargement en compression simple sur une éprouvette saine extraite de l'ouvrage ou sur béton reconstitué. d_{max} peut être retrouvé en faisant un essai de compression simple sur une éprouvette qui a atteint le palier de gonflement. Cet essai se fait juste après la fin de l'essai de gonflement résiduel et permet de déterminer E_{∞} . Le rapport entre module d'Young du béton endommagé et sain donne d_{max} selon la formule suivante :

$$d_{max} = 1 - \frac{E_{\infty}}{E_0} \quad (6.7)$$

En ce qui concerne la pente de l'évolution de l'endommagement ω et le seuil d'expansion ε_0 les expérimentations de (Brunetaud 2005) laissent admettre que ces deux valeurs peuvent être prises constantes. Pour cela on leur donne des valeurs fixes $\omega = 4$ et $\varepsilon_0 = 0.1 \%$. Ces valeurs fixes se traduisent à l'échelle microscopique par une formation d'ettringite qui exerce une pression sur les parois du milieu poreux, provoquant une déformation élastique jusqu'à un certain seuil ε_0 . Une fois ce seuil dépassé, on a une ouverture de fissure et augmentation de la porosité ce qui provoque une augmentation de la variable endommagement du matériau. Vu que cet endommagement est commandé par la déformation chimique, il évolue selon une pente ω . Le seuil d'endommagement et la pente d'endommagement sont susceptibles de varier selon la porosité et la résistance du squelette du milieu poreux, donc dépendent de la composition du béton. Ainsi il peut s'avérer utile de faire quelques mesures de module d'Young au cours du suivi du gonflement de l'éprouvette, ce qui permet la reconstruction de la courbe d'évolution de l'endommagement en fonction du gonflement.

IV. Présentation de la démarche de calcul

Le calcul mécanique est mené en utilisant la notion de déformation chimique imposée noté ε_x . Cette déformation résulte de l'expansion de l'ettringite à l'intérieur du milieu poreux. Elle s'écrit sous la forme d'un potentiel de gonflement ε_∞ multiplié par une loi d'avancement $\zeta(t)$. L'avancement de la réaction $\zeta(t)$ est variable au cours du temps avec un temps de début de

réaction postérieur à la fin de l'échauffement. Le calcul de l'ouvrage doit a priori se faire pas-à-pas sur une durée de temps $[t_l, t_f]$, avec t_l : temps initial de référence juste après chargement, t_f représente une date future correspondant à l'état prédit pour la structure. On note bien qu'entre t_l et t_f , il existe une date t_a qui représente l'état actuel de la structure, cette date est assez importante vu qu'elle permet de comparer l'état actuel de la structure aux mesure in-situ.

Vu que le temps séparant la fin de l'échauffement du temps de chargement est très négligeable devant la durée de vie de l'ouvrage, on peut prendre en général t_1 . Ainsi on

décompose la durée $[t_0, t_f]$ en n intervalles de temps d'amplitude t_i , $i=1..n$ de $n+1$ instants

avec $t_i = t_1 + \sum_{i=1}^n t_i$ ainsi le calcul incrémental se fait sur une durée t_i .

Comme l'avancement de la réaction dépend de la température et de l'humidité, il est nécessaire d'avoir la température et le degré de saturation en chaque point de l'ouvrage. Ces données seront accessibles par un calcul thermique et hydrique préliminaire fait avec le même pas de temps que le calcul mécanique. Suivant la fréquence caractéristique des variations thermiques et hydrique, ces phénomènes peuvent imposer une discrétisation relativement fine par rapport aux seules évolutions des chargements.

