5.32

SECURITE DES BARRAGES - AUSCULTATION
INTERPRETATION DES MESURES

Commentaires généraux

Dr. Ing. Giovanni Lombardi

LOMBARDI SA
INGENIEURS-CONSEILS

N.Réf.: 102.5-R-7A

Minusio, Juin 2001

TABLES DES MATIERES

A. GENERALITES

1. INTRODUCTION

De nombreux travaux ont été réalisés à ce jour dans le but d'interpréter correctement les mesures d'auscultations réalisées sur des barrages.

En vue de futurs développements dans la théorie et la pratique de la sécurité des ouvrages, il apparaît opportun, ou pour le moins avantageux, de systématiser quelque peu l'aspect théorique de la question. Un certain nombre de pratiques courantes établies coup sur coup semblent en effet être susceptibles d'améliorations et d'uniformisation. Il convient par ailleurs d'éviter autant que faire se peut les malentendus que l'on constate parfois.

Par simplicité d'exposé, les commentaires qui suivent font référence essentiellement aux ouvrages en béton, qui sont ceux qui se prêtent le mieux à l'analyse et à l'interprétation des mesures réalisées, encore que de nombreuses remarques s'appliquent également à d'autres types de barrages et à d'autres variables.
Les méthodes de calcul ne seront pas discutées, seules quelques fonctionnalités seront établies ou proposées.

2. BUT DE L'AUSCULTATION DES BARRAGES

L'auscultation des ouvrages peut avoir plusieurs buts. On se limitera dans ce qui suit aux questions liées à leur sécurité. De fait il s'agit de détecter et de mettre en évidence toute anomalie qui pourrait être le signe avant-coureur d'une défaillance de l'ouvrage.
Le résultat de l'interprétation sera d'autant plus favorable que :

- tout type d'anomalie (significative) de comportement sera appréhendée
- que la détection sera la plus précise, et
- qu'elle aura lieu le plus rapidement possible.

Comme anomalie il faut entendre:

- soit un "saut" brusque ou une discontinuité de la série de mesures, sans cause normale apparente,
- soit une dérive non prévue et plus au moins rapide; en pratique une évolution détectable d'une année aux suivantes.

L'explication de ces anomalies et les décisions à prendre le cas échéant ne sont pas l'objet de la présente étude car réservées de cas en cas, aux ingénieurs responsables.

Il convient toutefois d'ajouter que l'instrumentation et l'interprétation des mesures doivent être conçues de façon à rendre cette explication possible et aisée en cas de nécessité.

Il faut enfin souligner l'extrême importance de l'auscultation lors de situations exceptionnelles (Zeuzier, Ferden, Mactaquac, etc.). Elle dépasse même l'intérêt qu'elle présente lors d'une exploitation normale sans problèmes, étant entendu que les deux situations (ou périodes) sont indissociables.

3. PRINCIPES GENERAUX

Tout jugement de valeurs - ainsi celui sur la sécurité des barrages - se base sur une comparaison entre "observation" et "référentiel" ou bien entre comportement réel et comportement normal.

L'observation comprend entre autres les mesures d'auscultation, ainsi que les résultats des inspections.

Le référentiel est formé par les règles de l'art, les lois, les normes, les expériences faites et bien d'autres "informations" encore. Il représente ce qui est considéré normal ou acceptable aux yeux des responsables.

Dans le cas qui nous intéresse, il s'agit.

- dans une première phase de "construire" le référentiel (ou modèle prédicteur) spécifique à l'ouvrage étudié,
- dans une deuxième phase d'utiliser ledit modèle pour vérifier le comportement du barrage et décider s'il est sûr ou dangereux, et
- dans une troisième phase éventuelle, d'ajuster le système utilisé.

Ce procédé qui sera discuté par la suite peut être représenté par le schéma suivant.

