

## DEPLACEMENTS D'UN BARRAGE SOUS L'EFFET DES VARIATIONS DE TEMPERATURES ET DE LA RETENUE

Céline BOURDEAU<sup>1</sup>, Daniel BILLAUX<sup>2</sup> et Ahmed. CHRAIBI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Itasca Consultants S.A.S

<sup>2</sup> Itasca Consultants S.A.S

<sup>3</sup> INGEMA

**RESUME** Haut de 132,5 m et long de 285 m en crête, le barrage de Bin El Ouidane était destiné à l'irrigation et à la production d'énergie. Ce barrage voûte s'appuie sur un massif calcaire dans un verrou à parois très abruptes. Un modèle numérique du système "barrage + fondation" a été développé à l'aide du code de calcul par différences finies *FLAC<sup>3D</sup>*. Nous avons simulé le 1er remplissage du barrage (1952-1956) ainsi qu'une période plus récente (1998-2004) en tenant compte de l'historique des niveaux d'eau dans le réservoir, des pressions hydrauliques dans la fondation et des variations saisonnières des températures.

### 1 Introduction

Le contexte hydrogéologique du Maroc se caractérise par de fortes irrégularités dans les distributions spatiales et temporelles des précipitations. Celles-ci ont entraîné des sécheresses prononcées dans la majeure partie du pays, notamment durant les années 1944-1945, 1980-1985, 1991-1995 et 1998-2002. Pour faire face à cette situation et supporter le développement économique du pays, les autorités ont entrepris la construction de plusieurs barrages destinés à la collecte des eaux de pluie des saisons humides et à leur redistribution lors des saisons sèches.

Le barrage de Bin El Ouidane, construit entre les années 1948 et 1952, près de la ville de Beni Mellal (Haut Atlas), dans la partie étroite du fleuve El Abid, est l'un des 110 grands barrages aujourd'hui en opération au Maroc (Fig. 1). Destiné à l'irrigation des terrains ainsi qu'à la production d'énergie (287 Gwh/an environ), ce barrage a permis le développement de l'agriculture (production de lait et de sucre) dans une surface de 69500 ha le long de la plaine Tadla (entre le Haut Atlas et le Plateau des Phosphates). De plus, son réservoir, long de 20 km et de volume égal à  $1500 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , est devenu un lieu attractif pour la pêche.

D'un point de vue climatique, le barrage de Bin El Ouidane est situé dans le bassin versant de Oum Er-R'bia où le taux de précipitations est de 550 mm/an, les températures varient entre 10°C et 40°C au cours de l'année, et l'évaporation annuelle est de 2000 mm avec un pic en juillet et en août pouvant atteindre 300 mm/mois. Ce barrage peut donc être soumis à de fortes variations de températures ainsi qu'à des variations du niveau d'eau dans la retenue pouvant altérer son comportement.

Dans cet article, nous présentons les résultats d'une étude thermo-hydro-mécanique du comportement du barrage depuis sa construction. L'objectif de ce travail était de créer un outil de diagnostic permettant de prédire le comportement futur du barrage pour comparaison avec les mesures instrumentales. Des écarts significatifs entre les prédictions numériques et les mesures instrumentales permettront de détecter des évolutions futures anormales du comportement du barrage. La première partie de cet article est consacrée à une brève description des caractéristiques du barrage et du massif rocheux. Puis, la méthodologie utilisée pour calibrer le modèle avec le code de calcul par différences finies en trois dimensions *FLAC<sup>3D</sup>* (Itasca, 2005) est présen-

tée. Enfin, nous concluons par une discussion des principaux résultats en termes de déplacements du barrage.



Figure 1: Photo de la face aval du barrage de Bin El Ouidane (source: INGEMA).

## **2 Description des caractéristiques du barrage et du massif rocheux**

Le barrage de Bin El Ouidane est un barrage voûte de 132,5 m de haut, long de 285 m en crête. Ce barrage s'appuie sur un massif calcaire dans un verrou à parois très abruptes (versant quasi-vertical sur le flanc gauche et de pente 45° sur le flanc droit). La Fig. 2 montre que sous la zone de calcaire massif se trouve une couche de 4 à 8 m d'épaisseur de marnes livides, ainsi qu'une nouvelle série de calcaire massif. Au-dessous, cette série s'enrichit progressivement en bancs marneux, jusqu'à atteindre, 30 m sous la base du barrage, une couche de 150 m de marnes rouges imperméables présentant des traces de gypse. Cette dernière assure l'étanchéité du réservoir (Jaeger 1958). Des mesures de terrain ont montré que le flanc gauche du barrage comporte de nombreuses failles et joints alors que le flanc droit est sain et compact (Jaeger 1958).