Dans le cas unidimensionnel, l'écriture incrémentale de cette déformation est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta \varepsilon_x = \Delta \varepsilon_\infty \zeta(t) + \varepsilon_\infty \Delta \zeta(t) \quad (6.8)$$

Le potentiel de gonflement dépend de l'histoire thermique au jeune âge $T^{JA}(t)$, le calcul de $T^{JA}(t)$ se fait sur un intervalle $[t_0, t_m]$ où t_m est le temps de maturation de béton. En découpant $[t_0, t_m]$ en des incréments de temps $(\tau_j)_{j=1..n}$ et en supposant que la température varie linéairement sur chaque intervalle, on peut calculer le potentiel de gonflement sur ces intervalles en utilisant la méthode des trapèzes, ainsi le potentiel s'écrit sous la forme suivante :

$$\varepsilon_\infty = \frac{1}{2} \alpha \sum_{j=1}^m \tau_j (f(T^{JA}(t)) + f(T^{JA}(t + \tau_j))) \quad (6.9)$$

Avec

$$f(T^{JA}(t)) = \exp\left(\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T^{JA} - T_0}\right)\right) \quad (6.10)$$

Ainsi, à partir des équations (6.8) et (6.9), on peut expliciter la déformation chimique imposée. Une généralisation au cas tridimensionnel nous permet d'écrire cet incrément de déformation sous forme tensorielle de la façon suivante :

$$\underline{\underline{\Delta \varepsilon_x}} = \begin{pmatrix} \varepsilon_\infty \Delta \zeta(t) & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_\infty \Delta \zeta(t) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_\infty \Delta \zeta(t) \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

Cet incrément de déformation isotrope est rendu anisotrope en le multipliant par un tenseur d'anisotropie dont les coefficients ont été présentés dans le chapitre précédent. Ainsi l'incrément de déformation chimique anisotrope s'écrit sous la forme suivante :

$$\underline{\underline{\Delta \varepsilon}}_X = \begin{pmatrix} \alpha_I \varepsilon_{oc} \Delta \xi(t) & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{II} \varepsilon_{oc} \Delta \xi(t) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{III} \varepsilon_{oc} \Delta \xi(t) \end{pmatrix} \quad (6.12)$$

Où α_I, α_{II} sont les coefficients d'anisotropie, ils dépendent du sens du coulage du béton (anisotropie intrinsèque) et de la contrainte (anisotropie induite). Si la discrétisation temporelle est assez fine pour que les évolutions de contraintes soient faible sur deux pas de temps successifs, on admettra de ne pas itérer sur la valeur actuelle de la contrainte pour le

calcul des σ . On prendra à la place le tenseur des contraintes calculées à l'incrément de temps précédent.

Ainsi on peut en déduire l'expression de l'incrément de contrainte d'origine chimique qui s'écrit de la façon suivante :