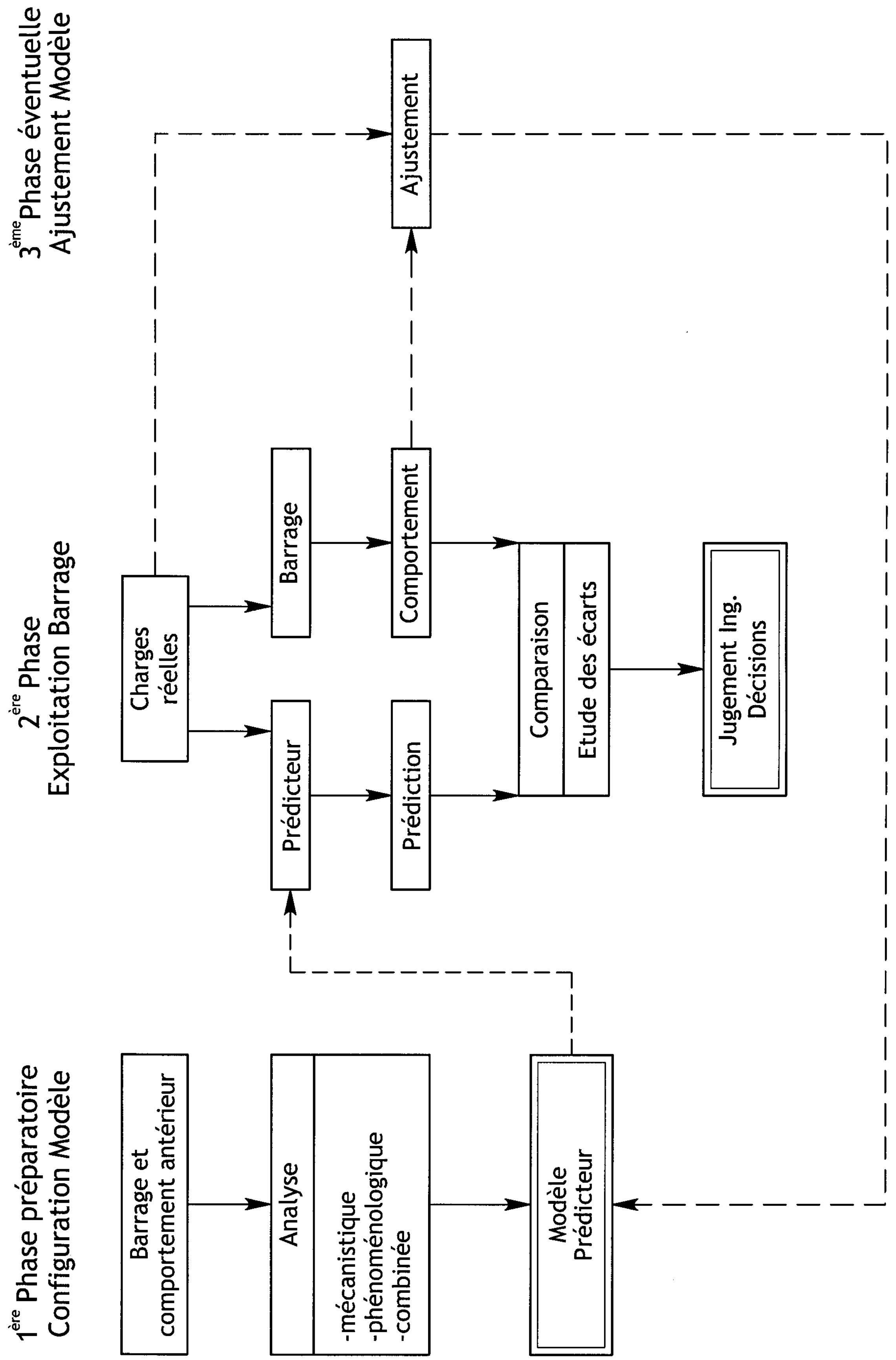

Schéma général de l'interprétation des mesures d'auscultation

4. BASES DE L'ANALYSE

Comme dit, l'analyse des données d'auscultation consiste toujours à comparer les résultats des mesures effectuées avec des valeurs théoriques, prédéterminées, prédites ou prévues et à étudier les écarts constatés entre les deux séries de valeurs. Cette comparaison s'effectue selon des critères à définir dans le but de déterminer si les écarts sont réels et significatifs et s'ils annoncent un comportement qui pourrait impliquer des dangers et risques pour l'ouvrage et partant pour les populations.

Ce faisant il est essentiel de garder toujours présent à l'esprit que le comportement du barrage est régi par des lois physiques bien réelles, même si parfois non entièrement connues ou comprises.

Dans le but de saisir les raisons profondes du comportement du barrage, il convient de procéder tout d'abord à une analyse mécanistique des phénomènes qui interviennent. Cela doit se faire même s'il ne sera pas toujours possible, pour des raisons pratiques ou des limitations numériques, d'exploiter réellement toutes les potentialités que la méthode offre.
En réalité il s'agit de "construire" un modèle représentant l'essence du comportement du barrage et donc un modèle "prédicteur" à partir des lois de la physique connues des ingénieurs.

En suivant on exposera le cheminement phénoménologique.

Il faut garder présent à l'esprit le fait qu'une analyse basée uniquement sur des algorithmes mathématiques sans référence aux réalités sous-jacentes risque fort de cacher certains aspects du problème et de fausser les conclusions qui peuvent en être déduites.

Il faut de toute façon éviter que l'analyse ne se réduise à une simple jonglerie de nombres ainsi que cela a malheureusement pu être constaté parfois. Quoi qu'il en soit et quelle que soit sa base, tout "prédicteur" du comportement de barrage ne peut fournir qu'une image plus au moins approximative de la réalité. Au moins doit-il se baser autant que possible sur la réalité physique, ce qui est gage d'un fonctionnement raisonnable même dans des conditions exceptionnelles ou simplement rares, qui ne se sont pas encore présentées pour l'ouvrage en question, en permettant des extrapolations fiables.

5. PRINCIPALES QUESTIONS

L'expérience enseigne que lors d'une étude de ce genre un certain nombre de questions se présentent auxquelles il faut tâcher de répondre de la façon la plus précise et sure possible. Ces questions seront examinées par la suite.

Pour éviter une présentation par trop abstraite on fera référence seulement à l'analyse des déplacements de points du barrage, restant entendu que des considérations similaires peuvent s'appliquer aussi à d'autres variables.

Les questions relatives à la relation "réalité mesurée"/"comportement prédit" sont essentiellement les suivantes:

a) Le comportement observé avait-il été prévu, était-il prévisible? Le "prédicteur" en tenait-il compte?

b) Quelle est la part du phénomène qui était prévisible et quelle est la part qui excède la prévision ou la prévisibilité?

c) Le comportement observé pouvait-il être déterminé a priori ou seulement a posteriori?

d) Le comportement observé est-il explicable par une somme de fonctions d'une seule variable chacune ou non? En d'autres termes le phénomène est-il redevable d'un système d'équations linéaires? La tendance naturelle est de penser que cela est le cas; mais de fait il existe de nombreuses exceptions. (La tendance en question est fondamentalement l'héritage de la notion d'élasticité linéaire réversible qui permet la superposition des causes et des effets, c.à.d. des déformations dues à divers cas de charge.)

e) Les fonctions de plusieurs variables (ou arguments) peuvent-elles être ignorées? Ou bien faut-il faire recours à des systèmes non-linéaires bien plus complexes et à un calcul sans doutes plus lourd; ceci en fonction aussi de la précision recherchée.

f) Comment distinguer de façon univoque la part réversible de la part irréversible? et de manière semblable les effets retardés des effets instantanés? Selon le point de vue auquel on se place les résultats peuvent être différents.