Le barrage de Bin El Ouidane est composé de 19 plots de béton d'épaisseur comprise entre 13 et 14 m. Ces plots ont été clavés pour rendre la voûte monolithique. Lors de la construction du barrage, des instruments ont été installés sur le barrage lui-même ainsi que sur les berges. Ces instruments, encore utilisés aujourd'hui, comprennent des appareils géodésiques qui mesurent les déplacements absolus de la face aval du barrage et du massif rocheux, 3 pendules directs qui mesurent les déplacements relatifs du couronnement par rapport à la base du barrage, et 179 cordes vibrantes qui mesurent les déformations et les contraintes dans le barrage et vérifient que son comportement est élastique. Des piézomètres fournissent des informations sur les pressions hydrostatiques dans la fondation. En 1998, 2 pendules inverses sont venus s'ajouter au système de surveillance.

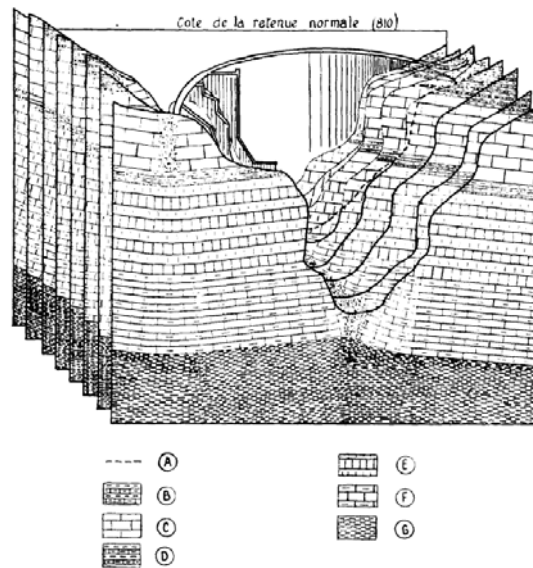


Figure 2: Coupes géologiques à l'emplacement du barrage (source: Jaeger, 1958). A : trace du parement aval; B: marnes livides; C: massif calcaire supérieur; D: marnes limites; E: massif calcaire inférieur; F: marno-calcaires inférieurs; G: marnes rouges à gypse.

### 3 Méthode

Des simulations thermo-hydro-mécaniques ont été réalisées avec *FLAC<sup>3D</sup>* en tenant compte des pressions mécaniques exercées par l'eau du réservoir sur la fondation et sur la face amont du barrage. Les changements de pressions interstitielles induits par une montée ou une baisse du niveau d'eau dans la retenue ne sont pas calculés directement par le code. Pour une valeur donnée du niveau d'eau dans le réservoir, un champ de pressions interstitielles simplifié a été calculé et imposé. Les paragraphes suivants décrivent brièvement les 4 étapes principales de la simulation.

#### Création d'un maillage représentatif de la masse rocheuse

Pour éviter, dans la zone d'intérêt (le barrage et les berges), des phénomènes non-physiques pouvant être induits par les conditions aux limites, le modèle de la masse rocheuse est large de 900 m environ dans la direction perpendiculaire à l'axe de la vallée, long de 300 m côté amont et de près de 1 km côté aval et profond de près de 150 m sous la base du barrage. Ce modèle est représenté dans la Fig. 3 avec le barrage.

#### Définition des propriétés de la fondation et mise en place des conditions aux limites et des conditions initiales

La fondation est supposée élastique. Ses propriétés sont rassemblées dans le Tableau 1. Pour des raisons de cohérence avec les observations de terrain (Jaeger, 1958), nous avons attribué aux calcaires du flanc gauche un module de Young plus faible qu'à ceux du flanc droit.

Les déplacements normaux sont interdits sur les frontières du modèle. La température est fixée partout à la température moyenne annuelle (19°C) et les pressions in-

terstitielles sont initialisées dans la roche selon un profil de pression réaliste: l'eau est considérée comme affleurante en fond de vallée, avec une nappe dont la cote augmente légèrement en fonction de l'altitude de la surface du sol.