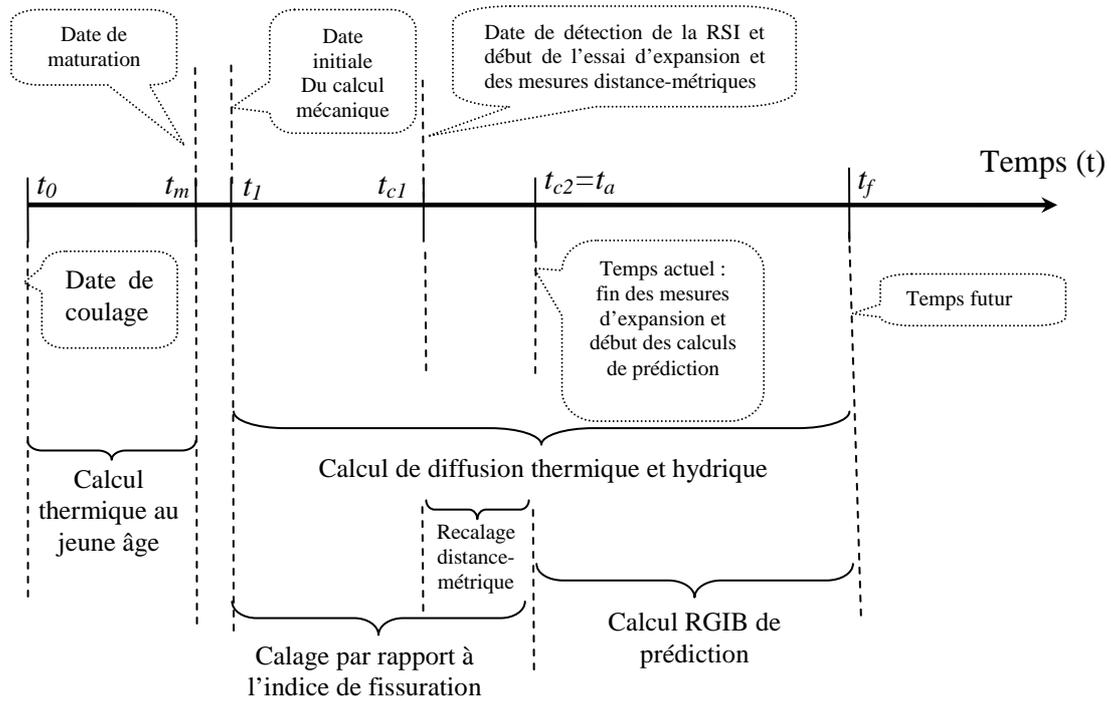
$$\underline{\underline{\Delta \sigma}}_X = \frac{E}{1 - \theta} \begin{pmatrix} \alpha_I \varepsilon_{oc} \Delta \xi(t) & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{II} \varepsilon_{oc} \Delta \xi(t) & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{III} \varepsilon_{oc} \Delta \xi(t) \end{pmatrix} \quad (6.13)$$

En tenant compte de l'endommagement du module d'Young en fonction du gonflement, on peut écrire l'incrément de contrainte totale $\underline{\underline{\Delta \sigma}}_{tot}$ dans le cas d'un comportement élastique comme suit :

$$\underline{\underline{\Delta \sigma}}_{tot} = \frac{E(\varepsilon_{oc} \Delta \xi(t))}{1 - \nu} (\underline{\underline{\Delta \varepsilon}}_{elas} + \underline{\underline{\Delta \varepsilon}}_X) \quad (6.14)$$

Le calcul s'effectue par itérations successives.

Vue que les échelles de temps sont différentes d'un calcul à un autre, on présent dans la figure 6-1 un organigramme qui récapitule les différentes dates du calcul.



Un organigramme récapitulant les différentes étapes du recalcul déjà citées est présenté dans la figure 6-2.