g) La base de référence, c'est-à-dire le prédicteur, doit-il être fixe pour toute la durée de vie de l'ouvrage ou bien être adapté en certains intervalles de temps ou même continuellement?
Cela revient à décider quelle part des écarts constatés doit être intégrée dans le "prédicteur" et quelle part doit être analysée comme "résidu" pour son propre compte.
La première approche peut conduire à intégrer les erreurs de mesure dans le "prédicteur", la seconde à les conserver comme faisant partie des résidus.

h) Une question importante est toutefois celle de savoir si la mesure doit être analysée telle que disponible ou bien s'il n'est pas plus avantageux d'étudier une fonction ou une transformée (par exemple Laplacienne) de ladite valeur.

i) L'approche ou le type d'analyse doit-elle et peut-elle être "mécanistique" (c'est-à-dire construite a priori) ou bien peut-elle être "phénoménologique" (c'est-à-dire expliquée a posteriori)? Le cas échéant quelle combinaison des deux approches est optimale?

B. ETUDE MECANISTIQUE

6. FORMULATION GENERALE

Avec l'intention de fournir des éléments de réponse aux questions mentionnées (et à d'autres encore) on propose une analyse théorique générale du problème des déformations d'un barrage en béton. On envisage une formulation générale du problème en suivant d'abord une approche mécanistique. Cette systématisation sera présentée sous forme symboliquement vectorielle. Les composantes de chaque vecteur sont des valeurs de même nature, mais référées à des endroits différents de l'ouvrage, de sa fondation et de son environnement.

L'espace multidimensionnel de référence est donc représenté par l'ensemble des "points" du volume du barrage et de sa fondation, ainsi que des axes cartésiens associés dans lesquels une grandeur physique de valeur scalaire définie est mesurée ou supposée exister. De fait, les "points" en question peuvent être en pratique des points réels ou bien, des éléments finis de courbes, de surface ou de volume.
On définit alors les notations vectorielles suivantes qui pourraient aussi être conçues chacune comme un ensemble (et gérées par une écriture propre à la théorie des ensembles; peut être même des ensembles vagues).
Chaque vecteur s'entend varier en fonction du temps. A chaque fois il représente les valeurs de l'instant considéré.

$\vec{\upsilon}$ = vecteur de toutes les déformations mesurées dans le barrage

$$\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_x + \vec{\upsilon}_y + \vec{\upsilon}_z$$

$\vec{\varepsilon}$ = vecteur ou ensemble des dilatations de chaque élément du barrage et de sa fondation $\vec{\varepsilon} = \vec{\varepsilon}_x + \vec{\varepsilon}_y + \vec{\varepsilon}_z$ (peut comprendre l'ouverture de joints et fissures).

$\vec{T}_i$ = ensemble (ou vecteur) des températures internes du béton.

$\vec{T}_e$ = ensemble des températures externes (air, eau, amont, aval, incluant aussi la radiation solaire).

$\vec{p}$ = ensemble des pressions interstitielles dans les différents points de la fondation (et éventuellement du barrage).

$\vec{h}$ = ensemble des niveaux d'eau (amont et aval). Le vecteur dégénère souvent en une valeur scalaire h correspond au niveau de la retenue

$F(\vec{x})$ = série des fonctions qui régissent chaque composante x_i du vecteur $\vec{x} = \vec{x}_1, \vec{x}_2, \ldots \vec{x}_i, \ldots \vec{x}_n$ au même instant; idem pour G (..), H (..), etc.

I (..) = fonction de forme intégrale incluant des valeurs de dates différentes, idem J (..), K (..), etc.

D (..) = fonction différée

T(x) = transformée de x

t = variable de temps dont l'origine et l'échelle sont convenablement choisies

s = variable de temps à période annuelle

Note: sans le signe $\rightarrow$, tout symbole indique un simple élément ou composante du vecteur.

A partir de ces notations (auxquelles peuvent s'en ajouter d'autres) on peut établir les relations symboliques suivantes:

$$\vec{\upsilon} = F(\vec{\varepsilon}) \qquad [1]$$

les déformations de l'ouvrage en chaque point considéré sont la conséquence des dilatations qui se produisent dans la totalité des éléments de volume du barrage et de la fondation à un instant donné.

Avec:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\eta(\sigma_2 + \sigma_3)}{E} + \omega \cdot T_i + \frac{p}{Mp} + \varepsilon_d \qquad [2]$$

La dilatation ε de la matière en un point et une direction donnés comprend:

- la déformation élastique due aux contraintes (E = module élastique)
- effet thermique (températures internes)
- l'effet de la pression interstitielle (surtout dans les fondations avec Mp = module de déformation pour variation de la pression), et
- des dilations diverses (par exemple non linéarité, fluage, gonflement, réaction alcali-agrégats, ouvertures de joints ou fissures, etc.).

(De fait E, Mp etc. sont aussi des vecteurs car variables d'un point à l'autre du barrage).

On peut alors écrire:

$$\vec{\upsilon} = F_1(\vec{\sigma}) + F_2(\vec{T}_i) + F_3(\vec{p}) + F_4(\vec{\varepsilon}_d) \qquad [3]$$

Si l'on admet que les contraintes sont dues aux niveaux de l'eau amont et aval ainsi qu'aux effets thermiques et aux pressions interstitielles soit

$$\vec{\sigma} = H(\vec{h}, \vec{T}_i, \vec{p}) \qquad [4]$$

on obtient

$$\vec{\upsilon} = G_1(\vec{h}, \vec{T}_i, \vec{p}) + F_2(\vec{T}_i) + F_3(\vec{p}) + F_4(\vec{\varepsilon}_d) \qquad [5]$$

En fonction de la linéarité élastique (admise pour le béton et la fondation) on obtient

$$\vec{\upsilon} = G_2(\vec{h}) + G_3(\vec{T}_i) + G_4(\vec{p}) + F_4(\vec{\varepsilon}_d) \qquad [6]$$

En principe les trois premiers termes de cette équation sont fonction d'une seule variable chacun et de ce fait le système des équations à résoudre serait linéaire. Par contre le quatrième terme peut compliquer singulièrement le problème car fonction de plusieurs variables. On y reviendra par la suite.