A partir d'un champ de contraintes approximatif, un calcul mécanique seul est réalisé pour porter le modèle à l'équilibre sous l'effet de la gravité et sans barrage.

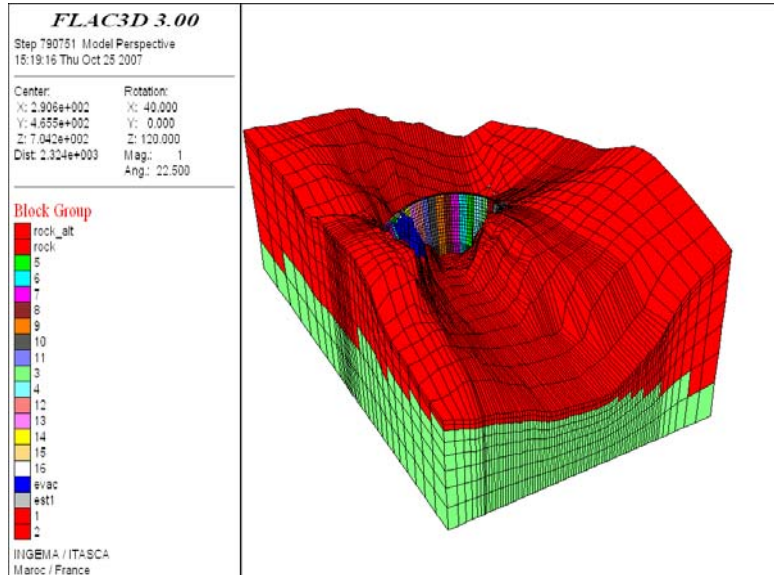


Figure 3: Modèle *FLAC<sup>3D</sup>* du système "fondation + barrage". Les calcaires sont représentés en rouge et les marnes en vert. Les 19 plots sont indiqués par des couleurs différentes.

Tableau I: Propriétés élastiques de la fondation et du béton.

	Module de Young [GPa]	Coefficient de Poisson	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
Calcaire du flanc gauche	5	0,3	2500
Calcaire du flanc droit	25	0,3	2500
Marnes	5	0,25	2000
Béton	25	0,18	2400

#### 4 Construction du barrage

Le barrage est composé de 19 plots montés indépendamment les uns des autres. Après une période de quelques mois permettant au béton de refroidir, des injections de clavage sont réalisées entre les plots pour rendre la voûte monolithique: il s'agit là d'une méthode standard qui assure un bon transfert de contraintes vers la fondation. Le modèle numérique simule ce processus d'une manière simplifiée.

Un champ de contraintes initial est calculé dans les 19 plots sous l'effet de la gravité. La température dans le barrage est alors initialisée à 40°C et un calcul thermique permet de reproduire, dans les plots, l'évolution des températures pendant la période avant clavage. Le clavage est alors reproduit numériquement en appliquant une pression mécanique entre les plots jusqu'à atteindre la pression de 5 bars ou un déplacement entre les plots de l'ordre de 1 mm. A la fin de cette phase, le modèle est porté à l'équilibre mécanique. Dans la réalité, le clavage est effectué progressive-

ment et quasiment en même temps que la montée de la retenue alors que dans le modèle, le clivage intervient avant la montée de la retenue.

Les propriétés élastiques du béton sont rassemblées dans le tableau 1 et ses propriétés de résistance au cisaillement et thermiques sont résumées dans le tableau II ci-dessous.

Tableau II: Propriétés de résistance au cisaillement et thermiques du béton.

	Co-hésion. [MPa]	Angle de frottement [°]	Conductivité thermique [kcal/(m °C)]	Chaleur spécifique [kcal/(kg °C)]	Coefficient d'expansion thermique. [°C]	Coefficient de transfert de chaleur convective entre le béton et l'air ou l'eau [W °C/m <sup>2</sup> ]
Béton	7	30	2	0,22	0,75*10 <sup>-5</sup>	200

## 5 Analyse du comportement du barrage sous l'effet de chargements thermiques et hydrauliques

La courbe noire de la Fig. 4 donne les températures mensuelles moyennes de l'air utilisées dans cette étude. La partie non immergée de la face amont du barrage est soumise à une sur-température de + 3°C en hiver et de + 10°C en été car elle est exposée au sud (courbe grise). Du côté amont du barrage, les points situés entre 0 et 20 m sous le niveau de la retenue sont à une température intermédiaire entre la température de l'air (Fig. 4) et la température de l'eau (13°C).