Calcul temporel au jeune âge

Calcul temporel de t_0 jusqu'à t_a ou t_f

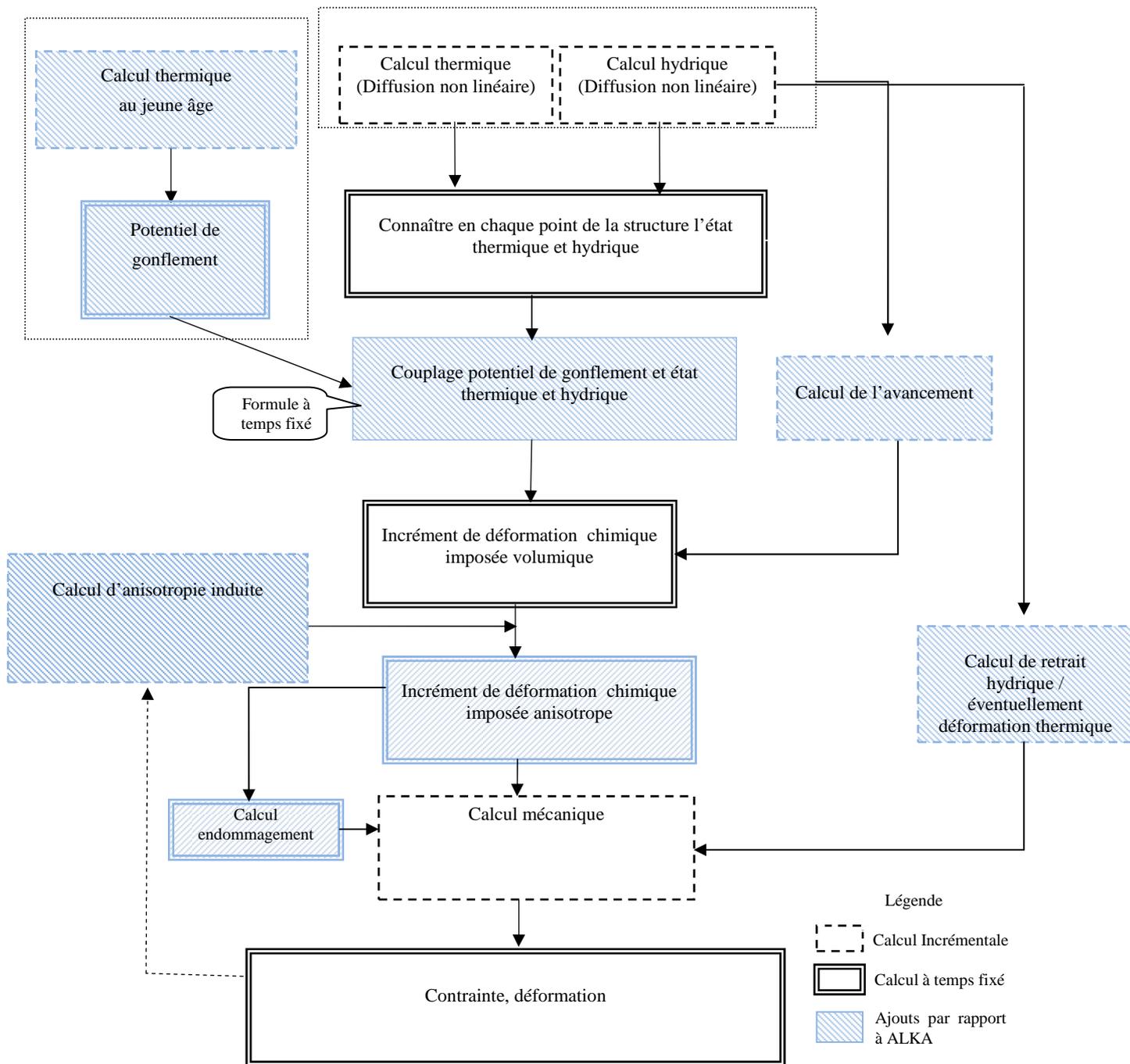


Figure 6.2 Organisation des calculs

Les différentes lois qui constituent le modèle ont été implémentées dans le code de calcul par éléments finis CESAR-LCPC, en respectant l'organisation présentée dans la figure 6-2. Ainsi, cette implémentation a permis de développer un module complémentaire dans CESAR-LCPC dédié au recalcul de structures atteintes de réactions de gonflement interne, module appelé RGIB.

V. Implémentation de la procédure de calcul dans CESAR-LCPC

CESAR-LCPC est un progiciel général de calcul, fondé sur la méthode des éléments finis, et disposant de ses propres fonctionnalités de pré et post traitement. Ce progiciel est particulièrement adapté à la résolution des problèmes du génie civil et de l'environnement :

calcul de structures, mécanique des sols et des roches, thermique, hydrogéologie, etc. (Humbert et al. 2005)

CESAR-LCPC désigne l'ensemble formé par le pré-processeur MAX ou CLEO, par le solveur CESAR regroupant l'ensemble des modules de calcul et par le post-processeur PEGGY ou CLEO (figure 6-3). Ces programmes manipulent un certain nombre de fichiers issus des données, du maillage et des résultats de calcul. Les développements effectués dans cette thèse ont été réalisés dans le solveur CESAR. D'éventuels compléments favorisant l'ergonomie de saisie des données et d'exploitation des résultats pourront être ultérieurement réalisés dans CLEO, le programme actuel fonctionnant moyennant des adaptations mineures selon la procédure dérivée de l'utilisation d'ALKA (Seignol et Dubouchet 2006)