L'effet thermique mérite d'abord quelque considération particulière. Il est exemplaire pour ce qui est des dilatations en général.

7. EFFETS THERMIQUES

On peut envisager de prendre en compte comme variables indépendantes les températures extérieures (mesurées en un nombre suffisant de points) au lieu de températures internes du barrage c'est-à-dire celles du béton.
Il est clair que la cause des températures internes est diverse. Au début de la vie de l'ouvrage intervient la chaleur endogène d'hydratation. Quand celle-ci a épuisé ses effets, ce ne sont plus que les températures externes qui exercent leur effet, outre leur répartition sur les parements qui est évidemment influencée par les niveaux d'eau.
De fait la réalité physique qui régit le phénomène et qui justifie toute formulation mathématique adéquate est la suivante

$$T_i = I(\vec{T}_e, \vec{h}) \qquad [7]$$

où la fonction "I" est une fonction intégrale dans laquelle interviennent (en principe) toutes les températures extérieures et les niveaux d'eau durant une longue période de temps passé. En effet les températures internes sont déterminées par celles des parements c'est-à-dire aussi par les niveaux d'eau.
Une relation intégrale de ce type avait été par exemple utilisée lors de la réparation du barrage de Zeuzier pour compenser le manque de thermomètres internes ou leur fonctionnement incertain.

La prise en compte de toute fonction intégrale introduit un lissage des valeurs ainsi qu'un retard de l'effet sur la ou les causes et donc une réaction différée. Ainsi le

barrage en béton réagit par ses déformations d'une façon instantanée aux températures internes, mais d'une façon retardée ou différée aux températures externes. Le retard de la réaction est dû à la loi de la conduction thermique et est essentiellement une fonction de l'épaisseur du "mur" à l'endroit considéré.
Ceci s'exprime, pour ce qui concerne les déformations d'origine thermique, par

$$\vec{\upsilon}_{th} = \vec{F}(\vec{T}_i) = F\left(I(\vec{T}_e, \vec{h})\right) = D(\vec{T}_e, \vec{h}) \qquad [8]$$

La référence aux températures internes permet la définition directe de l'effet thermique alors que la référence aux températures extérieures et aux niveaux d'eau demande une intégration (à laquelle le barrage procède de toute façon automatiquement) qui implique la connaissance de toutes les valeurs précédentes.
L'analyse phénoménologique peut en outre rencontrer des difficultés si les variables $\vec{T}_e$ et $\vec{h}$, normalement synchrones (pendant l'année), devaient exceptionnellement cesser de l'être.

L'effet thermique est souvent approché par une fonction harmonique à période annuelle et semestrielle qui représente les deux premiers termes d'une analyse de Fourrier c'est-à-dire par

$$f(t) = a \cdot \sin s + b \cdot \cos s + c \cdot \sin 2s + d \cdot \cos 2s \qquad [9]$$

où $s = \frac{2\pi \cdot (t - t_o)}{365}$ avec

t_o origine du temps considéré, et
t temps en jours
ou bien, ce qui est équivalent, par

$$f(t) = a \cdot \sin(s - \alpha) + b \cdot \sin(2s - \beta) \qquad [10]$$

en définissant:
a et b = semi-amplitudes, et
α et β = déphasages (fonctions de l'épaisseur du "mur")

Il va de soi que cette approche "statistique" introduit une imprécision qui est

$$\Delta\upsilon = F(\vec{T}_i) - f(t) = F\left(I(\vec{T}_e, \vec{h})\right) - f(t) \qquad [11]$$

qui peut être significative et qui dépend de "l'épaisseur du mur". En particulier cette approche statistique suppose une variation cyclique des conditions thermiques et d'exploitation identiques d'année en année en ignorant donc les variations de ces "causes" d'une année à l'autre.

8. EFFETS THERMIQUES INITIAUX

A coté des variations thermiques réputées "cycliques" il convient de tenir compte de l'effet thermique dû à la température initiale, qui n'a pas rejoint encore son équilibre cyclique. Ce phénomène est automatiquement pris en compte si l'interprétation des déformations se fait sur la base des températures internes.
D'un point de vue plus global on peut envisager de représenter ce phénomène par une fonction du temps qui soit exponentielle, à exposant négatif. Elle prend avantageusement la forme suivante.

$$\upsilon = a \cdot (1 - e^{-kt}) \qquad [12]$$

où "a" est "l'amplitude" c'est-à-dire l'importance finale du phénomène et "k" détermine la rapidité des déformations qui est elle-même fonction de l'épaisseur du mur (à condition, bien entendu, que d'autres facteurs n'interviennent pas et que le "refroidissement" total n'ait pas eu lieu par exemple avant le clavage des joints d'un barrage voûte).