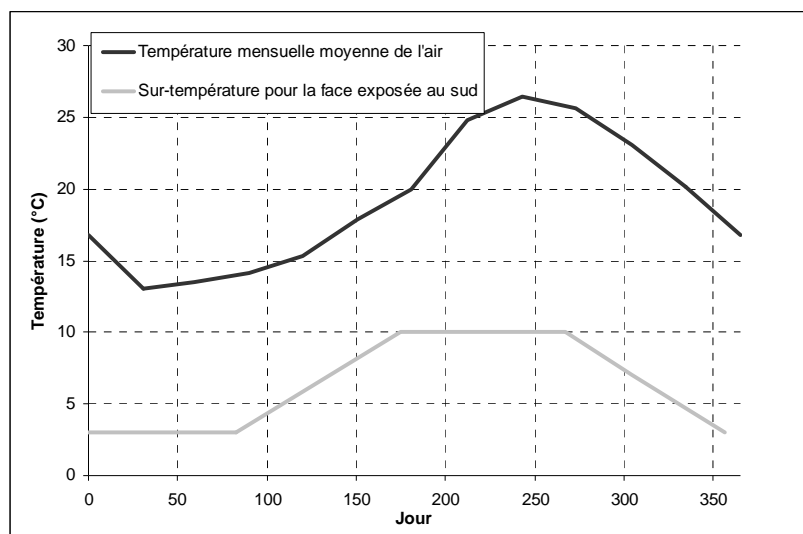


Figure 4 : Températures mensuelles moyennes.

La Figure 5 donne l'historique des niveaux d'eau dans la retenue de janvier 1952 à juillet 1956 (courbe grise) d'une part, et de septembre 1998 à août 2004 (courbe noire) d'autre part. Dans l'intervalle entre ces deux périodes, les données étant incomplètes, elles n'ont pas été utilisées.

Pour un jeu donné de paramètres (niveau d'eau dans la retenue - Fig. 5 - et température de l'air - Fig. 4) correspondant à un moment donné, la réponse du barrage à la sollicitation en pression et en température est évaluée au moyen d'historiques des déplacements relatifs radiaux et tangentiels. Puis elle est comparée aux mesures de

déplacements des pendules pendant les premières années de la mise en service du barrage ainsi que sur la période 1998-2004 (Jaeger, 1958).

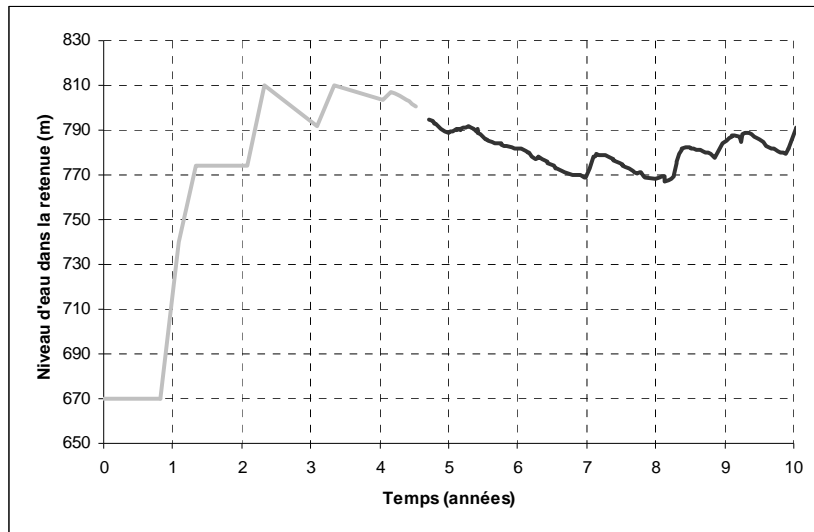


Figure 5 : Niveau d'eau dans la retenue entre janvier 1952 (temps = 0) et juillet 1956 (courbe grise) d'une part, et entre septembre 1998 (temps = 4.7) et août 2004 (courbe noire) d'autre part. Pour permettre la superposition de ces deux courbes sur un même graphique, nous avons supposé arbitrairement que temps = 4.0 correspondait à janvier 1998.