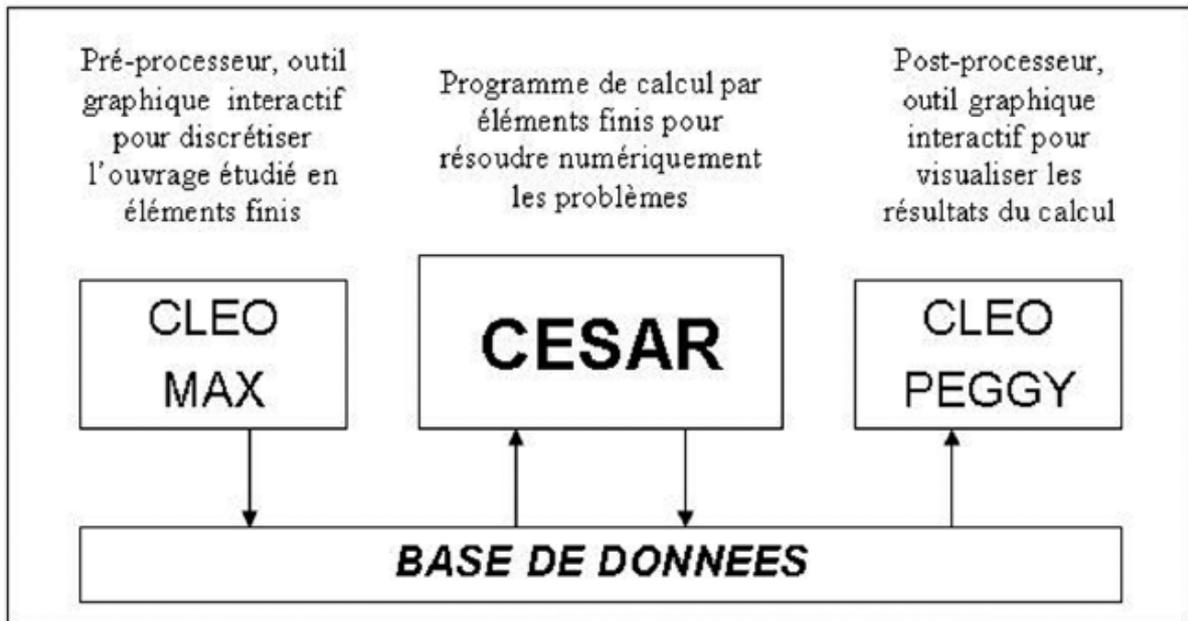


Figure 6.3 Organisation de CESAR-LCPC

Le solveur CESAR, comme la figure 6-3 l'illustre, assemble les modules de calcul spécifiques pour un type de problème à traiter : élasticité linéaire, élastoplasticité, élastoviscoplasticité, gonflement du béton induit par la RAS, dynamique, thermique transitoire, diffusion, consolidation, contact-impact unilatéral ... Ces modules comprennent des algorithmes adaptés au problème à résoudre.

Les développements réalisés au cours de cette thèse ont permis de constituer le module RGIB (Réaction de Gonflement Interne dans le Béton). Ce module est une évolution du module ALKA déjà existant qui concerne le recalcul des structures en béton atteint de RAS (Li et al. 2003) (Seignol et Dubouchet 2006). Le module RGIB permet de recalculer des structures atteintes de RSI ou de RAS.