9. GONFLEMENT DU BETON

Le problème du gonflement du béton - dû par exemple à une réaction alcali-agrégats - est bien plus complexe que celui des effets thermiques.
Il est admis dans la technique des barrages qu'un phénomène de ce type est le résultat d'une mauvaise conception de l'ouvrage (ou de moins de son béton). On ne saurait donc l'inclure a priori dans une quelconque prévision, mais seulement le constater a posteriori sur la base d'une analyse phénoménologique. Il est néanmoins utile d'en connaître le mécanisme.
On peut symboliquement définir, d'une façon simplifiée, la dilatation correspondante du béton en une certaine direction d'un point donné par

$$\varepsilon_i = J\,(\sigma_i, \sigma_j, \sigma_h, w, T_i) \qquad [13]$$

Il s'agit bien entendu d'une fonction intégrale.
En raison de l'anisotropie du phénomène l'état complet des contraintes intervient (et non seulement la contrainte correspondante). Le phénomène est conditionné par la présence d'eau (donc par l'état hydrométrique "w") et influencé entre autre par la température du béton (T_i).
L'apport d'eau nécessaire à la réaction se fait en fonction du niveau de la retenue, du champs des écoulements dans toute la masse, c'est-à-dire des perméabilités, des fissures et des joints plus au moins perméables. La vitesse de réaction est influencée aussi par la diffusion fine de l'humidité et même de la vapeur d'eau dans la masse de béton.
Les volumes d'eaux absorbées par une certaine masse de béton (à l'amont) peuvent manquer à d'autres masses (à l'aval) ce qui en réduit l'expansion et crée des tractions (par exemple barrage N'Zilo, Zaïre). Selon le cas interviennent également d'autres facteurs comme la composition des agrégats et leur distribution granulométrique et même leur forme, ainsi que l'intensité de compactation du béton, sa perméabilité et sa porosité.
Les perméabilités du béton varient par ailleurs continuellement en fonction de l'évolution de la réaction.

Le phénomène est en outre implicite puisque:

$$\vec{\varepsilon} = F(\vec{\sigma}, \ldots.) \text{ et}$$

$$\vec{\sigma} = G(\vec{\varepsilon}, \ldots.) \qquad [14]$$

avec pour finalité celle de respecter les conditions de compatibilité externes (par rapport aux massifs rocheux d'appui) et internes (par rapport aux différentiels de gonflement d'une partie de l'ouvrage à l'autre).

Ainsi que dit, on ne saurait constater le phénomène du gonflement alcali-agrégats qu'a posteriori, et en extrapoler l'évolution à brève durée sur la base des constatations faites précédemment.
Localement le gonflement a lieu d'une façon irrégulière. Une forte compensation de ces irrégularités se constate toutefois si l'on prend en compte une masse plus importante de béton ou même tout le barrage, et cela grâce à la loi des grands nombres.

On peut s'imaginer que globalement le phénomène puisse être représenté approximativement par une exponentielle à exposant négatif du type déjà signalé

$$\upsilon = a \cdot (1 - e^{-kt}) \qquad [15]$$

où "a" représente "l'amplitude" finale du gonflement et "k" en détermine la vitesse (initiale).

La forme plus complexe à quatre paramètres (a, b, k, l) qui s'exprime par:

$$\upsilon = a \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) + b \cdot (1 - e^{-l \cdot t}) \qquad [16]$$

permet de simuler toute une série de phénomènes à allure transitoire qui tendent asymptotiquement vers une limite (fonctions de type sigmoïde, onde transitoire, etc.).

10. VARIATION DU MODULE D'ELASTICITE ET FLUAGE

Sans entrer dans le détail, on peut concevoir que l'augmentation du module d'élasticité avec l'âge du béton ainsi que les phénomènes de fluage (du béton et de la fondation avec des déformations différées qu'ils entraînent) sont redevables de fonctions du type de celles qui viennent d'être signalées.

Ces formes mathématiques - relativement complexes - ne se prêtent évidemment pas à optimalisation dans le cadre d'un système d'équations linéaires, et l'on doit faire recours à d'autres procédures de calcul.

11. EFFETS RETARD

Ce qui précède permet de mettre en évidence que les phénomènes différés réels dépendent de lois physiques ou chimiques précises qui font intervenir le temps.

Il s'agit par exemple de:

- la loi de la conduction thermique,
- la loi de la diffusion de la vapeur,
- les lois de la viscosité des écoulements de l'eau (par exemple tassements de remblais),
- les lois du fluage (par exemple du béton),
- les lois régissant les réactions chimiques (par exemple alcali-agrégats).

L'effet de ces retards peut être parfois compensé par le choix adéquat des variables de référence (par exemple températures internes plutôt que températures externes; pressions interstitielles effectives plutôt que conditions qui causent de l'écoulement hydraulique, etc.).

C. ANALYSE PHENOMENOLOGIQUE

12. METHODE STATISTIQUE

A strictement parler, le cheminement phénoménologique consiste à observer un phénomène et à essayer d'en donner une représentation mathématique sans faire référence à aucune des lois physiques sous-jacentes supposées non connues. On opère de fait sur des nombres sans se demander quelle peut être leur signification réelle. On peut même ignorer leurs unités. La nature de l'analyse est donc purement mathématique avec les avantages de calcul et les inconvénients de compréhension que cela comporte.

L'expérience enseigne par contre qu'il est toujours très avantageux de choisir des formes qui s'apparentent à celles qui ressortent de l'analyse mécanistique quitte à introduire des facteurs multiplicatifs ou correctifs adéquats.
Il va de soi que la méthode tend à simplifier les études et les calculs en profitant des résultats de l'analyse mécanistique sans devoir en supporter le poids dans chaque cas particulier.
L'imprécision inhérente au système et son impossibilité à représenter certains phénomènes en réduisent l'efficacité et le condamnent à accepter un nombre de limitations. A cela s'ajoute la tendance à simplifier les formes mathématiques, ce qui conduit à des marges d'imprécision supplémentaires.

13. FORMES MATHEMATIQUES "NATURELLES"

On peut appeler formes (élémentaires) naturelles les formes qui ressortent de l'analyse mécanistique des phénomènes et qui ont donc une base physique substantielle. Par ailleurs, certaines formes sont utilisées traditionnellement et il n'y a pas de raison impérieuse de s'en écarter.
Ainsi il est souvent acceptable de simuler la déformation dans la direction horizontale d'un point du barrage en une certaine direction par un développement polynomial du niveau de la retenue soit:

$$\upsilon_h = a_1 + a_2 \cdot h + a_3 \cdot h^2 + a_4 \cdot h^3 + a_5 \cdot h^4 + ... \qquad [17]$$

sans que le degrés du polynôme puisse être fixé a priori. Ce degré dépend du type de l'ouvrage et de la précision requise.