Dans les figures suivantes, les déplacements relatifs simulés radiaux et tangentiels d'un plot particulier (le plot n°6 situé au milieu du barrage) par rapport à la fondation sont représentés en bleu foncé et en rouge respectivement alors que les déplacements radiaux et tangentiels mesurés sont colorés en bleu clair et en orange (quand disponibles). La convention de signe adoptée est la suivante: un déplacement vers l'amont (l'aval) est positif (négatif).

## 6 Résultats

### Calage du comportement du barrage entre 1952 et 1956

La Fig. 6 donne les déplacements relatifs simulés et mesurés au sommet du plot n° 6 entre janvier 1952 et juillet 1956. Cette figure montre que des déplacements radiaux significatifs commencent à se développer vers l'aval en novembre 1952 (temps = 0,8) et qu'ils durent jusqu'en mars 1953 (temps = 1,3) approximativement. Ces déplacements sont liés à la première mise en eau du réservoir. Pendant cette période, les effets thermiques ne jouent qu'un rôle mineur dans le comportement global du barrage. Entre mars 1953 et février 1954 (temps = 2,2), le niveau d'eau dans la retenue est constant et le comportement du barrage est alors totalement contrôlé par les variations saisonnières de température: lorsque le barrage se réchauffe (été), l'expansion du béton entraîne un déplacement global du barrage vers l'amont; au contraire, lorsque le barrage se refroidit (hiver), sa diminution de volume est responsable d'un déplacement global du barrage vers l'aval. A partir de février 1954, le comportement global du barrage devient beaucoup plus complexe car il est contrôlé à la fois par les variations de température, et les montées et les baisses du niveau d'eau dans la retenue.

Les déplacements radiaux simulés et mesurés sont très similaires entre janvier 1952 (temps = 0) et mars 1954 (temps = 2,4) à condition d'appliquer une correction aux résultats de FLAC<sup>3D</sup> (cette correction se justifie par le fait que la "référence zéro" en temps pour les déplacements simulés n'est pas connue). En novembre 1954 (temps = 2,8), les déplacements radiaux modélisés sont plus grands d'environ 8 mm que les déplacements mesurés. Cependant, la fiabilité des mesures à cette période peut être remise en question car entre l'été 1954 et novembre 1954, l'amplitude des déplacements est étonnamment faible. Enfin, les déplacements tangentiels simulés sont très largement inférieurs aux déplacements radiaux simulés.

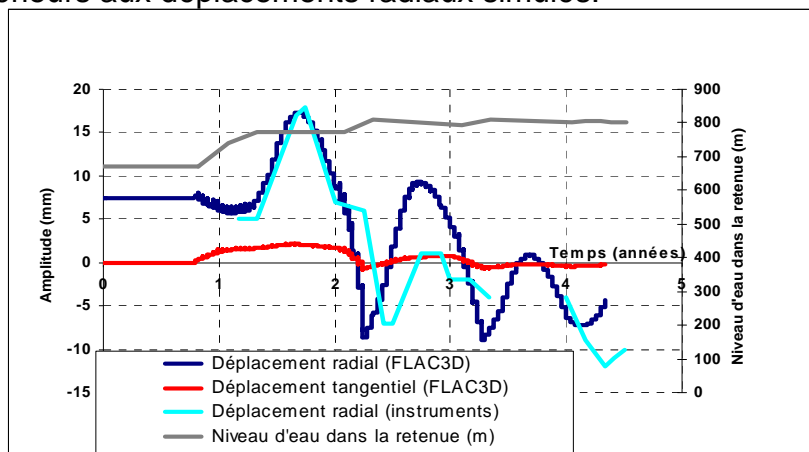


Figure 6 : Déplacements relatifs radiaux (courbes bleues) et tangential (courbe rouge) au sommet du plot n°6.