Les développements du module RGIB obéissent à un cahier des charges bien précis (Baghdadi et al. 2008-c). Ce cahier des charges regroupe un ensemble de spécificités auxquelles le module doit répondre. Ces spécificités sont les suivantes :

- SP1-RGIB : L'évolution des gonflements au cours du temps doit être représentée par une loi d'avancement tenant compte d'une possible évolution asymptotique du gonflement en fin de réaction. Sous des conditions normalisées de température et d'humidité, ces évolutions sont modélisées par une loi sigmoïde déterminée à partir d'essais de gonflement libre sur éprouvettes et ajustée à l'aide de cinq paramètres : temps de latence, temps caractéristique, gonflement asymptotique et deux autres paramètres.

- SP2-RGIB : L'amplitude des gonflements imposés est dépendante de l'histoire thermique au jeune âge. Cela se traduit par un couplage entre le potentiel de gonflement d'une part, et l'histoire de la température du matériau au jeune âge d'autre part, selon la loi d'Arrhenius avec effet seuil.
- SP3-RGIB : La cinétique des gonflements imposés et aussi l'amplitude dépendent du degré de saturation du matériau, ce qui se traduit par une relation entre les temps de latence et caractéristique d'une part, le degré de saturation d'autre part, avec la saturation.
- SP4-RGIB : Les éléments de volume représentant le béton réactif doivent pouvoir être associés avec des éléments de barre élastoplastiques pour modéliser la présence et l'influence d'armatures.
- SP5-RGIB : Les modélisations doivent pouvoir être effectuées en 2D plan, 2D axisymétrique, 3D.
- SP6-RGIB : Les modélisations doivent pouvoir tenir compte de l'anisotropie intrinsèque du gonflement du béton.
- SP7-RGIB : Les modélisations doivent tenir compte de l'effet de la contrainte sur l'anisotropie du gonflement.
- SP8-RGIB : Les modélisations doivent tenir compte des déformations hydriques (retrait de séchage) en fonction du degré de saturation du milieu poreux.
- SP9-RGIB : Les modélisations doivent tenir compte de la baisse du module d'Young en fonction du gonflement d'origine chimique du béton réactif.

L'écriture de RGIB a tenu compte de ces différentes spécifications, des tests numériques ont été faits à fin de valider la programmation. Dans l'annexe 4 on présente le cas d'un tube épais atteint de RSI, les calculs de ce tube ont été faits dans trois configurations : contraintes planes, axisymétrie et trois dimensions et ont permis de valider notamment la spécification SP5 et la cohérence par rapport aux fonctionnalités actuelles (test de non régression) (Baghdadi et al 2008-c).

VI. Description des données

Vu que le nombre de paramètres de couplage est assez important et que le module est essentiellement destiné aux ingénieurs et aux gestionnaires, il est primordial de définir une structure d'entrée des données bien claire afin que le module soit compréhensible et utilisable par le plus large public possible.

Ainsi on a opté pour une programmation la plus flexible possible. Les données d'entrée sont saisies dans un fichier formaté appelé « jeu de données ». Ce jeu de données comprend plusieurs indices et mots clés. Ceci permet à l'utilisateur de choisir la loi de couplage qui va le mieux avec son problème et permet de réduire les erreurs dans le calcul vu qu'il y a une disjonction entre les différentes lois de couplage, ceci rend le module plus performant et aussi plus flexible ce qui rend la possibilité de résolution plus étendue.

Vu que le coulage de béton s'effectue le plus souvent sur des phases successives et vu que l'enchaînement de ces phases dans le temps influe d'une façon assez considérable sur l'histoire thermique au jeune âge de la structure, on a adapté la programmation du module RGIB à la lecture de plusieurs résultats de calcul thermique au jeune âge, ce qui couvre plus largement des problèmes qui peuvent être traités par le module RGIB. (adaptation RDTEXO) Dans l'annexe 3 on présente un exemple de jeu de données que l'utilisateur doit rentrer dans CESAR ainsi que la signification de chaque indice et la liste de paramètres associés.