L'effet thermique réversible peut facilement être indiqué en fonction des températures internes par

$$\upsilon_{th} = \sum_n a_i \cdot T_i \qquad [18]$$

où toutes les températures internes sont considérées avoir une influence linéaire et agir instantanément.
L'usage des températures externes - aux quelles on fait parfois recours faute de disposer des températures internes (ou pour éviter les calculs d'intégration nécessaires à déterminer les coefficients d'influence) introduisent les imprécisions dont on a dit.
Bien souvent on introduit des fonctions saisonnières qui augmentent encore l'imprécision du prédicteur, car en se basant sur les températures moyennes, elles ignorent les variations inter-annuelles.
Le procédé peut être licite pour les barrages épais peu sensibles aux variations thermiques, mais ne semble pas acceptable par exemple pour les barrages en voûte minces.
En réalité, on prend en compte seulement les premiers termes d'une analyse de Fourier des températures moyennes.

$$\upsilon_{th} = a_1 \cdot \sin s + a_2 \cdot \cos s + a_3 \cdot \sin 2\,s + a_4 \cdot \cos 2\,s \qquad [19]$$

(Note: il est certainement préférable d'utiliser la fonction sin 2 s plutôt que $\sin^2 s$ car il s'agit d'une fonction qui s'avère plus "orthogonale" lors des développements

successifs. On pourrait aussi employer ($\sin^2 s - 0.5$)). Par ailleurs, on ne saurait employer le terme sin 2 s seul, c'est-à-dire sans le cos 2 s, car alors le résultat dépendrait de la date de commencement de l'année hydrologique (par exemple 1er janvier, 1er septembre, etc.).
Toutefois même dans ce cas il n'est pas toujours suffisant de s'arrêter à ces seuls premiers 4 termes (par exemple pour les barrages dans les tropiques).

Il est souvent nécessaire de prendre en compte des effets non réversibles en fonction du temps. Les fonctions du type $\upsilon = a \cdot (1 - e^{-k \cdot s})$ se prêtent le mieux à cet effet, même si elles ne représentent évidemment qu'une simple approximation d'une réalité fort complexe.

Tout effet non réversible peut se développer par une série "d'exponentielles à exposant négatif" similaire - en quelque sorte - à une série de Fourrier.
On obtient ainsi la formulation "naturelle" suivante

$$\begin{aligned}\upsilon = {} & a_1 + a_2 \cdot h + a_3 \cdot h^2 + a_4 \cdot h^3 + \ldots \\ & + b_1 \cdot \sin s + b_2 \cdot \cos s + b_3 \cdot \sin 2s + b_4 \cdot \cos 2s + \ldots \\ & + c_1 \cdot (1 - e^{-d1 \cdot t}) + c_2 \cdot (1 - e^{-d2 \cdot t}) + c_3 \cdot (1 - e^{-d3 \cdot t}) + \ldots \qquad [20]\end{aligned}$$

qui est proposée pour l'analyse, si l'on peut négliger certains effets comme ceux de la pression interstitielle dans le massif de fondation.

14. EXPLOITATION DE DERIVES

Le principe de tout procédé "prédicteur" est de mettre en évidence deux types de phénomènes:

- les écarts imprévus par rapports à ce qui est considéré "cyclique" ou réversible au cours de l'année, ainsi que
- les "tendances", dérives ou évolutions lentes par rapport à ce qui est considéré normal.

Cette dernière facette consiste à "extrapoler" le passé vers le futur et présente de ce fait quelques risques.

La question de base se pose d'abord à savoir si les dérives doivent être inclues dans la "prédiction" ou bien prises en évidence lors de l'étude des "écarts", ainsi qu'indiqué ci-après.

Si l'on considère que les "dérives" en question sont en général l'expression d'une pathologie du béton, qui par définition représente une déviance par rapport à l'intention initiale du projeteur, on peut conclure qu'il convient d'en étudier la nature et l'importance dans le cadre de l'analyse et de l'interprétation des "résidus" (ou écarts).
Par contre des phénomènes "normaux" tels l'effet de refroidissement du béton ou l'augmentation du module d'élasticité - qui sont eux prévisibles au moins jusqu'à un certain point - peuvent être inclus dans le "prédicteur". De toute façon, il s'agit des phénomènes dont les conséquences s'épuisent assez rapidement et qui sont avantageusement simulées par des exponentielles à exposant négatif.

Les fonctions qui ne comportent pas une borne supérieure (par exemple $e^{+k \cdot t}$, $\ln(t)$, t, t^n, etc.) sont à proscrire car elles incorporent dans le prédicteur des déformations sans limite (et donc même la défaillance) dans ce qui devrait être considéré le comportement normal de l'ouvrage (on peut alors parler de "termes explosifs"). Dans la meilleure des hypothèses ils rendent le modèle éphémère et rapidement caduc.

Il convient d'ajouter que par exemple le gonflement du béton par réaction alcali-agrégats même si détecté n'est guère prévisible dans son développement. On connaît des cas où il est arrivé rapidement à épuisement, et d'autres où il continue de façon apparemment linéaire. Une réaction "exponentielle" ne semble de fait correspondre tout au plus qu'à une période initiale de durée limitée dans laquelle le phénomène se "met en place".

Dans la plupart des cas la base de données disponible concerne une période de durée limitée, ce qui rend aléatoire l'approche "statistique" - et donc l'exploitation à long terme - de phénomènes qui par définition sont de longue ou même de très longue durée.

Sans doute il faut se résigner à une étude a posteriori de telles déviances.