### Etude du comportement du barrage entre 1998 et 2004

Nous avons également comparé les déplacements relatifs simulés et mesurés en deux points du plot n°6 (sommet et aux deux tiers de la hauteur du plot) entre 1998 et 2004: les résultats sont présentés dans la Fig. 7 et la Fig. 8 respectivement. Ces figures reprennent les codes couleurs et la convention de signe adoptés dans le paragraphe précédent. La Fig. 7 et la Fig. 8 montrent que les déplacements radiaux simulés sont parfaitement en accord avec les déplacements radiaux mesurés. Si l'on met de côté quelques pics peu réalistes très étroits et de très grande amplitude dans les mesures, l'écart entre les courbes issues de l'instrumentation et de la modélisation numérique n'est que de 3 mm. Les déplacements tangentiels sont là encore négligeables devant les déplacements radiaux.

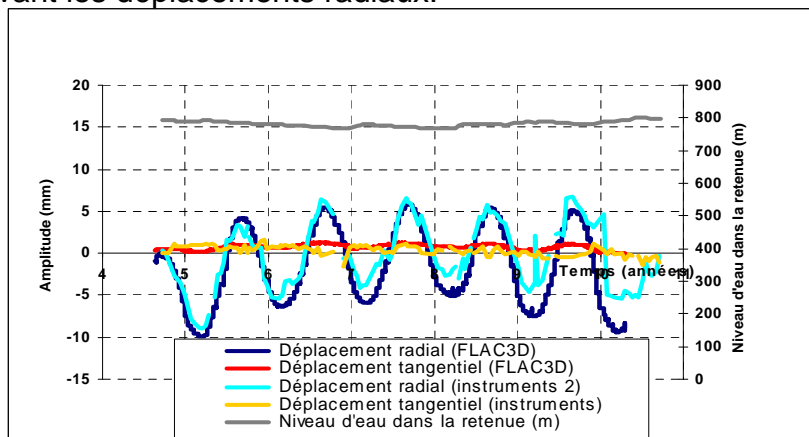


Figure 7 : Déplacements relatifs radiaux (courbes bleues) et tangentiels (courbes rouge et orange) au sommet du plot n°6.

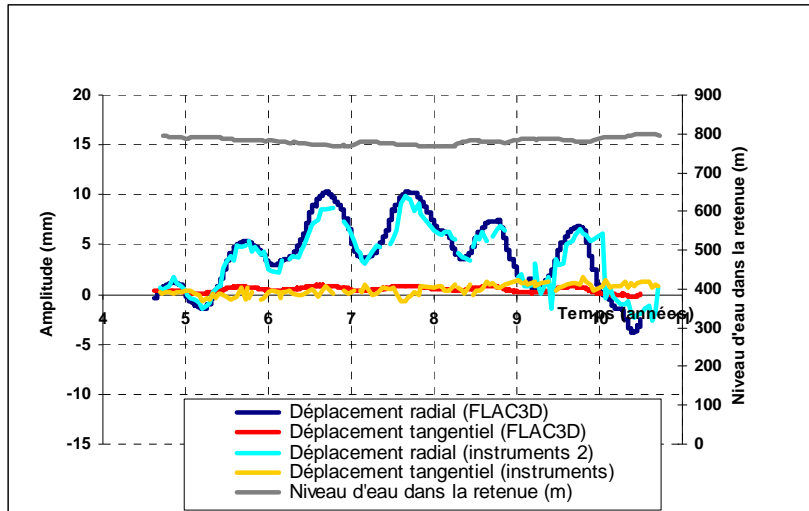


Figure 8 : Déplacements relatifs radiaux (courbes bleues) et tangentiels (courbes rouge et orange) d'un point situé à la cote 770 m dans le plot n°6.

## 7 Conclusions

Le modèle présenté dans cet article a été calé en utilisant les mesures instrumentales disponibles depuis la construction du barrage. Ce modèle a depuis lors été installé sur le site du barrage et il est systématiquement utilisé pour comparaison avec les mesures instrumentales. L'évaluation de la sécurité du barrage a considérablement progressé depuis la mise en application de ce modèle déterministe il y a un an. Il est prévu de réviser le calage du modèle après 2 à 3 ans d'utilisation pour apporter quelques ajustements si nécessaire.

## 8 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ONE pour son autorisation à publier ces résultats.

## 9 Bibliographie

- Itasca, 2005. *FLAC<sup>3D</sup> manual*. – Theory and Background. Minneapolis  
Jaeger M., 1958. Déformations du barrage de Bin El Ouidane. *Sixième Congrès des Grands Barrages*, New York, 1958, p. 81-96.