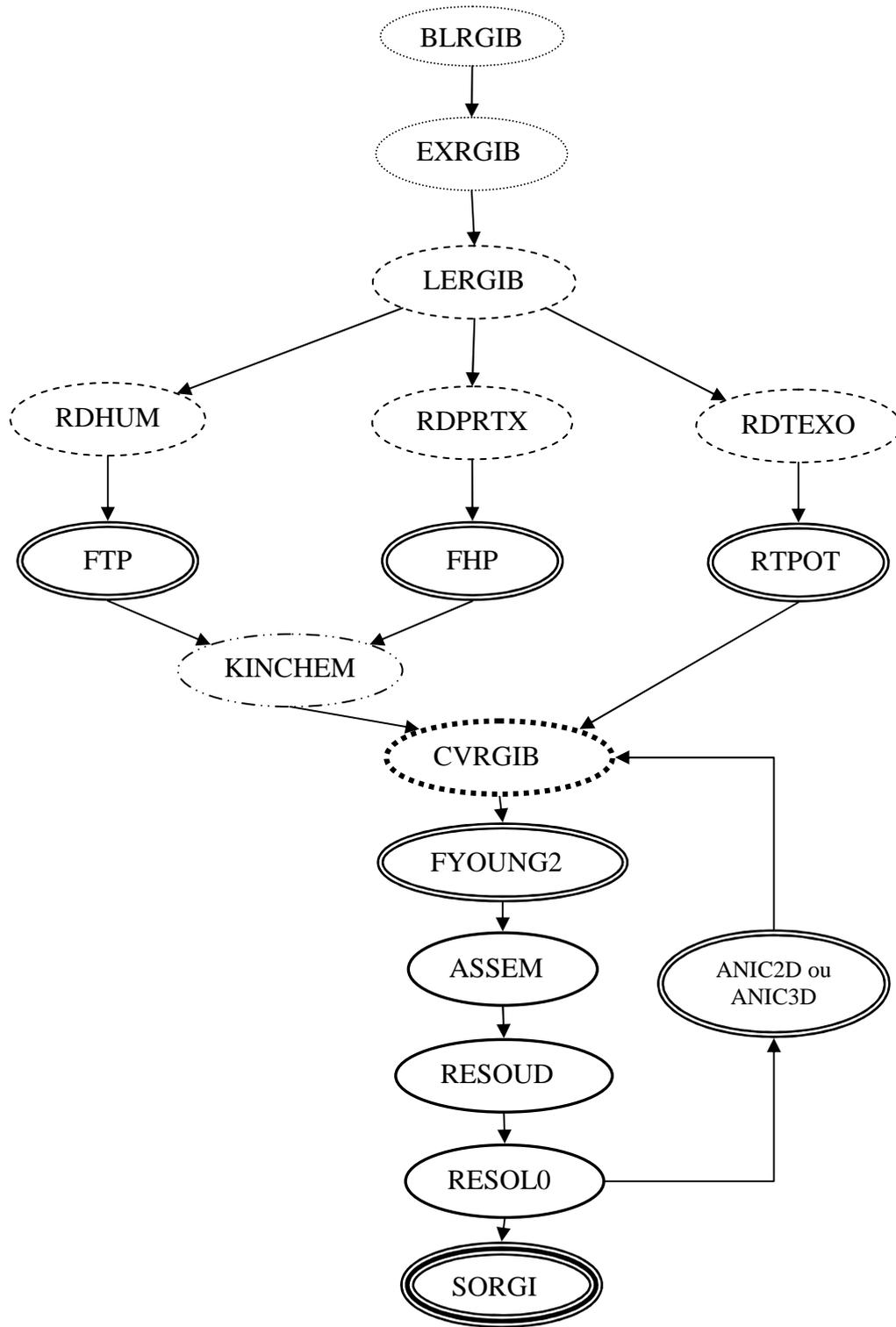
VII. Algorithme du module RGIB

Le module RGIB est programmé comme l'ensemble du code CESAR en FORTRAN 77. Il est divisé en plusieurs routines. Chaque routine a une fonction spécifique et des variables d'entrée et de sortie bien définies. On représente dans le tableau 6-1 les principales routines qui composent le module RGIB ainsi que leurs fonctions.