15. SYSTEME D'EQUATIONS LINEAIRES

Il est d'usage de rechercher un système d'équations linéaires dans le but de déterminer les coefficients d'influence a_1, b_i, c_i, ... à l'aide des méthodes mathématiques usuelles.

Ceci n'est pas possible avec la forme précédente [20] car les termes relatifs aux effets non-réversibles contiennent chacun deux coefficients, c'est-à-dire deux inconnues. La résolution de ce système est cependant possible en utilisant des méthodes particulières adaptées.

Toutefois, au moins deux autres voies peuvent être explorées.

La première consiste à définir préalablement les coefficients des exposants sur la base de considérations mécanistiques. La deuxième à multiplier le nombre des fonctions avec coefficients fixes de l'exposant (de façon similaire à ce qui se fait avec la série de Fourier). On aurait ainsi:

$$\begin{aligned} \upsilon = {} & a_1 + a_2 \cdot h + \dots \\ & + b_1 \cdot \sin s + \dots \\ & + c_1 \cdot (1 - e^{-t}) + c_2 \cdot (1 - e^{-2t}) + c_3 \cdot (1 - e^{-3t}) + c_4 \cdot (1 - e^{-4t}) + \dots \end{aligned} \quad [21]$$

où l'unité des temps "t" est adéquatement choisie.

Le système devient alors linéaire, mais évidemment avec un nombre plus élevé de coefficients inconnus.

D. ANALYSES DES ECARTS

16. EN GENERAL

Ainsi que déjà signalé il y aura toujours des écarts à prendre en compte lors de la comparaison des mesures avec la "prévision".

En réalité ladite prévision, n'est souvent qu'une extrapolation ou approximation qu'il convient d'améliorer dans la mesure du possible pour réduire les écarts sans jamais pouvoir les éliminer totalement.

Lors de l'étude (et de la réduction) des écarts un nombre de questions surgissent. Quelques-unes seront examinées ci-après.

17. L'OBJET DE LA COMPARAISON

Il est d'usage de baser la comparaison sur une seule valeur à la fois, par exemple sur la déformation radiale en un point donné du barrage.

On peut se demander s'il n'y aurait pas intérêt, du moins en certaines circonstances, à comparer une combinaison de valeurs mesurées à une combinaison de valeurs prédites, par exemple:

$$\upsilon = a_1 \cdot \upsilon_1 + a_2 \cdot \upsilon_2 + a_3 \cdot \upsilon_3 + \ldots \qquad [22]$$

qui pourrait représenter la déformation moyenne (pondérée) des mesures effectuées dans une région du barrage (par exemple la zone centrale).

Par la formation d'une telle "valeur globale" on réduirait l'incidence des inévitables erreurs de mesure. Ou bien

$$\upsilon = \upsilon_g - \upsilon_d \qquad [23]$$

qui mettrait éventuellement en évidence une dissymétrie de comportement entre la rive gauche et la rive droite. Ou bien encore:

$$\upsilon = \sqrt{\upsilon^2{}_{rad} + \upsilon^2{}_{tg}} \qquad [24]$$

qui ferait référence à la déformation totale "scalaire" plutôt qu'à chacune de ses deux composantes. On peut aussi penser qu'une fonction de la variable serait plus significative que la variable elle-même.

$$\Sigma\upsilon^2 \qquad [25]$$

pourrait assumer par exemple une certaine signification en tant que mesure de l'énergie élastique accumulée dans l'ouvrage et être mise en relation avec:

$$\Sigma\, z \cdot S \cdot \upsilon_r \qquad [26]$$

qui représente le travail fournit par la pression hydrostatique, où

z = profondeur sous le niveau, et

S = élément de surface du parement

υ_r = déformation dans la direction de la pression d'eau

Les considérations précédentes se basent sur l'idée générale qu'un indicateur "global" de comportement est, ou peut être, plus significatif pour la sécurité de l'ouvrage qu'un indicateur "local" (par exemple déformations de l'ensemble plutôt que contraintes locales, combinaison de mesures plutôt que mesures isolées).

18. TRANSFORMEE DE LA VARIABLE

On peut concevoir aussi que l'objet de la comparaison soit une transformée de la variable plutôt que la variable elle-même. Une possibilité pourrait être par exemple celle de mettre en relation une transformée du niveau de la retenue avec une transformée de la déformation.
Ainsi au lieu de l'écart

$$\upsilon - f(h) \qquad [27]$$

on aurait à considérer l'écart

$$T\,(\upsilon_{1,}\, p_1) - T\,\left(f(h)\cdot\, p_2\right) \qquad [28]$$

où T pourrait être par exemple une transformée de Laplace et p_1, p_2 deux paramètres de la transformation (avec possibilité, mais non obligation de $p_1 = p_2$).

Une telle relation de type intégral tiendrait compte non seulement des valeurs instantanées parfois aléatoires, mais aussi de leur "histoire" récente. Ce procédé permettrait probablement la prise en compte de certains effets "retard" comme le fluage du béton, et cela sans présenter les inconvénients des opérations du type "moyenne glissante" tout en permettant un certain lissage qui atténuerait les effets des inévitables erreurs de mesure.

Il se pourrait qu'une certaine transformée des températures externes puisse aider à mieux interpréter les déformations d'origine thermique car elle pourrait simuler - au moins d'une manière approchée - les températures internes du barrage, qui déterminent réellement ces déformations.

19. PONDERATION DES ECARTS

Une question qui mérite attention est celle de la pondération des écarts dans le but d'obtenir un certain "écart-moyen" dit dans certaines circonstances "écart-type".

Il est de fait usuel de se baser sur le critère classique de la "somme des moindres carrés" que l'on cherchera à minimaliser de par plusieurs procédés.
L'expression en est la suivante, où "ec_i" est l'écart individuel:

$$\Sigma\ ec_i^2 = \min \qquad [29]$$

avec "et" = écart-type (standard déviation)

$$et = \sqrt{\frac{\Sigma_n (ec_i^2)}{n}} \qquad [30]$$

Or il convient de se demander si cette formule est la meilleure dans le cas présent. Elle peut s'écrire aussi d'une façon plus générale.

$\Sigma\ (p_i \cdot |ec_i|) = \min$ où: $|ec_1|$ est la valeur absolue de l'écart ec_i et, p_i est le poids attribué à cet écart i.

Il suffit de faire
$p_i = |ec_i|$ c'est-à-dire de pondérer chaque écart avec sa propre valeur absolue pour retomber sur l'expression des moindres carrés.

Si on fait:
$p_i = 1$ on obtient l'écart moyen e_m (en termes de valeur absolue)

$$e_m = \frac{1}{n} \cdot \sum |ec_i|$$

Toute une série de combinaisons et formules sont pensables.
Ainsi, avec $p_i = 1/ec_i$ on obtiendrait une sorte de "médiane" avec le même nombre d'erreurs positives que négatives.

La question qui se pose est de savoir si le fait d'attribuer à un écart un poids d'autant plus grand qu'il est lui-même important est justifié dans tous les cas sauf que

par la facilité que le calcul classique permet (par exemple formules de propagation des erreurs).
Dans le cas présent on peut en effet craindre que les grandes erreurs de mesure non éliminées ne pèsent trop sur les résultats par rapport aux erreurs d'importance moyennes plus fréquents.

On pourrait aussi s'imaginer que la pondération se fasse en fonction de certains critères particuliers en exprimant la plus grande confiance que l'on peut avoir en certaines mesures par rapport à d'autres (par exemple en raison de la saison en laquelle elles ont été faites ou en raison de l'instrument utilisé). Il semblerait que dans ce domaine des études pourraient présenter quelque intérêt.

20. DISTRIBUTION STATISTIQUE

Il est de même bien souvent implicitement admis que la distribution des écarts suive la loi dite "normale" de Gauss. Or, il est certain qu'il n'en est pas ainsi et que toute distribution réelle est bornée. (La "loi" de Gauss n'est en fait qu'une extrapolation très élégante de la loi polynomiale).
La conséquence de cette hypothèse est que la règle qui fixe une tolérance en fonction de l'écart type peut conduire à des conclusions fallacieuses.
Ainsi si la limite est fixée à n fois l'écart type:

$$\text{lim} = n \cdot \text{et} = n \cdot \sigma \qquad [31]$$

une erreur qui serait considérée comme rare (à faible probabilité) par la loi de Gauss serait en réalité tout à fait exceptionnelle ou même "impossible".
La distribution "normale" a comme effet de surestimer la probabilité des grands écarts et éventuellement de cacher certains signes alarmants. De fait, on considère, à la limite, normal et acceptable ce qui en réalité est exceptionnel et non-acceptable.

21. CONCEPTS A EVITER

Dans certain cas on a pensé pouvoir faire recours à des concepts qu'il faut cependant considérer comme indiquant une fausse-route et qu'il convient d'éviter.

Un premier exemple est celui de la "série temporelle" qui finit par s'auto-justifier en perdant toute notion de repère fixe. Une telle série pourra, certes, mettre en évidence une discontinuité brusque mais cachera une dérive lente et progressive.
Cette approche peut s'utiliser tout au plus que comme complémentaire à d'autres méthodes.

Un autre concept dangereux est celui de la "normalisation" des variables qui éloigne l'ingénieur d'une claire vision de la réalité. En outre, il cause problème dans le cas où la variable sort du champ considéré "normal".
En particulier il ne faut pas "normaliser" le niveau de la retenue en raison de son champ de variation habituel (niv_{max} - niv_{min})
Ainsi, si pour un ouvrage donné le marnage est habituellement faible (niveau des eaux toujours haut) on pourra considérer que la déformation du barrage est une fonction linéaire du niveau de celles-ci. Si le régime d'exploitation de l'ouvrage change (de façon permanente ou exceptionnelle) la déformation ne sera plus, et de loin, linéaire, mais sera décrite par un polynôme de degré supérieur (cas de vidange ou autre). Le modèle faillit alors en cas de situations différentes des situations habituelles. Par contre, il est très avantageux de référer le niveau des eaux à la hauteur du barrage plutôt qu'à l'altitude.
La hauteur du barrage est une caractéristique propre de l'ouvrage alors que le marnage usuel est une valeur d'exploitation susceptible d'être modifiée.

22. AJUSTEMENT DU PREDICTEUR

Indépendamment de la nature et de la base du prédicteur construit - soit sur des bases mécanistiques, ou sur des formes mathématiques choisies par similitude avec les premières ou non - il faudra parfois prévoir des ajustements à la réalité. Le but est de mieux adapter certains paramètres (par exemple modules d'élasticité) à la réalité ou bien de préciser certains coefficients.

Pour ce faire, il faudra faire recours aux critères de jugement présentés ci-devant. La définition des critères à adopter en chaque cas réel peut présenter quelque difficulté particulière. Il n'est pas dit que les mêmes critères puissent prévaloir par exemple pour tous les types d'appareils du même barrage et a fortiori pour tous les barrages d'un type donné.
Il convient d'ajouter que des tests statistiques existent qui permettent de juger si la solution proposée est "raisonnablement" vraisemblable ou non. Une certaine prudence s'impose néanmoins à cet égard.

E. CONCLUSION

23. COMMENTAIRE FINAL

Par cette étude préliminaire on a cherché à établir une liste - certainement non exhaustive - de questions apparemment fondamentales dans l'étude du comportement des barrages qui semblent mériter quelque attention particulière. Certaines questions implicites dans les discussions qui précèdent mériteraient d'être explicitées plus en détail.
On pense que la présentation faite peut servir à orienter certaines études à venir.