Routine	Fonction
BLRGIB	Initialisation des vecteurs Réservation d'espace
EXRGIB	Initialisation de paramètres Lecture de données
LERGIB	Lecture des données de RGIB
RDTEXO	Lecture des champs de température au jeune âge
RTPOTE	Construction d'un potentiel de gonflement
RDHUM	Lecture des champs de saturation
RDPRTX	Lecture des champs de température
FTP	Couplage avec la température
FHP	Couplage avec l'humidité
RTPOTE	Couplage avec la température au jeune âge
KINCHEM	Calcul de l'avancement chimique
ANIC2D ou ANIC3D	Couplage avec l'état de contrainte
CVRGIB	Calcul de la déformation chimique isotrope ou anisotrope
FYOUNG2	Fonction de calcul de la variable d'endommagement en fonction de la déformation chimique
ASSEM	Assemblage de la matrice de masse [M]
RESOUD	Triangulation de la matrice de rigidité [K]
RESOLO	Résolution de $[K]\{dU\}=\{R\}$
SORGIB	Impression du fichier résultats

Tableau 6-1 Ensemble des routines composant le module RGIB

En se basant sur la nomenclature des routines présentées dans le tableau 6-1, on présente dans la figure 6-4 un organigramme de la structure du module RGIB.



- | | |
|---|--|
|  Routine de lecture de données |  Routine de calcul de l'avancement |
|  Routine de loi de couplage |  Routine de la déformation et contrainte d'origine chimique |
|  Routine de calcul élément finis |  Routine d'impression des résultats |
|  Routine d'initialisation des vecteurs | |

VIII. Bilan

Dans le cadre de la méthodologie élaborée pour l'expertise des ouvrages en béton atteints de réaction de gonflement interne, on a présenté une méthode de recalcul d'ouvrage. Cette méthode consiste, à partir des informations recueillies sur la structure endommagée et d'éventuels essais complémentaires sur béton reconstitué, à calibrer les paramètres des lois qui constituent le modèle. Un algorithme de résolution a été conçu pour le recalcul de structures atteintes de RSI ou de RAS. On a implémenté cet algorithme dans le code de calcul CESAR-LCPC sous le nom RGIB, constituant un outil pour le recalcul de structures atteintes de RSI ou de RAS. Des tests numériques ont été faites à fin de vérifier la pertinence et la précision de cet outil (voir Annexe 4).

Ces tests sont de plusieurs ordres :

- Validation de cohérence avec l'état existant précédemment du module ALKA (test de non régression)
- Tests séparées des fonctionnalités explicitées dans le cahier des charges
- Calculs réalistes sur deux situations d'ouvrages, permettant une activation progressive des fonctionnalités. Ces calculs font l'objet des deux chapitres qui suivent.
- Test séparées de la programmation des lois de couplage permettant de vérifier que les données de calibration sont correctement re-simulées.
- Test de compatibilité du module avec les résultats des calculs thermique et hydrique dont il doit lire et utiliser les fichiers de sortie.

Dans l'état actuel, RGIB demande à être utilisé dans des situations variées et complexes pour vérifier plus complètement ses fonctionnalités. Parmi les choses à valider plus à fond on peut citer :

- La compatibilité du calcul avec les différentes lois de plasticité utilisables dans CESAR,
- La compatibilité du calcul avec les présences d'éléments de contact (fissures, joints),
- La prise en compte des déformations thermoélastiques,

Un développement est par ailleurs prévu prochainement pour tenir compte des déformations différées de type viscoélastique (fluage du béton).